



Восьмая Международная научно-практическая конференция

**«СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕПЛОВЫЕ
И МАССООБМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ (СУШКА, ТЕПЛОВЫЕ
И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ)
СЭТМТ – 2023»**

**8th International Scientific-Technical Conference
"Energy-Saving Technologies for Drying, Thermal and Mass
Transfer Processing
DTMP-2023"**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Москва
17–19 октября 2023 г.

УДК (66.047.41+621.1).676.026.523

ББК 35.112+31.36

С 56

С 56 Современные энергосберегающие тепловые и массообменные технологии (сушка, тепловые и массообменные процессы): сборник научных трудов Восьмой Международной научно-практической конференции (17–19 октября 2023 года). – М. : ООО «Мегаполис», 2023. – 340 с.

ISBN 978-5-6050660-3-3

В сборник включены научные статьи российских и зарубежных ученых, представленные на конференции, в которых рассматриваются вопросы теории и математического моделирования процессов сушки и тепловых процессов, технологии и аппаратного оформления процессов сушки и тепловых процессов в химической, текстильной, деревообрабатывающей, микробиологической, медицинской, целлюлозно-бумажной промышленности и АПК, энерго- и ресурсосбережения в процессах сушки и в тепловых процессах, цифровых технологий в процессах сушки и тепловой обработки материалов (теплофизические измерения, контроль, приборное оформление и автоматизация).

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

Все статьи сборника прошли рецензирование, сохраняют авторскую редакцию. Ответственность за содержание несут авторы.

УДК (66.047.41+621.1).676.026.523

ББК 35.112+31.36

ISBN 978-5-6050660-3-3

© ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА

имени К. А. Тимирязева, 2023

© Российский союз научных и инженерных общественных объединений, 2023

© ООО «Мегаполис», 2023

ОРГАНИЗАТОРЫ
ВОСЬМОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕПЛОВЫЕ
И МАССООБМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ (СУШКА, ТЕПЛОВЫЕ
И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ) СЭТМТ – 2023»

- *Министерство науки и высшего образования РФ
- *Министерство сельского хозяйства РФ
- *Российский союз научных и инженерных общественных объединений (РосСНИО)
- *ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева
- *Комитет РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов
- *Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова, Р. Беларусь, г. Минск

Рабочий язык семинара: русский, английский.
Материалы публикуются в авторской редакции.

Информационное обеспечение конференции на сайте
www.drying-committee.ru

ОРГКОМИТЕТ
Восьмой международной научно-практической конференции
«СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕПЛОВЫЕ И МАССООБМЕННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ (СУШКА, ТЕПЛОВЫЕ И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ)
СЭТМТ – 2023»

Президент конференции
Трухачев Владимир Иванович – ректор ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева, Академик РАН, д.с.-х.н., д.э.н., профессор

Сопредседатели конференции
Журавлев Алексей Владимирович – проректор по науке и инновационному развитию ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева, д.т.н., профессор

Рудобашта Станислав Павлович – председатель Комитета РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов, профессор ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева д.т.н., профессор

Ученый секретарь конференции
Таран Юлия Александровна – ученый секретарь Комитета РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов, к.т.н., доцент

Программный комитет конференции
Дидманидзе Отари Назирович – Академик РАН, д.т.н., профессор ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева

Ерохин Михаил Никитьевич – Академик РАН, д.т.н., профессор ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева

Научный оргкомитет

Международный: Akulich A. (Byelorussia); Akulich P. (Byelorussia); Alves-Filho O. (Norway); Ditl P. (Czechia); Gehrmann D. (Germany); Kudra T. (Canada); Mulet A. (Spain); Pavlukevich N. (Byelorussia); Rieger F. (Czechia).

Российская Федерация: Антипов С. Т. (РФ, Воронеж); Бобков С. П. (РФ, Иваново); Власенко Г. П. (РФ, Москва); Будников Д. А. (РФ, Москва); Васильев А. Н. (РФ, Москва); Гаряев А. Б. (РФ, Москва); Дворецкий С. И. (РФ, Тамбов); Дмитриев В. М. (РФ, Тамбов); Дорняк О. Р. (РФ, Воронеж); Жуков В. П. (РФ, Иваново); Журавлев А. В. (РФ, Москва); Завалий А. А. (РФ, Симферополь); Зуева Г. А. (РФ, Иваново); Ивлиев А. Д. (РФ, Екатеринбург); Капранова А. Б. (РФ, Ярославль); Карташов Э. М. (РФ, Москва); Кошелева М. К. (РФ, Москва); Кулов Н. Н. (РФ, Москва); Лабутин А. Н. (РФ, Иваново); Липин А. Г. (РФ, Иваново); Мищенко С. В. (РФ, Тамбов); Остриков А. Н. (РФ, Воронеж); Родионов Ю. В. (РФ, Тамбов); Рудобашта С. П. (РФ, Россия); Рыбкин В. В. (РФ, Иваново); Садыков Р. А. (РФ, Казань); Сафин Р. Р. (РФ, Казань); Секанов Ю. П. (РФ, Москва); Семенов Г. В. (РФ, Москва); Семенов Ю. П. (РФ, Мытищи); Сорочинский В. Ф. (РФ, Москва); Таран Ю. А. (РФ, Москва); Тихомиров Д. А. (РФ, Москва); Федосов С. В. (РФ, Иваново); Фролова А. К. (РФ, Москва); Шорсткий И. А. (РФ, Краснодар).

Рабочий оргкомитет

Члены оргкомитета:

Кожевникова Наталья Георгиевна – и.о. заведующего кафедрой, к.т.н., доцент кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева (председатель)

Дранный Александр Владимирович – к.т.н., доцент кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева

Кукушкина Татьяна Сергеевна – заведующий учебной лабораторией кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева

Данная конференция является очередным международным научно-практическим мероприятием, проводимым Комитетом РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов совместно с другими организациями. До этого Комитетом были проведены:

- шесть Международных научно-технических конференций и один Международный научно-технический симпозиум (в рамках Международного научно-технического форума «Первые международные Косыгинские чтения» – 2017-й год) под названием «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) – СЭТТ» с периодичностью 3 года – 2002–2020 гг. – всего семь мероприятий под названием «СЭТТ»;

- Международный научно-технический семинар «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов», посвященный 100-летию академика А. В. Лыкова – 2010 г. (семинар проведен при финансовой поддержке РФФИ, проект № 10-08-06017-г);

- Веб-конференция «Первые международные Лыковские научные чтения, посвященные 105-летию академика А. В. Лыкова» – под названием «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе» (конференция проведена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 15-08-20703-г) – 2015 г.;

- Международная научно-техническая конференция «Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности (МНТК Плановский)» – 2016 г.;

- Международный научно-технический семинар «Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства», посвященного 175-летию со дня рождения К. А. Тимирязева – 2018-й год.

Особенностью данной конференции является то, что на ней расширена тематика докладов: добавлены исследования по тепловым и массообменным процессам, поэтому изменилась аббревиатура конференции – она стала именоваться «СЭТМТ», а не «СЭТТ», как ранее, при этом сохранена общая нумерация конференций, поэтому она считается оргкомитетом как 8-я конференция этого плана.»

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНАЯ СЕССИЯ

Журавлев А. В. Развитие машинных технологий сушки дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя.....	14
Рудобашта С. П. Современные математические модели для описания кинетики тепло- и массообменных процессов в системах с твердой фазой.....	18
Федосов С. В. Теория тепломассопереноса как вектор решения проблем стратегии и тактики развития строительных наук.....	26
Гаряев А. Б., Прун О. Е. Метод оценки эффективности теплообменного оборудования для утилизации низкопотенциальной теплоты.....	35
Тихомиров Д. А. Энергоэффективные процессы и оборудование теплообеспечения животноводческих объектов.....	40
Акулич П. В. Тепломассообмен в процессах распылительной конвективно-радиационной сушки.....	52
Семёнов Г. В., Краснова И. С. Развитие технологии сублимационной сушки в современной России.....	58
Васильев А. Н., Будников Д. А., Васильев А. А. Методика согласования параметров волноводов в установках СВЧ-конвективной обработки зерна.....	61
Васильев А. Н., Будников Д. А. Применение программного комплекса CST Microwave при проектировании установки СВЧ-конвективной тепловой обработки зерна.....	66
Завалий А. А., Лаго Л. А., Сергеев М. А. Компактные устройства инфракрасной сушки высоковлажного сельскохозяйственного сырья.....	71

СЕКЦИЯ 1. ТЕОРИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СУШКИ, ТЕПЛОВЫХ И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Акулич П. В., Слижук Д. С. Тепломассоперенос в плотном слое растительных материалов при сушке в условиях циклического радиационно-конвективного энергоподвода.....	76
Фролкова А. В., Сибирцев М. М., Фролкова А. К. Исследование зависимости энергопотребления схемы разделения смеси циклогексан – вода – циклогексанон от ее исходного состава.....	81
Дворецкий Д. С., Дворецкий С. И., Акулинин Е. И., Усачев В. Б., Беляев В. А. Расчет кинетики процесса адсорбции при разделении газовых смесей.....	85
Рудобашта С. П., Зуева Г. А., Хандогин Г. В., Курнаев И. М. Влияние формы тела на тепломассообмен при осциллирующей инфракрасной сушке семян.....	90
Липин А. А., Липин А. Г. Моделирование процесса сушки карбоната лития в терморadiационной сушилке.....	96
Бобков С. П., Астраханцева И. А. Исследование процессов нелинейной диффузии с использованием систем клеточных автоматов.....	100

Жуков В. П., Кокулин И. А., Виноградов В. Н. Матричное моделирование испарительных установок с учетом капельного уноса влаги.....	104
Вендин С. В. К расчету мощности дополнительных источников теплоты для подогрева продукта в биореакторах цилиндрической и шаровой форм на основе решения уравнения теплопроводности Фурье.....	106
Дорняк О. Р., Недоносков А. Б. Моделирование теплообмена в жестких аэродромных покрытиях при СВЧ-нагреве двухслойного деформационного шва.....	109
Шумова Н. В., Вязьмин А. В., Королев Е. К. Моделирование массообменных процессов при объемном инкубировании клеток в гелях с искусственными микроканалами.....	115

СЕКЦИЯ 2. ТЕХНОЛОГИЯ И АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ СУШКИ, ТЕПЛОВЫХ И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ, ХИМИЧЕСКОЙ, ТЕКСТИЛЬНОЙ, ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ, МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ, МЕДИЦИНСКОЙ, ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Брич М. А., Горбачёв Н. М., Козначеев И. А., Макаренко Д. С. Исследование торрефикации торфа в смеси с нефтяным коксом при микроволновом нагреве.....	119
Фролкова А. В., Гаганов И. С., Фролкова А. К. Совершенствование технологии разделения смеси метанол – вода – метилметакрилат.....	123
Ивлиев А. Д. Применение метода температурных волн для исследования теплофизических свойств шпонов.....	128
Остриков А. Н., Мишинева К. В. Технология вакуумного напыления экструдированных гранул белково-витамино-липидным комплексом.....	133
Сафина А. В., Исмаилов Л. Ю. Предварительное замораживание неплодовых частей облепихи с целью интенсификации массообменных процессов при экстракции.....	136
Сафина А. В., Губернаторов В. В. Экономическая эффективность водно-вакуумного способа экстрагирования березового гриба чага.....	139
Завалий А. А., Лаго Л. А. Исследование проницаемости высоковлажного сельскохозяйственного сырья для инфракрасного излучения динамическим методом.....	142
Кошелева М. К., Дорняк О. Р., Исаев М. В., Третишников П. П. Конвективная сушка плоских волокнистых материалов, интенсифицированная ультразвуковым полем.....	147
Казуб В. Т., Кошелева М. К., Цинцадзе М. З. Особенности интенсифицирующего воздействия физических полей на процесс экстрагирования.....	150
Промтов М. А., Степанов А. Ю. Анализ эффективности экстрагирования гуминовых кислот в роторном импульсном аппарате из гуматосодержащего сырья.....	153
Кох-Татаренко В. С., Кузьмин С. Н. Торрефикация биомассы в реакторе с кипящим слоем и лабиринтной вставкой.....	157

Иванова И. В., Подъяблонская Д. О., Рудобашта С. П., Родионов Ю. В. Исследование особенностей влагоотбора и режимов двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки яблочной кожуры.....	161
Таран Ю. А., Стрельникова В. О., Фуфаева В. М., Власова А. М. Получение сложных удобрений на основе карбамида как способ утилизации фосфогипса.....	165
Таран Ю. А., Фуфаева В. М., Стрельникова В. О. Получение удобрений пролонгированного действия на основе приллированного и гранулированного карбамида.....	170
Носов Г. А., Уваров М. Е., Степанова Д. С. Энергосберегающие варианты процесса ректификации с использованием компрессионных тепловых насосов.....	174
Шевкун Н. А., Шевкун В. А., Кожевникова Н. Г., Драный А. В. Анализ применимости систем охлаждения воздуха в производственных помещениях.....	178
Ермоченков М. Г., Белых С. А., Новоселова Ю. В. Результаты термического анализа антипирена на основе жидкого стекла.....	182
Ключников А. С., Балтаев Е. Н., Сопов А. А. Хозяйственное испытание зерносушилки Strahl 2500 FR.....	187
Кочетков В. М., Гаганов И. С., Кочетков В. В., Нюньков П. А. Обеспечение устойчивых гидродинамических режимов в струйных биореакторах с эжектором, предназначенных для культивирования метаноокисляющих бактерий.....	190
Мунассар Е. Х. А., Шорсткий И. А. Сушка зернового материала с предварительной обработкой слаботочным плазменным каналом искрового разряда.....	193
Платицын А. А., Бакин И. А. Повышение энергоэффективности сушильной установки для плодовоовощных пищекокнцентратов.....	196
Скоморохова А. И., Рыбин Г. В., Никитин Д. В., Щегольков А. В. Тепловые процессы при производстве продуктов питания на пищевом 3D-принтере.....	200
Соловьев А. А., Фатеева М. А., Гареев А. Р. Технологические аспекты процесса сушки полифениленсульфида в аппарате с принудительной конвекцией.....	203
Соснин М. Д. Низкотемпературная плазма как способ подготовки растительного материала перед этапом сушки.....	206
Сотников В. Г. Установка термической переработки отходов агропромышленного комплекса в адсорбенты.....	209
Титунин А. А., Вахнина Т. Н., Сусоева И. В. Сходимость расчетных и экспериментальных значений коэффициента теплопроводности композиционных материалов из целлюлозосодержащих отходов.....	212
Федотова О. В., Цыганков П. Ю., Меньшутина Н. В. Суб- и сверхкритические технологии для получения аэрогелей на основе целлюлозы.....	216
Чернов В. Ю., Гайсин И. Г., Шарапов Е. С. Пути интенсификации сушки неизмельченных древесных отходов для последующей термической модификации или использования в качестве топлива.....	219
Шевцов А. А., Дранников А. В., Домбровская Я. П., Китаев Д. С. Аппаратурно-технологическая схема комплексной переработки травы зверобоя с применением парозежекторной теплонасосной установки.....	224

Шилов С. В., Орлова Н. А., Позняковский В. М.	
Технология комбинированной сушки сырья животного происхождения.....	228
Платицын А. А., Орлова Н. А., Позняковский В. М.	
Разработка циклограммы технологического процесса вакуумно-импульсной сушки.....	232
Юркина М. Ю., Матухнов Т. А.	
Экспериментальное исследование влияния турбулизации потока в трубопроводах на образование отложений.....	236

СЕКЦИЯ 3. ТЕПЛОМАССОБМЕН ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Федосов С. В., Баканов М. О., Кузнецов И. А.	
Моделирование нелинейной пространственной и временной динамики процессов теплопереноса на стадии отжига пеностекла.....	241
Лазарев А. А., Федосов С. В., Мальцев А. Н.	
О механизме теплопереноса во внешнем слое пластика изделия из стеклопластика РСТ-250 в условиях ландшафтного пожара.....	247
Гирфанов А. А., Сафин Р. Р., Сафина А. В.	
Интенсификация процессов пропитки термомодифицированной древесины посредством предварительной ультрафиолетовой обработки.....	252
Илалова Г. Ф., Галяветдинов Н. Р.	
Исследование тепло и массообменных процессов при разработке технологии получения древесно-наполненных композиционных материалов.....	256
Хасаншин Р. Р., Сахипов И. И.	
Применение проэкстрагированной древесной массы лиственницы в строительных композиционных материалах.....	258
Салимгараева Р. В., Прокопьев А. А.	
Модификация древесного сырья ацелированием в производстве композиционных материалов.....	261
Поздеев А. Г., Котлов В. Г., Кузнецова Ю. А.	
Автоматизация расчета источников теплоснабжения сушильной камеры.....	264
Котлов В. Г., Поздеев А. Г., Кузнецова Ю. А.	
Информационно-технологическое обеспечение расчета сушильной установки.....	268
Поздеев А. Г., Котлов В. Г., Кузнецова Ю. А.	
Автоматизированные расчеты конструктивных элементов сушильной камеры.....	272
Низин Д. Р., Низина Т. А., Селяев В. П., Спирин И. П.	
Анализ влияния климатических факторов на изменение физико-механических характеристик полимерных материалов с учетом их влагосодержания.....	275
Лазарев А. А., Торопова М. В., Маличенко В. Г.	
Математическая модель теплового воздействия пожара на двухслойный термочувствительный элемент специального стенового изделия.....	280
Цветков Д. Е., Комлев А. Ю.	
Сопоставление температурных полей монослойных противопожарных преград.....	284

СЕКЦИЯ 4. ЭНЕРГО- И РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ В ПРОЦЕССАХ СУШКИ, В ТЕПЛОВЫХ И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

Захаров М. К., Губкин Е. А.	
Влияние энергетического уровня исходной смеси на затраты теплоты при ректификации.....	288
Иванова И. В., Родионов Ю. В., Зорина О. А.	
Энерго- и ресурсосбережение двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки.....	292

Кожевникова Н. Г., Драный А. В., Шевкун Н. А., Шевкун В. А. Анализ энергоэффективности использования косвенного фриктулинга в технологиях хранения сельскохозяйственной продукции.....	296
Осмонов О. М., Кожевникова Н. Г., Захарова А. А. Технология получения высушенного эфлюента биогазового реактора в качестве кормовой добавки.....	301
Алексеева Н. В. Энергосбережение в массообменных процессах замкнутого цикла.....	305
Ткач В. В., Шевцов А. А., Савичев Н. А. Барабанная сушиллка с двумя независимыми секциями.....	308
Васильев П. С., Рева Л. С. Оценка интенсивности теплоотдачи при множественном капельном кипении.....	311
Колибаба О. Б., Габитов Р. Н., Долинин Д. А., Бородин А. Н. Экспериментальное исследование сушки древесины с целью создания композитного топлива.....	315
Габитов Р. Н., Колибаба О. Б., Долинин Д. А., Белов М. С. Экспериментальное исследование тепло-и массообмена в процессе уничтожения просроченных продуктов питания.....	319
Романова Е. В., Колиух А. Н. Оценка эффективности интенсификации теплообмена.....	323
Белов Д. В., Андреев С. А. Расчет скорости нагрева гелия в рабочей камере дирижабля.....	327
Соколова Е. В. Исследование кинетики процесса сушки печени сома при конвективном энергоподводе при ультразвуковом воздействии.....	331
Яснот А. С. Анализ кинетики процесса обезвоживания мяса речной ракушки-перловицы с целью оценки его сорбционных свойств.....	335

ПЛЕНАРНАЯ СЕССИЯ
ОТКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ, ПРИВЕТСТВЕННОЕ СЛОВО

*Трухачев Владимир Иванович – ректор РГАУ–МСХА
имени К. А. Тимирязева, Академик РАН, д.с.-х.н., д.э.н., профессор*

Дорогие организаторы и участники
Восьмой Международной научно-практической конференции
«Современные энергосберегающие тепловые и массообменные технологии
(сушка, тепловые и массообменные процессы) – СЭТМТ-2023»

От имени профессорско-преподавательского коллектива РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева и от себя лично сердечно приветствую Вас с этим значительным событием в жизни университета – проведением конференции СЭТМТ-2023. Важно отметить, что эта конференция, имеющая научно-практическую направленность, проводится в год десятилетия 2022–2031, которое Указом Президента Российской Федерации В. В. Путина объявлено в Российской Федерации десятилетием науки и технологий.

Конференция межотраслевая и то, что она проводится в стенах нашего аграрного университета, является признанием заслуг ученых нашего университета, работающих в этой области знаний. Инициатором проведения конференции является Комитет по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов, который функционирует на общественных началах при Российском союзе научных и инженерных объединений (РосСНИО). Территориально этот Комитет размещен в нашем университете, на кафедре теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий и совместно с ней проводит различные научно-технические мероприятия, в том числе с периодичностью 1 раз в три года международные научно-практические конференции такого рода. Предыдущая 7-я конференция состоялась в 2020-м году также в стенах нашего университета.


Уместно вспомнить, что в 1956 году по инициативе Академика А. В. Лыкова при ВСНТО был создан Комитет по сушке, который возглавлялся им долгие годы. В настоящее время преемником ВСНТО является РосСНИО, а преемником Комитета по сушке – Комитет по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов. В Президиум Комитета входят ученые из различных университетов и НИИ нашей страны и Республики Беларусь. В нем достойно представлены ученые, работающие в аграрном секторе экономики, в том числе в нашем университете. Комитет имеет межотраслевой характер, он консолидирует усилия ученых и инженеров на решение стоящих перед ними задач.

В РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева регулярно проводятся международные научные конференции, семинары, чтения, посвященные памяти выдающихся ученых, работающих

в аграрном секторе производства. Это замечательные акты уважения к ученым, внесшим неоценимый вклад в аграрную науку и практику, в агроинженерию. Отметим, в качестве примера, что в 2018 г. по инициативе все того же Комитета РосСНИО по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов был проведен Международный научно-технический семинар «Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства», посвященный 175-летию со дня рождения К. А. Тимирязева (МНТС ТИМИРЯЗЕВ-2018) – ученого мирового значения, имя которого запечатлено в названии нашего университета; ежегодно проводятся семинары «Чтения академика В. Н. Болтинского» и т. д.

Вопросы, рассматриваемые на данной конференции, имеют большое значение для дальнейшего развития теории и практики сушки, тепловых и массообменных процессов – для интенсификации этих процессов, повышения их энергетической эффективности, ресурсосбережения и качества получаемых продуктов, решения экологических задач.

Желаю организаторам и участникам конференции успешного ее проведения, плодотворного обсуждения рассматриваемых вопросов, нахождения перспективных технологий и конструктивных решений! Молодым участникам конференции желаю успешного старта и дальнейших творческих достижений!

Ректор ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева,
Академик РАН, д.с.-х.н., д.э.н., профессор  В. И. Трухачев

ПРИВЕТСТВЕННОЕ СЛОВО

*Гуляев Юрий Васильевич – Президент Российского Союза
научных и инженерных общественных объединений,
Академик*

**Уважаемые организаторы и участники
Восьмой Международной научно-практической конференции
«Современные энергосберегающие тепловые и массообменные технологии
(сушка, тепловые и массообменные процессы) – СЭТМТ-2023»**

Приветствую вас от имени Российского Союза научных и инженерных общественных объединений на важном для отечественной научно-технической сферы мероприятии.

Эта конференция, ставшая уже ожидаемым событием, объединяет научную общественность для обсуждения и обмена актуальной информацией о достижениях энергосберегающих разработок в области сушки, тепловых и массообменных процессов, связанных с обработкой и переработкой материалов в агропромышленном комплексе и других смежных отраслях, установления и поддержания контактов, активизации взаимодействия между учеными, исследователями, практиками, студенческой молодежью.

Вопросы, обсуждаемые на конференции, имеют большое значение для дальнейшего повышения эффективности технологических процессов и аппаратов, интенсификации технологических процессов, энергоресурсосбережения, автоматизации процессов, экологической и производственной безопасности, качества целевых продуктов, повышения практической применимости результатов научных исследований в данном направлении.

Всех нас объединяет стремление внести свой вклад в устойчивое развитие и процветание нашей страны. Пусть каждый пункт насыщенной программы получит живой отклик у собравшихся коллег, даст импульс для конструктивного обмена научными взглядами и мнениями, привлечет внимание научной общественности к актуальным проблемам в АПК.

Искренне желаю вам творческой и доброжелательной атмосферы, плодотворного и результативного обсуждения всех намеченных вопросов, открытия новых ярких имен и расширения партнерских взаимосвязей.

Президент
Российского Союза научных
и инженерных общественных объединений,
академик

Ю.В. Гуляев

УДК 66.047

Алексей Владимирович Журавлев, проректор по науке и инновационному развитию, доктор технических наук, профессор кафедры процессы и аппараты перерабатывающих производств, a.zhuravlev@rgau-msha.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Россия, г. Москва

Развитие машинных технологий сушки дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя

Аннотация. Обсуждаются результаты многолетних исследований автора в области создания и разработки ресурсосберегающих машинных технологий и высокоэффективных аппаратов с закрученными потоками теплоносителя для сушки дисперсных продуктов. На основе системного подхода проведены комплексные теоретические и экспериментальные исследования, представлены математические модели исследуемых процессов, рассмотрены вопросы оптимизации и управления технологическими параметрами, приведены программно-логические алгоритмы функционирования систем, разработаны рекомендации по научно-практическому обеспечению машинных технологий сушки дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя.

Ключевые слова: сушка, машинные технологии, закрученный поток теплоносителя, дисперсный продукт.

Alexey V. Zhuravlev, Vice-Rector for Science and Innovative Development, Advanced Doctor in Economic Sciences, Professor Processes and devices of processing industries, a.zhuravlev@rgau-msha.ru

Russian Timiryazev State Agrarian University, Russia, Moscow

Development of machine technologies for drying dispersed products in a swirling coolant flow

Abstract. The results of many years of research by the author in the field of creation and development of resource-saving machine technologies and highly efficient devices with swirling coolant flows for drying dispersed products are discussed. Based on a systems approach, comprehensive theoretical and experimental studies were carried out, mathematical models of the processes under study were presented, issues of optimization and control of technological parameters were considered, software and logical algorithms for the functioning of systems were given, recommendations were developed for scientific and practical support of machine technologies for drying dispersed products in swirling coolant flow.

Keywords: drying, machine technologies, swirling coolant flow, dispersed product.

Для обеспечения динамичного устойчивого роста экономики России принципиально важным является переход к инновационному типу ее развития, формированию экономики, основанной на знаниях. Конкурентоспособность России на мировых рынках определяется темпами внедрения новейших научно-технических решений и развития наукоемких производств, эффективностью инновационных процессов. В современном мире широкое использование инноваций в хозяйственной деятельности становится одним из основных источников повышения конкурентоспособности и устойчивого экономического роста.

Инновационное развитие агропромышленного комплекса представляет собой такой тип экономического развития, основным фактором которого становятся инновации как конечный результат инновационной деятельности.

Стратегия развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации ставит задачу обеспечения устойчивого снабжения населения высококачественными продуктами питания в объемах и ассортименте, необходимых для формирования правильного, всесторонне сбалансированного рациона питания на уровне физиологически рекомендуемых норм потребления.



Рисунок 1 – Мировой рейтинг продовольственной безопасности

Пищевая и перерабатывающая промышленность является системообразующей сферой экономики страны, формирующей агропродовольственный рынок, продовольственную и экономическую безопасность. Продовольственная безопасность является составной частью национальной безопасности страны. В России, как и в большинстве стран мира, этот аспект безопасности является важным направлением государственной политики, законодательской деятельности, научных исследований [1].

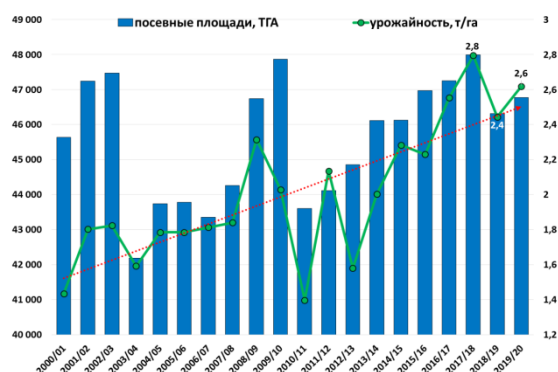


Рисунок 2 – Динамика производства зерна в России

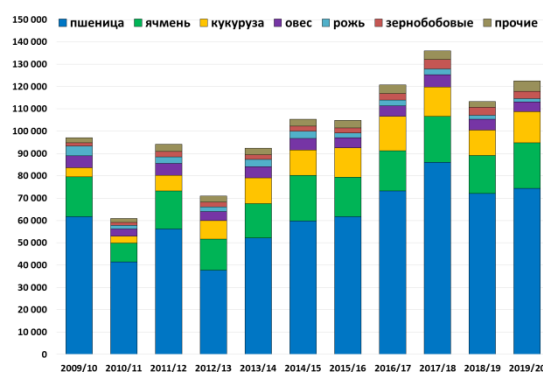


Рисунок 3 – Валовой сбор зерновых РФ в разрезе культур

Одной из важнейших проблем повышения эффективности производства является комплексное использование материальных ресурсов путем совершенствования технологических процессов, внедрения безотходной технологии, расширения переработки вторичных ресурсов и утилизации отходов.

Процесс сушки является основной стадией многих технологических процессов в различных отраслях промышленности, который в значительной степени определяет теплоэнергетические показатели производства и качество готового продукта.

Снижение энергетических затрат на сушку, наряду с повышением интенсивности влагоотдачи рассматривается как важнейшая задача при разработке новой технологии сушки и конструкций сушилок, а также при совершенствовании существующих.

Одним из перспективных направлений создания новой сушильной техники, обеспечивающей, наряду с получением продукта заданного качества, экономное энергопотребление и эффективное улавливание продуктов уноса, является разработка и внедрение в промышленность высокоинтенсивных аппаратов с закрученными потоками теплоносителя. При движении дисперсного материала в таких аппаратах происходит непрерывное взаимодействие частиц друг с другом и со стенкой сушилки, что приводит к увеличению относительной скорости движения взаимодействующих фаз, времени пребывания материала в аппарате, повышению концентрации твердой фазы. Использование закрученных потоков теплоносителя, а также комбинирование их с различными гидродинамическими режимами и СВЧ-энергоподводом позволяет интенсифицировать процесс сушки и расширить область применения сушильных аппаратов. Учитывая это, разработка и развитие ресурсосберегающих машинных технологий сушки дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя требует научного обоснования, совокупности научных положений, представляющих системный концептуальный подход к созданию высокоэффективных ресурсосберегающих машинных технологий сушки дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя, направленных на интенсификацию, сбережение и рациональное использование материальных ресурсов, что достигается моделированием и оптимизацией перспективных конструкций сушильных установок, и представляет как теоретический интерес, так и практическую ценность [2].

Актуальность работы неразрывно связана с положительной динамикой увеличения в России посевных площадей сельскохозяйственных культур, таких как, гречиха, амарант, лен, рапс, рапсостебель и т. п.

При организации машинной технологии переработки семян рапса, гречихи, амаранта, рапсостебеля, льна были проведены глубокие научные исследования, заключающиеся в изучении технологических, структурных, гидродинамических и теплофизических показателей. Технологические и гидродинамические характеристики позволили определить режимные параметры процессов.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований, а также анализа информации в области технологии и техники переработки семян были разработаны и запатентованы способы безотходной переработки семян, а на основе системного и функционального анализа ресурсосберегающих машинных технологий разработаны технологические линии для их осуществления.

Разработаны и экспериментально апробированы: математическая модель динамического изменения полей температуры и влагосодержания в условиях сопряженного теплообмена в процессе сушки сферической частицы амаранта во взвешенно-закрученном слое, позволяющая проводить оценку скорости движения теплоносителя в цилиндрической области сушильного аппарата; математическая модель процесса сушки частицы рапса в аппарате с закрученным потоком теплоносителя и СВЧ-энергоподводом, позволяющая проводить вычислительные эксперименты по определению нестационарных полей влагосодержания, температуры и давления с целью установления их структуры и взаимовлияния; математическая модель распределения полей скоростей теплоносителя и частицы гречихи в цилиндрической сушильной камере, позволяющая вычислить коэффициенты теплообмена от поверхности частицы к теплоносителю; математическая модель процесса сушки в аппарате с закрученным потоком теплоносителя в безразмерном критериальном виде, позволяющая производить инженерные расчеты по прогнозированию кинетики сушки.

С целью повышения эффективности процесса сушки и обеспечения ресурсосбережения разработаны: способ автоматического управления процессом сушки дисперсных мате-

риалов в вихревом режиме, способ автоматического управления процессом сушки полидисперсных материалов во взвешенно-закрученном слое, способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ-энергоподводом, способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов с рециркуляцией теплоносителя в аппаратах с активной гидродинамикой, а также программно-логические алгоритмы функционирования систем, позволяющие обеспечить многоканальное многоуровневое управление и получать готовый продукт высокого качества за счет оптимизации технологических параметров процесса сушки дисперсного материала в закрученном потоке теплоносителя [1, 3].

Применение в совокупности конструкций установок и способа сушки с алгоритмами их управления позволяет получить готовый продукт более высокого качества за счет оптимизации режимных параметров процесса сушки материала во взвешенно-закрученном слое, осуществить многоуровневое управление. Благодаря чему повышается оперативность и надежность управления в наиболее оптимальных диапазонах изменения параметров режима работы сушилки, обеспечить снижение энергетических затрат на единицу массы готового продукта.

Проведена промышленная апробация, которая подтвердила высокую эффективность полученных результатов. Разработанные машинные технологии безотходной переработки дисперсных продуктов (семян рапса, гречихи, амаранта, расторопши, льна) позволяют производить широкий ассортимент готовой продукции, отличающейся высоким качеством.

Библиографический список

1. **Журавлев А. В.** Ресурсосберегающие машинные технологии сушки дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя: монография / Воронеж. гос. ун-т. инж. техн. Воронеж : ВГУИТ, 2022. 405 с.
2. **Антипов С. Т., Прибытков А. В., Журавлев А. В.** Влияние полидисперсности материала на гидродинамику сушильного аппарата с закрученным потоком теплоносителя // Вестник ВГТУ. 2005. № 6. С. 8–13.
3. Комбинированные аппараты с закрученным потоком теплоносителя для сушки дисперсных материалов / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев, Д. А. Нестеров, А. В. Бородкина // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания / НП «ТППП АПК». Воронеж, 2014. № 2. С. 52–59.

УДК 542.47

Станислав Павлович Рудобашта, доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, srudobashta@rgau-msha.ru
Российский государственный аграрный университет – МСХА
имени К. А. Тимирязева, Россия, г. Москва

Современные математические модели для описания кинетики тепло- и массообменных процессов в системах с твердой фазой

Аннотация. Для кинетического расчета аппаратов для систем с твердой фазой в настоящее время применяют три вида моделей: эмпирические (регрессионные), полупэмпирические и теоретические – аналитические и численные, роль последних в последние годы сильно выросла. В работе анализируются теоретические методы кинетического расчета массообменных аппаратов для систем с твердой фазой – как на основе собственных работ, так и работ других авторов. Обсуждаются: зональный метод кинетического расчета массообменных аппаратов и зональный метод определения концентрационной зависимости коэффициента массопроводности (диффузии) из кривой кинетики, математические модели кинетики сушки материалов, подверженных усадке, математические модели, описывающие тепло-массообмен при сушке при электромагнитном подводе энергии (как в осциллирующем, так и в непрерывном режиме), математическая модель массообмена при адсорбции для радиально продуваемого неподвижного цилиндрического слоя адсорбента, короткоцикловая безнагревная адсорбция, новые математические модели экстрагирования, рассматривающие частицу, из которой осуществляется экстрагирование, как бидисперсную структуру.

Ключевые слова: математическое моделирование, массообмен, теплообмен, сушка, адсорбция, экстрагирование.

Stanislav P. Rudobashta, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor
of the Department of Heat Engineering, Hydraulics and Energy Supply
Russian Timiryazev State Agrarian University, Russia, Moscow

Modern mathematical models for describing the kinetics of heat and mass transfer processes in systems with a solid phase

Abstract. For the kinetic calculation of devices for systems with a solid phase, three types of models are currently used: empirical (regression), semi-empirical and theoretical – analytical and numerical, the role of the latter has greatly increased in recent years. The paper analyzes the theoretical methods for the kinetic calculation of mass transfer apparatuses for systems with a solid phase, both on the basis of our own work and the work of other authors. The following topics are discussed: the zonal method for the kinetic calculation of mass transfer apparatuses and the zonal method for determining the concentration dependence of the mass conductivity (diffusion) coefficient from the kinetics curve, mathematical models of the kinetics of drying materials subject to shrinkage, mathematical models describing heat and mass transfer during drying with electromagnetic energy supply (both in oscillating mode and continuous), a mathematical model of mass transfer during adsorption for a radially blown stationary cylindrical adsorbent layer, short cycle heatless adsorption, new mathematical models of extraction considering the particle from which extraction is carried out as a bidisperse structure.

Keywords: *mathematical modeling, mass transfer, heat transfer, drying, adsorption, extraction.*

Введение

В настоящее время широкое распространение получило математическое моделирование массообменных процессов, проводимых в системах с твердой фазой (сушка, адсорбция, экстрагирование). С помощью математического моделирования решаются задачи поиска необходимого аппаратного оформления аппарата или технологического режима, удовлетворяющего поставленным задачам (в пределе – оптимального режима). Целью математического моделирования при кинетическом расчете аппарата является определение его габаритов, обеспечивающих заданную производительность. Он находится по известной формуле

$$V_p = \frac{G_m \tau}{\rho_m (1 - \varepsilon)}, \quad (1)$$

где τ – необходимое время пребывания материала в аппарате, м, которое находят по математической модели.

Для расчета времени τ в настоящее время применяют методы [1]: теоретические (математические), полуэмпирические, эмпирические. Эмпирические методы основаны, как правило, на регрессионных уравнениях. Основной недостаток которых – полное игнорирование физики процесса, что затрудняет переход от результатов лабораторных исследований к промышленным объектам и порождает проблему масштабного перехода [2]. Однако, эти методы, несмотря на прогресс в теории тепло- и массопереноса, по-прежнему продолжают применяться (см., например, [3]). К полуэмпирическим методам относят методы, базирующиеся на фундаментальных уравнениях тепло- и массопереноса, но в которых в целях развязывания трудных мест математического описания применяют те или иные упрощения. Примером такой работы может служить [4].

В настоящее время общее развитие теории тепломассопереноса, повсеместное распространение персональных компьютеров, накопление данных по теплофизическим характеристикам материалов обусловили возможность при менения на практике теоретических методов, основанных на использовании решений (как численных, так и аналитических) дифференциальных уравнений тепло- и массопроводности.

Цель данной работы – рассмотреть современные математические модели для описания кинетики тепло- и массообменных процессов в системах с твердой фазой.

Материалы и методы. Для выполнения этой цели рассмотрим работы, выполненные по развитию теоретических методов в последние годы.

Математическое моделирование кинетики сушки на основе теоретических моделей. В настоящее время для расчета кинетики сушки на основе теоретических моделей применяют как аналитические, так и численные методы, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Достоинством первых является их прозрачность для анализа процесса, кроме того, при их применении в кинетическом расчете не требуется «прогонять» расчет через весь временной интервал изменения целевой функции в процессе, как при численном расчете. Достоинством численных методов является возможность решения с их помощью нелинейных задач массо- и теплопроводности и задач для тел со сложной геометрией, для которых аналитические методы во многих случаях отсутствуют. Необходимо отметить, что применение зонального метода, который впервые был описан автором с сотрудниками в 1975 г. [5], позволяет учесть изменение коэффициента массопроводности (диффузии) и других параметров в ходе процесса и с успехом применять аналитические решения задач массо- и теплопроводности для инженерных расчетов, учитывая изменение теплофизических характеристик в ходе процесса. Этот метод хорошо

зарекомендовал себя в инженерной практике при расчете сушильных аппаратов разного типа, примеры этих расчетов приведены в [6, 7]. Аналитические методы расчета кинетики конвективной сушки и термической обработки дисперсных материалов в аппаратах активного гидродинамического режима с успехом применяются также С. В. Федосовым, начиная с 1987 г. [8, 9].

Важно отметить, что расчеты кинетики теоретическими методами осуществляются с использованием только справочных данных по теплофизическим характеристикам. Отсутствие эмпирических коэффициентов и необходимости в их экспериментальном определении непосредственно перед проектированием аппарата является большим преимуществом теоретических методов кинетического расчета по сравнению с полуэмпирическими и эмпирическими методами. Необходимым условием для их применения является наличие данных по теплофизическим характеристикам материалов, которые, к сожалению, не всегда имеются. В настоящее время в большей мере накоплены данные по тепловым характеристикам материалов (коэффициентам теплоемкости, теплопроводности, температуропроводности, по плотности), массопереносные характеристики (в первую очередь, коэффициент массопроводности – диффузии) исследованы в значительно меньшей степени. Примером справочного пособия по теплофизическим свойствам влажных материалов может служить работа [10]. Что касается коэффициента массопроводности (диффузии), то данные по этому коэффициенту более ограничены из-за трудностей в его экспериментальном определении – из-за значительной его зависимости от концентрации. Огромным прорывом в решении задачи определения концентрационной зависимости этого коэффициента явился предложенный в 1975 г. зональный метод определения этого коэффициента из кривой кинетики [см. 6].

Аналитические методы основаны на применении для кинетического сушки решений дифференциальных уравнений массо-и теплопроводности, записываемых для единичных тел (частиц), составляющих твердую фазу в массообменном аппарате – уравнений А. В. Лыкова. Эти уравнения в линейной постановке имеют вид [11]

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = k \Delta u + k_t \Delta t + k_\phi \Delta P, \quad (2)$$

$$c \rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \Delta t + r^* \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (3)$$

где Δ – оператор Лапласа: $r^* \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau}$ – действующий в данной точке частицы сток теплоты, вызванный испарением влаги, Вт/м³.

Второе и третье слагаемое правой части уравнения (2) описывают соответственно термодиффузию (термовлагопроводность) и фильтрационный перенос влаги, которые проявляются при высоких температурах, ими в большинстве случаев в расчетах пренебрегают. При применении для кинетического расчета аналитических методов используют линеаризованные уравнения (2), (3), в которых принимают $k, c, \lambda = \text{const}$ и, кроме того, считают, что испарение влаги происходит у поверхности тела (внутренние фазовые превращения отсутствуют). Это позволяет применять для кинетического расчета сушилок в совокупности с уравнениями материального и теплового баланса аппарата известные аналитические решения задач массо-и теплопроводности (их применение рассмотрено в [6, 7]).

В последнее время значительное внимание в литературе уделяется электромагнитным способам сушки (инфракрасная сушка, сушка токами сверхвысокой и высокой частоты – ИК-сушка, СВЧ-сушка, ТВЧ-сушка). Для обеспечения сохранности свойств высушиваемых электромагнитным способом материалов применяют, как правило, осциллирующий

(прерывистый) нагрев. Нами были развиты аналитические математические модели нагрева материалов разной формы (пластина, цилиндр, шар), учитывающие сток теплоты на испарение влаги и конвективный тепло- и массообмен поверхности тела с внешней газовой средой [12–14]. Прерывистость режима задавалась с помощью единичной функции Хевисайда. Было показано, что с помощью полученных решений можно, в частности, с успехом моделировать процесс осциллирующей инфракрасной сушки семян овощных культур, проводимый в условиях, когда их температура колеблется в интервале от $t_{\min} = 34\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $t_{\max} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, при котором имеет место значительная стимуляция семян (увеличение их энергии прорастания и всхожести) [15]. Для условий сушки были получены также аналитические решения задач теплопроводности для тел разной формы при непрерывном электромагнитном энергоподводе – с учетом испарения влаги и конвективном тепло-и массообмене этих тел с внешней газовой средой. Расчетами было показано, что сохранность материалов при электромагнитно-конвективной сушке с непрерывным электромагнитным энергоподводом можно также обеспечить за счет правильного задания температуры сушильного агента [16–18].

Сушка ряда коллоидных капиллярно-пористых материалов (например, нарезанных на дольки фруктов и овощей) сопровождается их усадкой, которая требует учета изменения размера частиц в ходе процесса при их математическом моделировании теоретическим методом. Усадка в математической модели проявляется двояко: во-первых изменяются геометрические размеры тела, во-вторых, появляется перенос влаги матрицей материала, который накладывается на массопроводность. Второй эффект для пластины может быть учтен записью уравнения переноса для поперечного сечения пластины с координатой x уравнением

$$i(\tau) = -k \rho_0 \frac{\partial u}{\partial x} + v_x \rho_0 u_x, \quad (4)$$

в котором v_x – скорость переноса влаги матрицей материала в сечении с координатой x (начало координат помещено в середину пластины). Скорость v_x может быть представлена в виде

$$v_x = \frac{dR}{d\tau} \frac{x}{R} = v_R \frac{x}{R}, \quad (5)$$

где v_R – скорость перемещения сечения с координатой x .

Величина $v_R = \frac{dR}{d\tau} < 0$ в (5) выражает скорость усадки половины толщины высушиваемой пластины, а множитель x/R – корректирует ее на сечение с координатой x ; u_x – локальное влагосодержание пластины в плоскости с координатой x . Согласно (5) максимальную скорость перемещения имеет поверхность пластины, а скорость перемещения ее центральной плоскости равна нулю.

Уравнению (5) соответствует дифференциальное уравнение конвективной диффузии (массопроводности)

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial u}{\partial x} = k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad 0 < x < R, \quad \tau > 0, \quad (6)$$

Было получено аналитическое решение уравнения (6) при граничном условии массообмена третьего рода, которое позволяет учитывать как уменьшение размера (толщины) тела, так и транспорт влаги матрицей материала [19]. Показано, что при расчете кинетики сушки материалов, имеющих значительную усадку, по решению уравнения (6), нужно, в общем случае, учитывать как уменьшение толщины материала, так и транспорт влаги матрицей материала, тормозящего процесс ее удаления.

Независимо от этого на основе численного решения нелинейного дифференциального уравнения массопроводности для пластины, т. е. при $k = f(u)$, было получено также чис-

ленное решение задачи массопроводности, на основе которого был выполнен анализ кинетики сушки пластины из яблока, показавший, что роль процесса усадки, учитываемого в предложенной математической модели конвективной сушки, весьма существенна. При этом вклад конвективного члена уравнения (4) в рассмотренном случае мал по сравнению с тем эффектом, который дает собственно усадка материала. Нами получены экспериментальные данные по линейной усадке плодоовощной продукции (яблоко, морковь, свекла), которые позволяют применять теоретическую математическую модель кинетики их сушки с учетом усадки.

Математическое моделирование кинетики и динамики адсорбции на основе теоретических моделей. Особенностью процесса адсорбции является то, что в этом процессе адсорбент используется многократно и стадии адсорбции и десорбции чередуются. На практике применяют, в основном, схемы с неподвижным слоем адсорбента, т.к. они обеспечивают наибольшую сохранность адсорбента, тогда как схемы с движущимся адсорбентом вызывают его истирание. Как правило, применяют слои с аксиально продуваемым слоем, недостатком которых при большой высоте слоя является значительное гидравлическое сопротивление слоя. Этих недостатков лишены слои с радиально продуваемым слоем, в которых толщина слоя адсорбента может быть выбрана независимо от расхода газа. В литературе приводятся математические модели применительно к аксиально продуваемым слоям. Нами в [20] получена математическая модель, описывающая кинетику и динамику адсорбции газа в радиально продуваемом слое.

Описание массообмена при адсорбции газов осуществляют, как правило, выражая движущую силу процесса по газовой фазе, что более целесообразно с практической точки зрения. В [6] показано, что альтернативно этот процесс может быть описан с использованием уравнения массопроводности, что дает однотипное описание процессов сушки и адсорбции.

Последнее время в литературе по адсорбции большое внимание уделяется так называемой короткоцикловой безнагревной адсорбции – КБА. Суть КБА состоит в том, что десорбция сорбированного вещества из адсорбента в адсорбере осуществляется не за счет его нагрева, а за счет сброса давления в аппарате. Это дает определенные преимущества в проведении процесса. Математическому моделированию этого процесса посвящена работа [21].

Математическое моделирование кинетики экстрагирования. Экстрагирование из твердой фазы широко используется при получении ценных компонентов из растительного сырья [22]. Классическими работами по математическому моделированию процесса экстрагирования из твердой фазы на основе теоретических моделей являются работы Аксельруда [23] и Белоногова [24], которые независимо друг от друга получили аналитические решения для замкнутого процесса экстрагирования и непрерывного процесса для случаев прямотока и противотока в условиях идеального вытеснения фаз. Эти решения получены с учетом изменения концентрации внешней фазы в ходе процесса на основе уравнений материального баланса аппарата – для частиц твердой фазы в форме пластины, цилиндра и шара при условии, что стенки пор материала, из которого осуществляется экстрагирование, не обладают сорбирующей способностью.

В [25–27] нами получены аналитические решения для полунепрерывного процесса экстрагирования: периодического по твердой фазе и непрерывного – по жидкой, также для тел твердой фазы в виде пластины [25], цилиндра [26] и шара [27]. На их основе выполнен численный анализ процесса, иллюстрирующий влияние относительного расхода жидкости (по отношению к единице массы твердой фазы) через аппарат на кинетику процесса. Разработанные модели могут быть использованы, в частности, для анализа процесса промывки тканей и волокон в текстильной промышленности и гранул полимеров при производстве пластмасс.

Математические модели, приведенные в [23–27], получены на основе аналитических решений линейных задач диффузии, предполагающих постоянство коэффициента диффузии. При необходимости учесть изменение коэффициента диффузии распределяемого веще-

ства в материале твердой фазы в ходе процесса может быть использован указанный выше зональный метод кинетического расчета – на основе решений задач диффузии при постоянных значениях концентрации распределяемого вещества в зонах, приведенных в [6], и при ступенчатом учете изменения этих концентраций при переходе от зоны к зоне.

Отметим, что представленные выше математические модели предполагают капиллярно-пористую структуру частиц твердой фазы, что позволило рассматривать внутренний перенос распределяемого вещества как его диффузию по системе взаимосвязанных пор.

В [28] отмечается, что в экстракционных аппаратах для систем с твердой фазой с интенсивным гидродинамическим режимом изменяется механизм переноса вещества в пористых частицах: в крупных порах инициируется конвективный (фильтрационный) механизм массопереноса, тогда как в тонких порах, объем которых многократно превышает объем крупных пор, массоперенос осуществляется по-прежнему молекулярной диффузией. Эту модель в [28] называют «математической моделью с бидисперсной структурой», а в [29] – «диффузионно-конвективной моделью».

В [28] общая схема частицы твердого вещества, подвергаемого экстрагированию, представлена двумерной плоской моделью, в которой присутствуют две области: 1) пористый блок – область тонких плоских пор, в которых происходит молекулярная диффузия распределяемого вещества вдоль координаты «у» к крупным транспортным порам; 2) плоские транспортные каналы, по которым распределяемое вещество, поступившее из тонких пор, путем конвективной диффузии перемещается вдоль координаты «х» к поверхности частицы. Перенос распределяемого вещества в транспортном канале описан дифференциальным уравнением конвективной диффузии. Разработанная модель с бидисперсной структурой была использована в [28] для численного моделирования процесса экстрагирования.

В диффузионно-конвективной модели авторы, согласно [29], различают три стадии процесса: 1) проникновение экстрагента внутрь пористой частицы (гидравлическая стадия); 2) диффузию целевого компонента из капиллярных пор в транспортные поры и далее по ним к поверхности раздела фаз (диффузионно-конвективная стадия); 3) диффузионную стадию, скорость процесса на которой контролируется молекулярной диффузией целевого компонента из глубины пористой частицы к транспортным порам. В этой модели расчет кинетики процесса основан на определении длительностей отдельных стадий процесса. Расчет по этой модели вызывает большие сложности, так как необходимо задавать длину и толщину капилляров, площадь поверхности пор.

Для описания кинетики массообмена в системах с твердой фазой необходим коэффициент массопроводности (эффективный коэффициент диффузии). Его зависимость от концентрации распределяемого вещества в твердом теле и отсутствие миниатюрных датчиков для определения локальных концентраций вызывало большие трудности в его определении. Предложенный в [30] зональный метод определения концентрационной зависимости коэффициента массопроводности из экспериментальной кривой кинетики процесса существенно упростил ситуацию. В настоящее время этим методом получены данные по коэффициентам массопроводности для большого количества материалов в рассматриваемых процессах [6, 7].

Выводы

1. В настоящее время для описания кинетики массообменных процессов в системах с твердой фазой используются три вида математических моделей: теоретические, полуэмпирические, эмпирические.

2. Роль теоретических моделей неуклонно возрастает, что объясняется общим развитием теории, повсеместным распространением персональных компьютеров, накоплением данных по теплофизическим характеристикам материалов и, в первую очередь, по основному коэффициенту внутреннего массопереноса – коэффициенту массопроводности (диффузии).

3. Большое значение для практики имеют зональный метод расчета кинетики массообмена в системах с твердой фазой и зональный метод определения концентрационной зависимости коэффициента массопроводности (диффузии). Первый из них универсален и позволяет учесть изменение теплофизических характеристик в ходе процесса. Второй дает возможность определять концентрационную зависимость коэффициента массопроводности (диффузии) из кривой кинетики, что чрезвычайно упрощает эксперимент.

4. В настоящее время накоплена определенная база данных по коэффициенту массопроводности (диффузии), что позволяет реализовывать теоретические методы расчета кинетики массообменных процессов в системах с твердой фазой на практике.

5. Математическое описание кинетики тепло- и массообмена в системах с твердой фазой непрерывно пополняется новыми моделями, что расширяет область применения теоретических моделей.

Обозначения: c – удельная массовая теплоемкость материала, Дж/(кг К); G_m – расход твердой фазы через сушилку, кг/с; i – плотность потока влаги, кг/(м² с); k – коэффициент массопроводности, м²/с; k_t – коэффициент термовлагопроводности (термодиффузии), [(кг/(м² с))/[кг/м³(К/м)]]; k_ϕ – коэффициент фильтрационного массопереноса (под действием градиента общего давления), [(кг/(м² с))/(Па/м)]; P – общее давление в материале, Па; R – половина толщины пластины, м; r^* – теплота парообразования, Дж/кг; t – температура, °С; u – влагосодержание материала, кг/(кг сух. материала); V_p – рабочий объем аппарата, м³; ε – доля объема аппарата, не занятая твердой фазой (порозность), м³/м³; x – декартова координата, м; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м К); ρ – плотность материала, кг/м³; τ – время, с; v – скорость перемещения сечения материала, м/с.

Индексы: м – материал; т – термовлагопроводность; ϕ – фильтрационный перенос; 0 – абсолютно сухой материал.

Библиографический список

1. Рудобашта С.П. Математическое моделирование процесса конвективной сушки дисперсных материалов // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2000. № 4. С. 98–108.
2. Масштабный переход в химической технологии. Разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования / Под ред. Розена А.М. М. : Химия, 1980. 319 с.
3. Оболенский Н. В., Мустафин Ш. Х., Данилов Д. Ю. Обеспечение кондиционной влажности зерна в фермерских хозяйствах путём создания кассетного устройства для его сушки. Княгино : Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, 2012. 135 с.
4. Совершенствование технологии сушки зерна в плотном слое с использованием электротехнологий, АСУ и моделирования процесса / А. Н. Васильев, Д. А. Будников, Н. Н. Грачёва, О. В. Северинов. М. : 2016. 176 с.
5. Рудобашта С. П., Очнев Э. Н., Плановский А. Н. Зональный метод расчета кинетики процесса сушки // Теоретические основы химических технологий. 1975. Т. IX. № 2. С. 185–192.
6. Рудобашта С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / Под ред. А. Н. Плановского. М. : Химия. 1980. 280 с.
7. Рудобашта С. П., Карташов Э. М. Химическая технология: диффузионные процессы. Часть 2. 3-е издание. М. : Юрайт. 2018. 296 с.
8. Федосов С. В. Процессы термической обработки дисперсных материалов с фазовыми и химическими превращениями: дис. ... доктора техн. наук : 05.17.08 / Федосов Сергей Викторович. Л. : ЛТИ им. Ленсовета. 1987.
9. Федосов С. В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново : ИПК «ПрессСтоп», 2010. 364 с.
10. Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов. Справочное пособие / Под. ред. А. С. Гинзбурга. М. : Пищевая промышленность. 1975. 224 с.

11. **Лыков А. В.** Теория сушки. 2-е изд., перер. и доп. М. : Энергия. 1968. 472 с.
12. **Рудобашта С. П., Карташов Э. М., Зуев Н. А.** Тепломассоперенос при сушке в осциллирующем электромагнитном поле // Теоретические основы химических технологий. 2011. Т. 45, № 6. С. 641–647.
13. **Rudobashta S. P., Zueva G. A., Kartashov E. M.** Heat and mass transfer when drying a spherical particle in an oscillating electromagnetic field // Theor. Found. Chem. Eng. 2016. V. 50. Issue 5. p. 718.
14. **Rudobashta S. P., Zueva G. A., Kartashov E. M.** Heat and mass transfer in the drying of a cylindrical body in an oscillating electromagnetic field // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2018. V. 91. No 1. January. p. 227.
15. **Рудобашта С. П., Григорьев И. В.** Импульсная инфракрасная сушка семян // Промышленная теплотехника. 2011. Т. 33, № 8. С. 85–90.
16. **Рудобашта С. П., Карташов Э. М., Зуева Г. А.** Тепломассоперенос при сушке пластины в непрерывно действующем электромагнитном поле высокой и сверхвысокой частоты // Теоретические основы химических технологий. 2021. Т. 55, № 2. С. 1–9.
17. **Rudobashta S.P., Kartashov E.M., Zueva G.A.** Infrared drying of a plate in a continuous electromagnetic field // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2022. Vol. 95. № 2, March. pp. 357–365.
18. **Rudobashta S. P., Kartashov E. M., Zueva G. A.** Heat and Mass transfer in the Drying of a cylindrical Body in a Continuous Electromagnetic Field of High and Superhigh Frequency // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2022. Vol. 56, No. 5. pp. 810–218.
19. **Rudobashta S. P., Kartashov E. M., Zueva G. A.** Mathematical modeling of the process of convective drying of materials taking into account their shrinkage // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2020. Vol. 93, № 6, November, pp. 1394–1401.
20. **Рудобашта С. П., Дмитриев В. М., Карташов Э. М.** Тепломассообмен в аппарате с кольцевым стационарным слоем зернистого материала // Теоретические основы химических технологий. 2002. Т. 36. № 5. С. 456–460.
21. **Акулинин Е. И.** Методология исследования и проектирования ресурсосберегающих циклических адсорбционных процессов и установок разделения газовых смесей: дис. ... доктора техн. наук : 05.17.08 / Акулин Евгений Игоревич. Тамбов, 2022. 396 с.
22. **Рудобашта С. П., Казуб В. Т.** Электроразрядное экстрагирование. М. : ИКЦ «Колос-с». 2022. 261 с.
23. **Аксельруд Г. А.** Массообмен в системе твердое тело – жидкость. Львов : Изд. Львовского университета, 1970. 188 с.
24. **Белоногов К. Н.** В кн.: Физико-химические основы процессов фибрования и выщелачивания в производстве фибры. Л. : Госхимиздат, 1958. С. 105–144.
25. **Rudobashta S. P., Kosheleva M. K., Kartashov E. M.** Mathematical Modeling of the Extraction of the Target Component from Plate-Shaped Bodies in a Semicontinuous Process // Theor. Found. of Chem. Eng.. 2018., 52(1), 50–56.
26. **Рудобашта С.П., Кошелева М.К., Карташов Э.М.** Математическое моделирование экстрагирования целевого компонента из тел цилиндрической формы в полунепрерывном процессе // Инж.- физ. журнал. 2016. Т. 89. № 3. С. 595–602.
27. **Rudobashta S. P., Kosheleva M. K., Kartashov E. M.** Modeling of the extraction of a target component from bodies of spherical shape in a semicontinuous process // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. Vol. 90, No. 4, July, 2017. pp.797–805.
28. **Абиев Р. Ш., Островский Г. М.** Моделирование процесса экстрагирования из капиллярно-пористой частицы с бидисперсной структурой // Теоретические основы химической технологии. 2001. Т. 35, № 3. С. 270–275.
29. **Иванов Е. В., Бабенко Ю. И.** Элементарные модели экстрагирования из пористых частиц под действием импульсов давления // Журнал прикладной химии. 2005. Т.78, № 9. С. 1487–1492.
30. Зональный метод определения зависимости коэффициента массопроводности от концентрации / Э. Н. Очнев, С. П. Рудобашта, А. Н. Плановский, В. М. Дмитриев // Теоретические основы химической технологии. 1975. Т. IX. № 4. С. 491–495.

УДК 536.24/691

Сергей Викторович Федосов, академик РААСН, доктор технических наук,
профессор кафедры «Технология и организация строительного производства»
FedosovSV@mgsu.ru

Национальный исследовательский московский государственный строительный
университет», Россия, г. Москва

**Теория тепломассопереноса как вектор решения проблем стратегии
и тактики развития строительных наук**

***Аннотация.** В данной научной статье рассматривается современное состояние и вопросы совершенствования методологии математического моделирования процессов тепломассопереноса в строительных технологиях. Особое внимание уделяется не только стадии стационарного производства в заводских установках изготовления элементов строительных конструкций, но и непосредственно на строительной площадке. В статье рассматривается новое научно-техническое направление, связанное с производством строительных изделий и конструкций, а также сборкой крупногабаритного элемента конструкции – единичной квартиры с полностью установленным вспомогательным оборудованием, включая санитарно-техническое и энергетическое оборудование. После сборки, крупномодульный узел транспортируется на стройплощадку и монтируется непосредственно в строящемся здании или сооружении. Цель данной статьи заключается в исследовании и разработке математических моделей, которые позволяют оптимизировать процессы тепломассопереноса в строительных технологиях на различных этапах производства и монтажа. Полученные результаты и выводы будут иметь важное значение для совершенствования строительных методов и повышения эффективности производства в строительной отрасли.*

***Ключевые слова:** строительное производство, материал, конструкция, тепломассоперенос.*

Sergey V. Fedosov, Academician of the RAASN, Advanced Doctor in Engineering Sciences,
Professor of the Department Technology and Organization of Construction Production
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia, Moscow

**The theory of heat and mass transfer as a vector for solving the problems of strategy
and tactics in the development of building sciences**

***Abstract.** This scientific article examines the current state and issues of improving the methodology of mathematical modeling of heat and mass transfer processes in construction technologies. Special attention is given not only to the stage of stationary production in factory facilities for manufacturing building elements, but also directly on the construction site. The article discusses a new scientific and technical direction related to the production of building products and structures, as well as the assembly of large-scale structural elements, such as individual apartments with fully installed auxiliary equipment, including sanitary and energy equipment. After assembly, the large-module unit is transported to the construction site and installed directly in the building or structure under construction. The aim of this article is to investigate and develop mathematical models that will optimize heat and mass transfer processes in construction technologies at various stages of production and installation. The obtained results and conclusions will be of great importance for*

improving construction methods and enhancing production efficiency in the construction industry.

Keywords: *civil engineering, material, construction, heat and mass transfer.*

Введение

Вопросы безопасности окружающей среды для человека, как в бытовом, так и в общественном и производственном аспектах, определяются условиями безопасности, которые являются первоочередными [1]. В этом контексте, приоритетными направлениями остаются следующие:

- Защита жизни и здоровья людей всех возрастных групп, от младенчества до пожилого возраста.
- Проблемы, связанные с защитой имущества физических и/или юридических лиц.
- Обеспечение энергетической эффективности зданий и сооружений.
- Особое внимание уделяется повышению комфортности условий проживания людей.

В своем «Послании Президента России Федеральному Собранию» 21-го февраля текущего года, Президент России объявил о «наращивании масштабной программы социально-экономического восстановления и развития новых субъектов Российской Федерации». Это включает в себя строительство новых дорог и мостов, восстановление разрушенных жилых домов и промышленных предприятий.

В историческом и традиционном контексте, развитие строительных технологий развивается по двум основным направлениям:

- 1) Производство строительных материалов, изделий и элементов конструкций зданий и сооружений на стационарных заводских производствах [2, 3, 6–8].
- 2) Возведение зданий и сооружений прямо на строительной площадке [4, 5].

Несмотря на видимое различие в технологических операциях на строительной площадке и в заводских условиях, нельзя не согласиться с фактом, что все технологические процессы в строительной промышленности основаны на аналогии процессов переноса импульса, тепла и массы вещества, известной как «тройная аналогия Рейнольдса» в специальной литературе [10, 11]. Явления переноса импульса, тепла и массы вещества описываются аналогичными дифференциальными уравнениями в частных производных с математической точки зрения.

Основная часть

На рисунке 1 представлена типовая заводская камера для тепловлажностной обработки (ТВО) железобетонных изделий [12, 13]. Эта камера является классическим примером для производства строительных конструкций и изделий из железобетона.

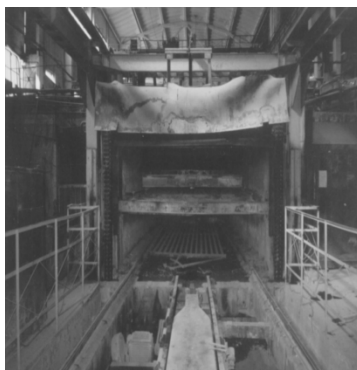


Рисунок 1 – Камера тепловлажностной обработки изделий

Рисунок 2 иллюстрирует кинетику изменения температуры в камере ТВО, а также динамику температурных полей в толще железобетонной плиты, которая проходит тепловлажностную обработку в данной камере.

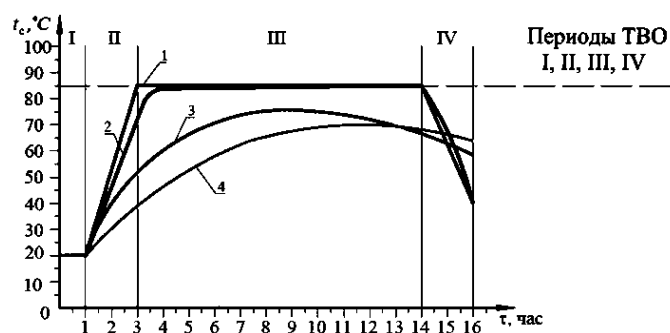


Рисунок 2 – Кинетика развития температур в камере ТВО

Следует отметить, что в практически всех учебных и нормативных источниках литературы методика расчета теплоэнергетических показателей работы камер основывается на представлении о процессе, который представляет собой непрерывную последовательность этапов:

- предварительная выдержка – I – $\tau_{пв}$;
- подъем температуры – II – $\tau_{пт}$;
- изотермическая выдержка – III – $\tau_{ив}$;
- снижение температуры – IV – $\tau_{ст}$.

Очевидно, что теплофизические характеристики материала, подвергаемого ТВО, значительно влияют на кинетику тепловых процессов (изменение температуры материала в произвольной точке пространства во времени) и на динамику (изменение профилей температур по координатам изделия).

На рисунке 3 представлена производственная схема организации тепловой обработки железобетонной конструкции с использованием системы греющих проводов.

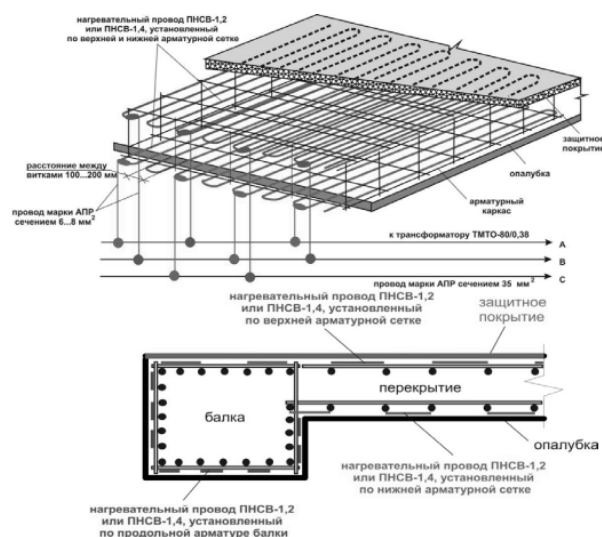


Рисунок 3 – Принципиальная схема раскладки нагревательного провода при прогреве балок перекрытий

Как в случае заводской технологии, так и на строительной площадке, основной целью процесса тепловлажностной обработки (ТВО) является ускорение гидратации минералов це-

ментного вяжущего, формирование структуры цементной матрицы и получение бетона (железобетонных изделий) с требуемыми показателями прочности и долговечности. Исторически и методологически сложилось, что исследование технологических особенностей производства строительных материалов и изучение их свойств проводилось в лабораторных условиях. Результаты испытаний подвергались обработке и изучению, а затем проверялись в производственных условиях. Строительство промышленных и общественных зданий и сооружений из древесины [14], природного [15] и искусственного [16] камня, а также изделий из бетона и железобетона [17], а также использование материалов, являющихся вторичными ресурсами предприятий энергетики [18] и сельского хозяйства [19, 20] стали объектом изучения.

В настоящее время бетон и железобетон остаются основными строительными материалами, используемыми для возведения большинства промышленных и гражданских зданий. Проблемы, связанные с обеспечением жильем, по-прежнему являются приоритетными в государственной политике. Естественно, необходимость увеличения объемов строительства стимулирует поиск способов интенсификации технологий как в производстве строительных материалов и изделий на заводах, так и в процессе строительства на месте возведения здания.

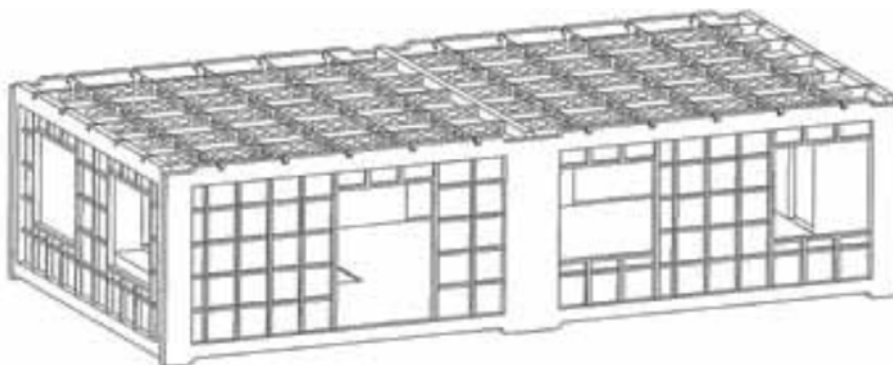


Рисунок 4 – Общий вид мобильного крупногабаритного модуля в сборе (элементы теплоизоляции, перегородки и сантехкабины условно не показаны)



Рисунок 5 – Регулярная зона двухслойной конструктивно-силовой схемы монолитной стены сборного мобильного крупногабаритного модуля

Известно, что скорость гидратации практически всех компонентов цементного вяжущего [21] увеличивается с повышением температуры в соответствии с уравнением Аррениуса, описывающим зависимость константы скорости химической реакции от температуры.

$$K = Ae^{\frac{-E}{RT}}. \quad (1)$$

В данном случае, K представляет собой константу скорости химической реакции, выраженную в $(1/c)$. A является предэкспоненциальным множителем, коэффициентом, отражающим количество химических взаимодействий в единицу времени, также выраженным в $(1/c)$. E представляет собой энергию активации химической реакции, измеряемую в джоулях (Дж).

В процессе технологического формирования бетонной смеси, залитой в форму, происходят последовательные стадии эволюционных преобразований, в результате которых наблюдаются изменения как в теплофизических характеристиках (таких как плотность, теплоемкость, теплопроводность), так и в механических свойствах (например, коэффициент Пуассона, модуль упругости Юнга и другие).

Таким образом, можно утверждать, что процессы формирования структуры в бетоне из вязких бетонных смесей, с точки зрения их реологических свойств, происходят в условиях нестационарности, при непрерывно изменяющейся температуре, даже без внешнего теплового воздействия. Это происходит из-за внутренних источников тепла, связанных с химическими реакциями гидратации компонентов цементного связующего вещества. Разумно предположить, что возникающие градиенты температуры способствуют дополнительным массовым потокам влаги через толщу изделия (конструкции). Этот поток называется термодиффузионным.

С учетом указанных обстоятельств можно предположить, что процессы теплового и влагопереноса в твердеющих бетонных изделиях могут быть описаны следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right) \rho_0 c_q = \nabla (\lambda \nabla t) + \varepsilon r^* c_m \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} = \nabla (k \nabla u) + \nabla (k \delta_q \nabla t) + \nabla (k \delta_q \nabla p) \\ \frac{\partial p}{\partial \tau} = \nabla (k_q \nabla p) - \varepsilon \frac{c_m}{c_q} \frac{\partial u}{\partial \tau} \end{cases} \quad (2)$$

Выражения, обозначенные (2), представляют собой систему взаимосвязанных дифференциальных уравнений, которые описывают нестационарные процессы переноса теплоты и массы (влаги) в твердом теле с использованием явлений теплопроводности, λ , массо- (влаго-) проводности, k , термодиффузии, δ_q , и баропереноса, δ_p .

Методы и проблемы тепловой обработки бетона и железобетонных изделий

В функционирующих предприятиях, занимающихся производством бетонных и железобетонных изделий, широко применяются различные методы тепловой обработки изделий. Это делается с целью сокращения времени твердения бетонной смеси, увеличения производительности технологического процесса и оборудования. Такая практика особенно полезна в случае, когда предприятие имеет большой ассортимент разнообразных изделий из сборного железобетона. В процессе применения тепловой обработки важнейший показатель бетона его предел прочности при сжатии – $R_{сж}$ – уже через сутки достигает значений не ниже 70% от нормированной прочности. В производстве бетонных и железобетонных изделий на предприятиях широко применяются различные методы тепловой обработки с целью ускорения процесса твердения бетонной смеси. При естественных температурных условиях достижение аналогичной прочности может занять до 10–11 суток после укладки бетона в формы. Однако, использование тепловой обработки позволяет достичь требуемой прочности значительно быстрее, что приводит к повышению производительности и технико-экономических показателей технологического процесса. Кроме того, такой подход обычно приводит к другим положительным результатам, таким как увеличение механической прочности бетона, его водостойкости, стабильности характеристик со временем, а также снижение потребности в производственных площадях по сравнению с естественным твердением.

Тепловая обработка обычно начинается с предварительного разогрева готовой бетонной смеси или начальных компонентов до температур в диапазоне 50...80 °С. Этот этап является стадией предварительного разогрева. Затем следует стадия изотермической выдержки, во время которой изделие подвергается выдержке и твердеет в течение определенного времени. После этого происходит постепенное охлаждение внутреннего пространства камеры до температуры, при которой можно провести распалубку.

Одним из наиболее распространенных методов тепловой обработки железобетонных изделий является тепловлажностная обработка водяным паром (ТВО) в пропарочных камерах, как показано на рисунке 1 [19, 20]. В этом процессе опалубка, заполненная бетонной смесью, постепенно перемещается вдоль камеры. В камеру подается насыщенный водяной пар, и необходимое давление и температура поддерживаются в течение определенного времени. После завершения процесса ТВО изделие охлаждается и выводится из камеры, а затем освобождается от опалубки. В данном случае стадии предварительного разогрева и изотермической выдержки выполняются в одном устройстве – пропарочной камере. Однако, недостатком этой технологии являются большие размеры пропарочной камеры (до 100 м в длину, до 10 м в поперечном сечении). Более компактным вариантом является установка для ТВО в кассетно-конвейерной технологии производства железобетонных изделий [21]. Благодаря тому, что формы с изделиями собираются в пакет и располагаются вертикально практически плотно друг к другу, удается сократить размеры установки. В рамках кассетно-конвейерной технологии обработки железобетонных изделий, большое количество изделий может быть обработано в одной камере при практически одинаковых условиях нагрева. Эта технология обеспечивает высокую производительность на этапе предварительного разогрева бетонной смеси перед ее заливкой в формы. Для этого этапа может быть использован паровой [22] или электрический [23] нагрев в бункере. В то же время, в пропарочной камере осуществляются только стадии изотермической выдержки и охлаждения. В результате, кассетно-конвейерная технология характеризуется более эффективным использованием пара и его энергии в пересчете на один кубический метр готового изделия.

Одним из основных преимуществ тепловлажностной обработки (ТВО) железобетонных изделий является сохранение влаги в бетонной смеси в процессе обработки. Это объясняется тем, что в процессе ТВО водяной пар отдает тепло изделию, конденсируясь на его открытых боковых поверхностях.

На рисунке 2 представлен график изменения температуры пара и изделия в различных точках пространства.

Одним из основных и значительных недостатков тепловлажностной обработки (ТВО) является низкая эффективность использования энергии пара. В случае обычного бетона, он поглощает только 8...12 % этой энергии, а для ячеистых бетонов с низкой теплопроводностью этот показатель не превышает 5 % [24, 25]. В процессе ТВО, теплота конденсирующегося насыщенного пара передается поверхности изделия и затем распространяется по всему его объему через теплопроводность. Низкая теплопроводность бетона приводит к формированию неоднородных полей температуры, что может вызвать термические напряжения и увеличение продолжительности стадии предварительного разогрева. Еще одним важным аспектом является необходимость обеспечения герметичности камеры. Максимальные значения коэффициентов теплоотдачи от конденсирующегося водяного пара достигаются при полном насыщении влагой (степень сухости пара равна нулю). При наличии неплотностей и проникновении воздуха, теплоотдача пара значительно ухудшается, так как поток насыщенного пара фактически становится потоком влажного газа, теплоотдача которого определяется условиями конвективного теплообмена. Важными проблемами, связанными с тепловлажностной обработкой (ТВО), являются сложности настройки парового потребления в зависимости от производственных потребностей и сезонных условий. Эти проблемы стимулируют разработчиков и исследователей искать различные способы повышения эффек-

тивности ТВО [26, 27]. Следует отметить, что большая часть возможных вариантов решения этой проблемы уже исчерпана, и в настоящее время исследователи сосредоточены на разработке новых методов тепловой обработки.

Один из таких методов – тепловая обработка с использованием продуктов сгорания природного газа [28, 29].

Преимуществами данного метода тепловой обработки являются низкая общая стоимость технологии, значительные ресурсы природного газа и возможность гибкого управления технологическим процессом. Однако недостатками являются низкая эффективность использования тепловой энергии продуктов сгорания газа и значительные потери влаги из бетона в процессе тепловой обработки, что может привести к ухудшению качества готовых изделий и даже их браку. Частичное устранение этого недостатка может быть достигнуто путем предварительного нанесения тонких пленок на поверхность изделий, которые предотвращают испарение влаги с открытых поверхностей [30], или разработкой и применением специальных методов управления влажностью в пропарочной камере [29]. Однако это усложняет технологию и требует использования специальных материалов.

В настоящее время тепловая обработка с использованием горячей воды для обогрева опалубки стала достаточно популярной. Этот метод чаще всего применяется при производстве изделий большой длины (до 100 м) с использованием безопалубочной технологии, такой как пустотные плиты перекрытий, забивные сваи, перемычки и другие. В процессе тепловой обработки применяется предварительное напряжение арматуры, а затем изделия подвергаются последующей обработке для достижения требуемой фактуры и номенклатуры [31, 32].

В южных и солнечных регионах страны наибольший потенциал имеет тепловая обработка железобетонных изделий с использованием солнечной энергии [33–35]. Эта экологически чистая и энергосберегающая технология в настоящее время имеет различные варианты технической реализации, такие как гелиополигоны, гелиообработка в кассетах и пакетах с конвективным и инфракрасным обогревом. Она широко применяется в странах Ближнего Востока, Средней Азии и некоторых южных районах средней полосы России [36, 37]. Однако при гелиообработке необходимо принимать меры для предотвращения чрезмерного испарения воды из бетона. Для этого можно использовать предварительное нанесение на поверхность изделий пленкообразующих составов, которые задерживают влагу, или проводить обработку в гидроаэроциркуляционных гелиокамерах.

Выводы

1. Из анализа литературных источников следует, что в настоящее время исследователи и разработчики активно работают над различными методами электротепловой обработки железобетонных изделий. Особое внимание уделяется электроразогреву бетонной смеси, который считается наиболее эффективным способом тепловой обработки.

2. Теория тепломассопереноса является теоретической основой для развития современных научных направлений, направленных на совершенствование технических и технологических принципов строительного производства. Эта теория основана на создании физико-математических моделей и их численно-аналитическом решении в инженерных задачах.

3. Результаты исследований и разработок в области электротепловой обработки железобетонных изделий имеют важное значение для развития строительного материаловедения. Они позволяют улучшить технические и технологические принципы строительного производства как на заводских условиях, так и на строительной площадке.

Библиографический список

1. Федеральный Закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/.

2. **Баженов Ю. М.** Технология бетона. М. : Изд-во АСВ, 2003. 500 с.
3. **Алимов Л. А., Баженов Ю. М., Воронин В. В.** Технология бетона, строительных изделий и конструкций: учебник для вузов. М. : Изд-во АСВ, 2004. 256 с.
4. **Лебедев В. М.** Технология и механизация процессов городского строительства и хозяйства. М. : ИНФРА-М, 2019. 33 с.
5. **Лапидус А. А.** Организационно-технологическая платформа строительства // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17, Вып. 4. С. 516–524. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.516-524.
6. **Шмигальский В. Н.** Формирование изделий на виброплощадках. М. : Стройиздат, 1968. 104 с.
7. **Дмитрович А. Д.** Тепло- и массообмен при твердении бетона в паровой фазе. М. : Стройиздат, 1967. 243 с.
8. **Гершберг О. А.** Технология бетонных и железобетонных изделий. М. : Стройиздат, 1967. 359 с.
9. **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа. М. : Дрофа, 2003. 840 с.
10. **Лыков А. В.** Теория сушки. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1963. 471 с.
11. Проектирование предприятий по производству строительных материалов и изделий / Ю. М. Баженов, Л. А. Алимов, В. В. Воронин, Н. В. Трескова. М. : АСВ. 2005. 472 с.
12. **Федосов С. В.** Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново : Прес.СТО, 2010. 364 с.
13. **Миллер М. Р., Миллер Р.** Руководство по строительству каркасного дома и кровельным работам. Изд. ВHV, 2014. 720 с.
14. «Москва Белокаменная – путеводитель-справочник», 1903 г., книжный склад Н. И. Игнатова. СПб, 213 с.
15. **Онищик Л. И.** Каменные конструкции промышленных и гражданских зданий. Л. : Стройиздат, 1939. 208 с.
16. **Солдаткин Н. Т., Шульман М. З.** Предварительный разогрев бетонной смеси в бункере бетоноукладчика, снабженного паровым регистром // Совершенствование бетонных работ и интенсификация использования техники: Сб. научных трудов / Владимирский политехнический институт. Владимир, 1990.
17. **Гныря А. И., Титов М. М.** Новое слово в технологии предварительного электрозагрева бетонной смеси // Строительные материалы XXI века (Технологии бетонов). 2008. № 1. С. 54–57.
18. **Арбенев А. С.** Возникновение и развитие технологии бетонирования с электрозагревом смеси // Промышленный вестник. 1998. № 6-7. С. 21–23.
19. **Куприянов Н. Н., Мишина Т. Б., Дикарь С. А.** Подогрев бетона в щелевых камерах продуктами сгорания природного газа // Бетон и железобетон. 1993. № 7.
20. **Бабушкин В. И., Матвеев Г. М., Мchedlov-Петросян О. П.** Термодинамика силикатов. М. , Стройиздат, 1986. 352 с.
21. **Шмитько Е. И., Крылова А. В., Шаталова В. В.** Химия цемента и вяжущих веществ. СПб. : Изд. «Проспект науки», 2018. 208 с.
22. **Лыков А. В.** Явление переноса в капиллярно-пористых телах. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1954. 296 с.
23. **Лыков А. В., Михайлов Ю. А.** Теория тепло- и массопереноса. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1963. 595 с.
24. **Таганов И. Н.** Моделирование процессов массо- и энергопереноса // Нелинейные системы. Л. : Химия, 1979. 204 с.
25. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях / под ред. Б. А. Крылова, С. А. Амбарцумяна, А. И. Звездова. М. : НИИЖБ, 2005. 276 с.

26. **Федосов С. В., Бобылев Б. И., Соколов А. М.** Электротепловая обработка бетона токами повышенной частоты на предприятиях сборного железобетона. Иваново : Изд. ИГУ, 2016. 336 с.
27. **Куприянов Н. Н., Малинина Л. А., Панков В. В.** Влияние тепловлажностной обработки в среде продуктов сгорания природного газа на свойства тяжелого бетона // Бетон и железобетон. 1990. № 12.
28. Экспериментальные исследования тепловлажностной обработки бетона продуктами сгорания природного газа / А. Д. Корнеев, В. Я. Губарев, Д. С. Синельников, В. Г. Соловьев // Строительные материалы. 2007. № 1. С. 30–31.
29. **Аруова Л. Б.** Гелиотермообработка железобетонных изделий с использованием пленкообразующих составов // Бетон и железобетон. 1994. № 4. С. 23.
30. **Крылов Б. А., Аруова Л. Б.** Комбинированная гелиобработка железобетонных изделий в Республике Казахстан // Бетон и железобетон. 2007. № 4. С. 11–13
31. **Крылов Б. А.** Электроразогрев бетонных смесей и перспективные области его применения // Строительные материалы. 2002. № 5. С. 8–10.
32. **Трембицкий С. М.** Энергосберегающие технологии изготовления железобетонных изделий и конструкций // Бетон и железобетон. 2006. № 6. С. 23–26.
33. **Руденко И. Ф., Новоселов В. А.** Направления совершенствования и технического перевооружения производства сборного железобетона // Бетон и железобетон. 2006. № 6. С. 2–8.

УДК 66.045.1:658.477

Андрей Борисович Гаряев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тепломассообменные процессы и установки», GariayevAB@mpei.ru

Ольга Евгеньевна Прун, старший преподаватель кафедры «Тепломассообменные процессы и установки», olgaproon@mail.ru

Национальный исследовательский университет Московский энергетический институт, Россия, г. Москва

Метод оценки эффективности теплообменного оборудования для утилизации низкопотенциальной теплоты

Аннотация. Разработан метод оценки эффективности теплообменного оборудования для утилизации низкопотенциальной теплоты. Метод основан на вычислении и оптимизации критерия, представляющего собой разницу передаваемой в теплообменнике теплоты и затрат электрической энергии, необходимой на прокачку теплоносителей с учетом их различной энергетической ценности для потребителя. Аргументами для этой функции являются полные расходный теплоемкости теплоносителей. Показано, что данный критерий всегда имеет максимум на рассматриваемой области. Применение метода позволяет экономить энергетические ресурсы путем правильного выбора теплообменного аппарата или наилучшего режима его работы.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, утилизация теплоты, повышение эффективности, оптимизация.

Andrey B. Gariayev, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor

Head of the Department Heat and Mass Transfer processes and installations, GariayevAB@mpei.ru

Olga E. Prun, Senior Lecturer of the Department Heat and mass transfer processes and installations, olgaproon@mail.ru

National Research University Moscow Power Engineering Institute, Russia, Moscow

Energy efficiency evaluation method for heat exchange equipment in heat-recovery systems with low energy potential

Abstract. An energy efficiency evaluation method for heat exchange equipment applied in heat-recovery systems with low energy potential was developed. The method is based on calculation and optimization of special criterion that can be also called a thermal-hydraulic function. This criterion equals to a difference of a heat exchanger heat capacity and electrical capacity required for pumping heat carriers through a heat exchanger. The criterion also takes into consideration the possible worth differential of heat and electrical energy for the final energy consumer. The arguments of the thermal-hydraulic function are total mass flow rate heat capacities of heat carriers. It is shown that the heat-hydraulic function always has a maximum value. The method helps to select correctly a heat exchanger or its operating mode and thus to save energy resources.

Keywords: heat exchanger, heat energy recovery, energy efficiency, optimization method.

Повышение энергетической эффективности, т. е. сокращение затрат энергии на производство продукции (товаров и услуг), является важным направлением деятельности ученых и инженеров. Одним из основных способов повышения энергетической эффективности в «большой» энергетике, промышленности, и коммунальном хозяйстве является утилизация

теплоты отработавших газов и жидкостей, уходящих из энергетических и технологических установок. Среди таких энергоносителей могут быть потоки газов с высокой температурой, такие, например, как доменный или конвертерный газы.

Однако с развитием техники и ростом цен на топливно-энергетические ресурсы все больше используется низкопотенциальная теплота, которая более широко распространена, чем высокопотенциальная. К источникам низкопотенциальной теплоты мы относим такие энергоносители, температурный потенциал которых недостаточен для промышленной выработки пара в серийно выпускаемых котлах-утилизаторах. Это горячие газы с температурой до 250 °С, такие как сушильный агент на выходе из сушильных установок, предварительно охлажденные продукты сгорания топлива после котельных установок или промышленных печей, удаляемый из помещений нагретый вентиляционный воздух, нагретый воздух после охлаждения оборудования центров обработки данных или другого тепловыделяющего оборудования и т.д. К низкопотенциальным источникам теплоты можно также отнести жидкости с температурой до 150 °С. Для утилизации низкопотенциальной теплоты используются утилизационные теплообменники и теплонасосные установки. Также низкопотенциальная теплота может быть использована для получения холода в абсорбционных холодильных машинах.

Схема типичной установки для утилизации теплоты вытяжного вентиляционного воздуха с промежуточным теплоносителем (ПТН) показана на рисунке 1.

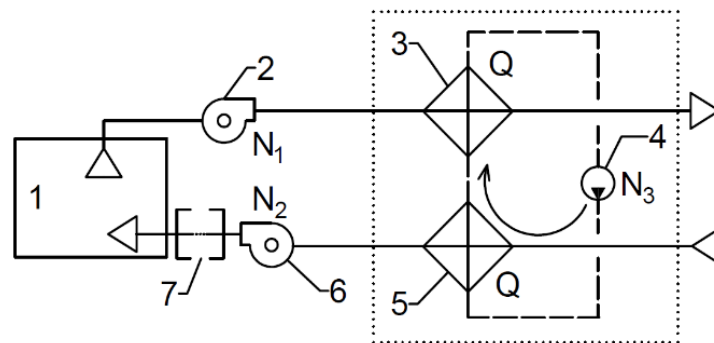


Рисунок 1 – Схема утилизации теплоты вытяжного воздуха с ПТН:

1 – помещение; 2 – вытяжной вентилятор; 3 – водонагреватель; 4 – насос в водяном контуре;
5 – воздухонагреватель; 6 – приточный вентилятор; 7 – прочее оборудование систем
вентиляции или кондиционирования

Утилизационные теплообменники возвращают в систему определенное количество теплоты, но в то же время для перекачивания теплоносителей через теплообменник затрачивается электрическая энергия на привод нагнетателей. При проектировании таких установок встает серьезный вопрос выбора теплообменного оборудования, наилучшим образом подходящего к данным условиям работы. Поскольку теплообменные аппараты имеют длительные сроки службы, на привод нагнетателей затрачивается большое количество электроэнергии. При этом затраты энергетических ресурсов на получение 1 кВт·ч электрической энергии и их стоимость существенно выше, чем затраты энергоресурсов и их стоимость на получение 1 кВт·ч теплоты, замещаемой при возвращении энергии в установку. Таким образом, нужно выбрать теплообменный аппарат, который лучше всего подходит для заданных условий, либо определить наилучшие условия работы для выбранного теплообменного аппарата. В установках для оптимизации низкопотенциальной теплоты правильный выбор особенно важен, поскольку разность температур между теплоносителями невелика и для передачи достаточной тепловой мощности требуется обрабатывать большие объемы теплоносителей.

Известные методы оценки эффективности теплообменных аппаратов, такие, как тепловая эффективность [1], введенная В. М. Кейсом и А. Л. Лондоном, и эксергетический КПД

[2], не подходят для данной цели, поскольку не учитывают затраты электроэнергии на привод нагнетателей. Критерий М. В. Кирпичева и полученный на его основе энергетический коэффициент В. М. Антуфьева [3] учитывают затраты электрической мощности. Тем не менее они не будут показательными в данном случае, поскольку, являясь удельными величинами, они не учитывают количество утилизируемой теплоты, и, таким образом, не характеризуют полностью теплоутилизационную установку.

Мы предлагаем новый метод оценки эффективности теплообменных аппаратов при их работе в системах утилизации теплоты. Он основан на введении и определении оптимального значения критерия, который мы назвали тепло-гидравлической функцией Z . Данная функция представляет собой разницу передаваемой в теплообменнике тепловой мощности Q и суммарной электрической мощности, необходимой на прокачку теплоносителей, с учетом их различной энергетической ценности для потребителя ΣN .

Тепло-гидравлическая функция Z – это функция двух независимых переменных, которыми являются полные расходный теплоемкости теплоносителей W_1 и W_2 (их старое название – водяные эквиваленты).

$$Z = Q - b \Sigma N. \quad (2)$$

Здесь b – коэффициент, который характеризует соотношение ценности электрической и тепловой энергии для потребителя. Его численное значение может быть найдено, как отношение удельных затрат условного топлива на производство электричества и теплоты. В том случае, если потребителя больше интересует финансовый результат, то для вычисления коэффициента можно использовать отношение тарифов на электрическую энергию и теплоту.

Преимуществом применения данной функции в качестве критерия эффективности является то, что в координатах (W_1, W_2) она всегда имеет экстремум. Отметим, что критерии М. В. Кирпичева и В. М. Антуфьева являются монотонно убывающими функциями для заданного теплообменного аппарата при увеличении расходов теплоносителей. Другим преимуществом является возможность напрямую связать его с экономией финансовых средств, получаемых при утилизации теплоты.

Для вычисления тепло-гидравлической функции Z необходимо провести серию проверочных расчетов рассматриваемого теплообменного аппарата для разных значений расходов теплоносителей при заданных температурах на входе. Исходя из нужд проектирования для каждого теплообменного аппарата было бы полезно рассчитывать тепло-гидравлическую характеристику на типовые для его работы температуры и включать ее в состав технической документации. Далее необходимо провести гидравлические расчеты теплообменника по каждому теплоносителю. Часто теплообменный аппарат вносит наибольший вклад в гидравлическое сопротивление системы, в которой он функционирует. Однако это происходит не всегда, поэтому гидравлический расчет должен проводиться по всей системе, то есть он должен учитывать не только гидравлическое сопротивление теплообменного аппарата, но и полное гидравлическое сопротивление каждого контура, по которому движутся теплоносители.

Далее метод предполагает оптимизацию режима работы теплообменного аппарата в составе теплоутилизационной установки, либо выбор наилучшего аппарата из типоразмерного ряда, который обеспечит необходимые требования к системе (заданную тепловую мощность или требуемые потери давления). Если стоит задача выбора теплообменного аппарата из типоразмерного ряда аппаратов, то следует выбрать тот, для которого значение функции Z является наибольшим для рассматриваемых условий. Для случая, когда гидравлическое сопротивление аппарата достаточно велико, необходимо учесть, что основная часть электрической энергии, затрачиваемая нагнетателями, переходит в теплоту и повышает температуру теплоносителей. Этот вопрос в дальнейшем требует отдельного рассмотрения.

Очевидно, что в данной целевой функции не учитываются такие важные факторы, как стоимость аппарата и его массогабаритные характеристики. Однако их можно внести в качестве ограничения при проведении оптимизации, либо использовать модифицированные варианты целевой функции, которые их включают. Например, можно использовать такие функции, как (2)–(4):

$$Z_F = \frac{1}{F}(Q - b \times \Sigma N), \quad (2)$$

$$Z_V = \frac{1}{V}(Q - b \times \Sigma N), \quad (3)$$

$$Z_M = \frac{1}{M}(Q - b \times \Sigma N). \quad (4)$$

Здесь F , V и M – площадь поверхности теплообмена, объем, занимаемый аппаратом, и его масса, соответственно.

Наличие экстремума на рассматриваемой области позволяет ввести также абсолютный критерий, который представляет собой отношение тепло-гидравлической функции для реальных условий работы к ее максимальному значению $C = Z/Z_{\max}$. Его физический смысл состоит в том, что он определяет долю полезно используемой энергии при данных условиях работы от теоретически максимально возможной величины, которую можно получить при заданных температурах теплоносителя на входе, подобрав оптимальные расходы теплоносителей. Таким образом, он показывает, насколько хорошо подходит теплообменный аппарат для заданных условий его работы с точки зрения эффективности использования энергии.

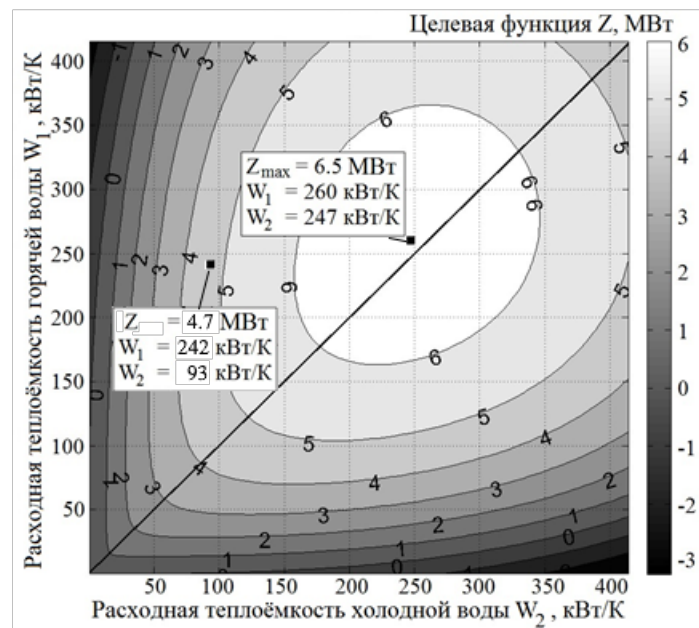


Рисунок 2 – Теплогидравлическая функция пластинчатого водо-водяного нагревателя (значения функции Z рассчитаны при $b = 5$)

Так из графика тепло-гидравлической функции, представленного на рисунке 2, можно определить, что значение данного критерия составляет $C = Z/Z_{\max} = 0,72$.

Проведенные на основе предложенного метода расчеты различных теплообменных аппаратов показали, что их правильный подбор для теплоутилизационной установки, работающей в заданном режиме, позволяет обеспечить значительную экономию топливно-энергетических ресурсов в течение всего срока эксплуатации установки [4–6].

Метод может быть применен для анализа эффективности теплообменных аппаратов, работающих в различных системах утилизации теплоты, в том числе, в установках с проме-

жуточным теплоносителем, с глубокой утилизацией теплоты (с конденсацией влаги из влажных газов), с термохимической рекуперацией, а также для установок, использующих тепловые насосы. Предлагаемый подход может служить методической основой разработки конструкций эффективных теплообменных аппаратов, использующихся при малых перепадах температур между теплоносителями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России, гос. задание № FSWF-2023-0017.

Библиографический список

1. **Кэйс В. М., Лондон А. А.** Компактные теплообменники. М. : Госэнергоиздат, 1967.
2. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: учебник / А. Б. Гаряев, И. В. Яковлев, А. В. Клименко [и др.]; под ред. А. В. Клименко. Изд. 4, перераб. и доп. М. : Издательство МЭИ, 2021. 504 с.
3. **Иванов А. Н., Белоусов В. Н., Смородин С. Н.** Теплообменное оборудование промпредприятий: учебное пособие. СПб. : ВШТЭ СПбГУПТД, 2016. 184 с.
4. **Гаряев А. Б., Прун О. Е., Клименко А. В.** Определение оптимального соотношения характеристик микроканальных теплообменных аппаратов // Теплофизика и аэромеханика. Новосибирск : Издательство СО РАН, 2015. Том 22, № 6. С. 751–760.
5. **Прун О. Е., Гаряев А. Б., Сынков И. В.** Оптимизация теплогидравлических характеристик водоохлаждаемых газоходов для утилизации теплоты выхлопных газов газоперекачивающих агрегатов // Вестник МЭИ: теоретический и научно-практический журнал. М. : Издательский дом МЭИ, 2017. № 6, С. 30–35.
6. **Прун О. Е., Гаряев А. Б.** Метод оптимизации теплообменных аппаратов, работающих в системах утилизации тепла // Теплоэнергетика. 2020. № 8. С. 78–85. DOI: 10.1134/S0040363620080044.

УДК 631.371/628.81

Дмитрий Анатольевич Тихомиров, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Отделения сельскохозяйственных наук, tihda@mail.ru
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Россия, г. Москва

Энергоэффективные процессы и оборудование теплообеспечения животноводческих объектов

Аннотация. Проведен анализ состояния теплоэнергетического обеспечения сельскохозяйственного производства РФ и, в частности, объектов животноводства, и его сравнение с передовыми зарубежными странами. Представлены показатели энергозатрат в себестоимости основных видов сельскохозяйственной продукции РФ. Сформулированы основные задачи и предложены перспективные направления повышения энергетической эффективности систем теплообеспечения АПК с оценкой роста ее показателей. Разработаны рекомендации по обоснованию и выбору энергоэффективных систем и технических средств теплообеспечения типовых сельских объектов с учетом места их расположения, величины электрической и тепловой нагрузки, расстояния от централизованных сетей энергообеспечения и наличия местных энергоресурсов. Представлено новое энергоэффективное системообразующее оборудование для теплообеспечения технологических процессов в животноводстве.

Ключевые слова: энергообеспечение, теплообеспечение, энергосбережение, энергоёмкость, электротепловое оборудование.

Dmitry A. Tikhomirov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher of the Department of Agricultural Sciences, ihda@mail.ru
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Russia, Moscow

Energy-efficient processes and equipment for heat supply of livestock facilities

Abstract. The analysis of the state of heat and power supply of agricultural production of the Russian Federation and, in particular, livestock facilities are carried out. Compared with advanced foreign countries. They showed the share of energy consumption in the cost of the main types of agricultural products of the Russian Federation. The main tasks are formulated and promising directions for improving the energy efficiency of heat supply systems of the agro-industrial complex with an assessment of the growth of its indicators are proposed. Recommendations have been developed for the justification and selection of energy-efficient systems and technical means of heat supply for typical rural facilities, taking into account their location, the magnitude of the electrical and thermal load, the distance from centralized power supply networks and the availability of local energy resources. A new energy-efficient system-forming equipment for heat supply of technological processes in animal husbandry is presented.

Keywords: energy supply, heat supply, energy saving, energy intensity, electric heating equipment.

Введение

Сельскохозяйственное производство является крупным потребителем топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в объеме 23 млн т.у.т., в том числе в стационарных процессах около 10 млн т.у.т. [1, с.2].

Свыше 60 % ТЭР используется в системах теплоснабжения множества производственных объектов животноводческих ферм и комплексов, птицефабрик, предприятий по сушке, переработке и хранению сельскохозяйственной продукции, фермерских и личных подсобных хозяйств. Теплота используется в технологических процессах обеспечения заданных параметров микроклимата и в первую очередь температуры воздуха в помещении, отопления, горячего водо- и парообеспечения, термической обработки и приготовления кормов, сушки, хранения, переработки различных видов сельскохозяйственной продукции, биоконверсии и в других технологических процессах [2, с.6].

Однако производство и поставка отечественного теплоэнергетического оборудования и обеспечение им производственных животноводческих объектов весьма низкая и не превышает 40 %.

Научно-технические разработки нового оборудования в РФ за последние тридцать лет в сельскохозяйственное производство внедрялись слабо, что привело к зависимости от дорогостоящей зарубежной техники. Отечественное машиностроение, специализирующееся на производстве теплоэнергетического оборудования для сельского хозяйства, практически прекратило свое существование.

В настоящее время по-прежнему находятся в эксплуатации малоэффективные, несовершенные системы и технические средства теплообеспечения сельскохозяйственных производственных объектов в виде центральных котельных, излишне капиталоемких, не обеспечивающих современные нормированные условия содержания животных. Такие системы теплоснабжения отличаются большими потерями и значительным перерасходом тепловой энергии. Состояние существующих топливных котельных, тепловых сетей и теплоэнергетического оборудования характеризуется старением, износом и значительным снижением технико-экономических показателей.

По результатам анализа состояния энергообеспечения АПК следует отметить, что Россия уступает передовым странам по основным показателям: энергоемкость сельхозпроизводства в 2–2,5 раза больше, надежность и качество энергоснабжения ниже, потери энергии в сельских сетях почти в 2 раза больше, коэффициент полезного использования топлива (КПИ) не превышает 40 % (за рубежом эта величина составляет 50 % и выше). В сельском хозяйстве газифицировано 68 % предприятий и жилого сектора. Использование запасов энергоресурсов (традиционных и местных) пока еще не стало рациональным и эффективным [3, с.6].

Доля полных энергозатрат в себестоимости основных видов продукции также достигает значительных величин – порядка 25...28 % [4, с.12]. Поэтому разработка и внедрение отечественных энергоэффективных систем и технических средств энергообеспечения производственных объектов АПК и социальной сферы является важной и актуальной задачей.

Этот показатель энергоэффективности производства сельскохозяйственной продукции [3, с.5] до недавнего времени неуклонно возрастал (рисунок 1). В последнее время наметилась его стабилизация и некоторое понижение, вызванное применением энергоэкономных технологий и снижением явной диспропорции стоимости энергоносителей и сельхозпродукции [5, с.33].

В связи с высокими энергетическими затратами недостаточно обоснованно реализуются относительно недорогие проекты с «холодным» способом содержания животных, где не соблюдаются установленные зоотехнические требования и нормы технологического проектирования (РД АПК). Особенно это касается помещений с молодняком животных, денников, профилакториев, молочных блоков и т. д.

В последние годы появились и появляются новые потребители – фермерские хозяйства, ЛПХ, новые объекты в животноводстве и птицеводстве, цеха и заводы по переработке продукции, приготовления кормов. Для новых и реконструируемых объектов важным является разработка рекомендаций по выбору и обоснованию эффективных систем и технических средств энергообеспечения с учетом места их расположения, величины электрической и тепловой нагрузки, расстояния от централизованных сетей энергоснабжения и наличия местных энергоресурсов, а также создание нового энергосберегающего теплоэнергетического оборудования [6, с.38].

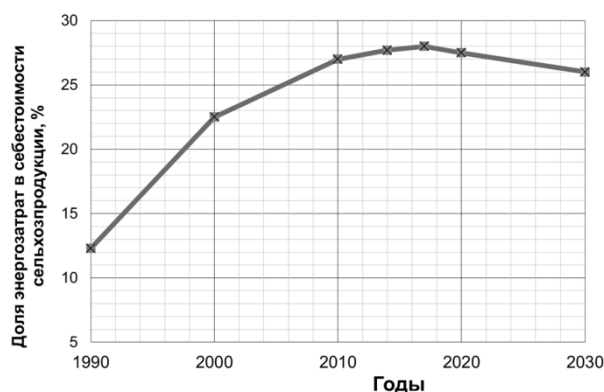


Рисунок 1 – Доля энергозатрат в себестоимости сельхозпродукции (ВВП)

Целью исследований является определение перспективных направлений повышения энергетической эффективности систем и технических средств теплообеспечения АПК и снижения энергоемкости сельхозпроизводства.

Результаты исследования. Значимая часть территории России и сельских поселений не имеет централизованного энергообеспечения. При низкой плотности нагрузки в зонах точечной застройки малонаселенной сельской местности, отдаленных, труднодоступных и малоосвоенных районах в связи с высокими капитальными затратами на тепловые и электрические сети, большими потерями энергии в протяженных сетях, дороговизной и сложностью завоза жидкого топлива важное значение приобретает реализация систем распределенной энергетики на базе децентрализованных и комбинированных источников энергоснабжения с использованием местных и возобновляемых энергоресурсов.

Структурный анализ состояния энергетической базы села, парка теплоэнергетического оборудования позволяют выделить перспективные направления и первоочередные энергосберегающие мероприятия:

- повышение эффективности использования топлива (КПИ) и энергии в наиболее энергоемких тепловых процессах содержания животных и птицы на базе глубокой утилизации теплоты [7, с.143], [8, с.211], использования тепловых насосов [9, с.60], аккумуляции теплоты [10, с.699], комбинированной выработки тепловой и электрической энергии [11, с.96], местного обогрева [12, с. 5–15], что позволит снизить затраты энергии в данных технологических процессах на 30...40 %;
- разработка и освоение систем и средств распределенной энергетики на базе использования местных и возобновляемых энергоресурсов, отходов сельхозпроизводства в децентрализованных системах теплообеспечения, в которых выработка тепловой энергии осуществляется в местах ее потребления;
- разработка и реализация технологий переработки биомассы и сельскохозяйственных отходов в газообразное и жидкое топливо, а отходов животноводства (навоза, стоков) в качественные удобрения и биогаз [13, с.83] с дальнейшим его использованием для теплообеспечения объектов АПК;
- освоение новых электро- и теплотехнологий в процессах микроклимата, приготовления кормов [14, с.79], облучения, обработки и сушки семян [15, с.35], хранения продукции, обеззараживания помещений [16, с.76], воды, кормов, что обеспечит снижение энергозатрат в соответствующих процессах на 20...25 %;
- переоборудование старых котельных в новые теплоэлектрические станции (мини-ТЭЦ) с выработкой тепловой и электрической энергии с экономией топлива до 30 % и повышением КПД до 80 %.

Применение децентрализованных систем теплообеспечения позволяет избавляться от протяженных тепловых и газовых сетей, что значительно уменьшает потери энергии.

При оценке систем энергоснабжения (особенно на стадии их разработки) экономических критериев недостаточно, поэтому наряду с ними следует использовать энергетические критерии – энергоёмкость производства, доля энергозатрат в себестоимости производства сельхозпродукции, уровень надежности энергоснабжения, величина возможного ущерба от перерывов, так как при изменении цен и тарифов экономические критерии могут меняться. Совершенствование и модернизация систем и средств энергообеспечения сельхозпредприятий – важнейшее направление снижения энергоёмкости сельхозпроизводства [17, с.2].

Выбор наиболее рациональной системы централизованного или автономного энергообеспечения проектируемых объектов или модернизация действующей системы конкретных эксплуатируемых объектов (потребителей энергии) позволит наиболее рационально использовать энергоресурсы (традиционные, нетрадиционные, местные, возобновляемые), снизить энергозатраты, а, следовательно, энергоёмкость производимой продукции и ее себестоимость [18, с.73].

Разработана и апробирована методология и экспертная программа по выбору и обоснованию эффективных систем теплообеспечения объектов сельского хозяйства [19, с.75].

Применение электрической энергии в тепловых процессах сельскохозяйственного производства в сравнении с другими энергоносителями обладает целым рядом технических и технологических преимуществ. В то же время электроэнергия наиболее качественный, но дорогостоящий вид энергии. Эффективное ее применение в тепловых процессах возможно при реализации всех ее преимуществ по сравнению с топливными энергоносителями. Это требует проведения системного технико-экономического и энергетического анализа и обоснования при выборе наиболее эффективных систем и технических средств теплообеспечения стационарных технологических процессов сельскохозяйственного производства [2, с.7].

Установлено, что для малых ферм КРС (до 200 голов и свиноматок до 510 мест) при использовании энергосберегающего оборудования и реализации системы дифференцированного учета электроэнергии, электрическая энергия, в качестве энергоносителя, конкурентоспособна природному газу при текущем и прогнозируемом соотношении цен на энергоносители (рисунок 2). Для негазифицированных объектов сельскохозяйственного производства применение современных энергосберегающих электрических систем теплообеспечения, при прочих равных условиях, является конкурентоспособным и предпочтительным.

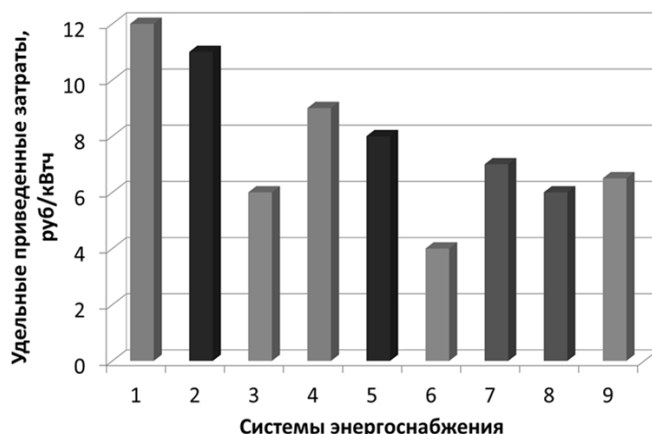


Рисунок 2 – Удельные приведенные затраты на 1 кВт·ч полезной тепловой энергии, потребляемой фермой КРС на 200 голов централизованные (котельные):

1 – на твердом топливе, 2 – на жидком топливе, 3 – на природном газе; децентрализованные системы: 4 – на твердом топливе, 5 – на жидком топливе, 6 – на природном газе, 7 – на электроэнергии; полностью автономные: 8 – биогазовая установки; 9 – газгольдер

В ФГБНУ ФНАЦ ВИМ разработаны современные образцы энергосберегающего оборудования для теплообеспечения животноводческих объектов различного направления.

Электрический теплоутилизатор из полимерных материалов с озонированием и устройством рециркуляции внутреннего воздуха (рисунок 3) предназначен для обеспечения заданных параметров микроклимата в животноводческих помещениях [20, с.4921]. В основу работы положены принципы утилизации теплоты вентиляционного воздуха, озонирования и рециркуляции внутреннего воздуха помещения, что обеспечивает снижение энергозатрат до 60 %, рост продуктивности и сохранности животных, экологическую чистоту по сравнению с традиционными системами.



Рисунок 3 – Теплоутилизатор из полимерных материалов с озонированием и устройством рециркуляции внутреннего воздуха

Производительность, м ³ /ч	1500
Мощность встроенного электрокалорифера, кВт	9
Доля рециркуляции внутреннего воздуха, %	0...30
Напряжение питания, В	380/220
Тепловой поток, возвращаемый утилизатором, кВт	до 6
Мощность озонатора, Вт	50
Производительность озонатора, г/ч	До 1,5
Масса установки с пультом управления, кг	150

Термоэлектрическая напольная обогревательная панель (рисунок 4) предназначена для обогрева поросят в свинарниках-маточниках.

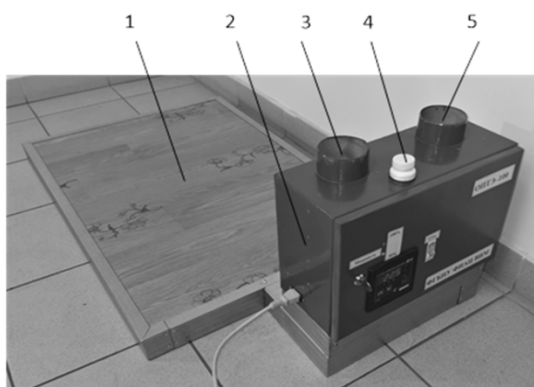


Рисунок 4 – Термоэлектрическая напольная обогревательная панель:

- 1 – напольная обогревательная панель;
2 – щит управления; 3 – патрубок входящего воздуха; 4 – бачок теплоносителя;
5 – патрубок выходящего воздуха

Количество элементов Пельтье	2
Мощность, потребляемая элементами Пельтье из сети, Вт	100
Теплота, возвращаемая тепловым насосом, не менее, Вт	15
Напряжение питания элемента Пельтье, В	12
Расход циркулирующей жидкости по замкнутому контуру, л/ч	36,8
Масса панели, кг	5
Площадь поверхности панели, м ²	0,7
Количество элементов Пельтье	2

В качестве нагревателей использованы элементы Пельтье [21, с.28]. При работе установки в режиме теплового насоса снижаются энергозатраты до 20 % за счет частичной утилизации теплоты удаляемого вентиляционного воздуха.

Клетка для содержания и обогрева молодняка животных (рисунок 5) разработана НПП «Фемакс» и ФГБНУ ФНАЦ ВИМ и предназначена для индивидуального содержания и

обогрева телят профилакторного периода на животноводческих фермах, в фермерских и крестьянских хозяйствах [22].

Тепловой поток от ИК-нагревателя к теленку регулируется автоматически в зависимости от положения животного (лежачее, стоячее), что способствует постоянному уровню ИК-облученности поверхности кожи теленка и сбережению электроэнергии по сравнению с традиционными облучателями. При этом обеспечивается рост продуктивности и сохранности животных при снижении энергозатрат.



Рисунок 5 – Клетка для содержания и обогрева телят

Мощность облучателя, Вт, не более	300
Диапазон регулирования мощности, %	40...100
Температура поверхности нагревательного элемента, °С	450
Габариты облучателя, мм	400×290×70
Масса облучателя, кг	3,2
Габаритные размеры клетки, мм	1200×520×1300

Комбинированная электрическая теплоаккумуляционная установка для нагрева воздуха (рисунок 6) предназначена для поддержания необходимой температуры воздуха в животноводческих и бытовых помещениях по установленным температурному и временному графикам [23, с.168]. Реализация двухуровневой схемы эффективного обогрева животноводческих и бытовых помещений: аккумуляционный (теплоаккумулятор) и прямой (конвектор) электрообогрев способствуют снижению затрат на электроэнергию до 40 % при использовании пониженного ночного тарифа по учету электроэнергии.



Рисунок 6 – Комбинированная электрическая теплоаккумуляционная установка

Напряжение, В	380/220
Мощность теплоаккумулятора, кВт	4,8
Мощность конвектора, кВт	1,6
Время зарядки теплоаккумулятора, ч	4
Время разрядки теплоаккумулятора, ч	6-8
Масса установки, кг	200
Напряжение, В	380/220

Термоэлектрический осушитель и подогреватель воздуха ТОПВ-100 (рисунок 7) поддерживает температурно-влажностные параметры микроклимата в сельскохозяйственных помещениях с производительностью по воздуху до 500 м³/ч – родильные отделения, профилактории для телят, ветеринарные санитарные пропускники, овощехранилища и т. д. [24, с.293].



Рисунок 7 – Термоэлектрический осушитель и подогреватель воздуха ТОПВ-100

Мощность установки, потребляемой из электрической сети, не более, Вт	750
Теплота, возвращаемая установкой, Вт	980
Количество осушаемого воздуха, м ³	100
Количество подогреваемого воздуха, м ³	500
Влагопоглощение из воздуха, %	15-20
Масса установки, кг	34
Мощность установки, потребляемой из электрической сети, не более, Вт	750

Работа термоэлектрической установки в режиме теплового насоса обеспечивает снижение энергозатрат до 30 % и приведенных затрат до 20 %, возможность работы в условиях агрессивной окружающей среды, увеличение срока службы в 1,5–2 раза по сравнению с аналогичным по назначению оборудованием.

В области развития биоэнергетики важна реализация новых технологий переработки биомассы, местных энергоресурсов, отходов сельхозпроизводства в технологичное топливо с получением и использованием тепловой и электрической энергии. Энергетический потенциал только от использования растительных отходов сельскохозяйственного производства, биомассы составляет около 10 млн т у.т. или 15...17 % от суммарного потребления ТЭР в АПК на сегодняшний день.

Для переработки биомассы, растительных и древесных отходов в качественное и технологичное топливо в последнее время разработаны новые эффективные технологии и методы: плазменное сжигание, газификация, пиролизация, сверхкритическое водное окисление и др.

Перспективным направлением является приготовление смесевых биотоплив из влажного навоза (отходы КРС, свиней, птичий помет) и углеводородных топлив (нефтьшламы, отработанные масла, мазут) в разных соотношениях. Технология производства таких биотоплив включает ряд операций: дробление, смешивание компонентов, гомогенизацию, сжижение с вводом ультрадисперсных катализаторов. Одним из важнейших элементов в системе распределенной энергетики является переработка отходов, в первую очередь – навоза и стоков в биогаз и удобрения: 1 т сухого навоза при переработке дает 400 м³ биогаза (или одна корова – 800 м³ в год). Теплотворная способность биогаза – 5500 ккал/м³. Такая биотехнология решает также важную проблему экологической безопасности [25, с.61].

Основные направления повышения эффективной работы биогазовых установок сводятся к предварительной обработке биоматериала и воздействию на процесс (электрофизическое, химическое и др.).

В ФГБНУ ФНАЦ ВИМ разработан лабораторный образец биогазовой установки с рециркуляцией сброженного осадка и обработкой в аппарате вихревого слоя (рисунок 8). Средний удельный выход биогаза в расчете на количество органического вещества в исходном субстрате увеличивался на 75,2 %, средний удельный выход метана с 1 м³ анаэробного биореактора увеличивался на 16,8 % по сравнению с традиционным оборудованием [26, с.92].



Рисунок 8 – Биогазовая установка с рециркуляцией сброженного осадка и обработкой в аппарате вихревого слоя

Эффективное использование местных энергоресурсов в энергетике АПК – биомассы, древесных и растительных отходов, торфа, отходов растительных масел, навоза, стоков и др. во многих регионах РФ может покрыть значительную часть (до 30 %) энергобаланса ряда хозяйств и предприятий, сократить потери в сетях, снизить зависимость от централизованного энергоснабжения, создавать децентрализованные системы, вплоть до полного самостоятельного энергообеспечения.

Когенерационная установка является альтернативой существующей системе энергоснабжения, так как наряду с природным газом есть возможность и примеры применения альтернативных видов топлива, прежде всего различных видов биогаза, биодизеля, смешанного топлива, генераторного и пиролизного газа, что в перспективе многократно увеличит объемы их использования в сельской энергетике.

В сельском хозяйстве Мини-ТЭЦ с когенерацией могут применяться для энергоснабжения животноводческих, птицеводческих, свиноводческих комплексов, теплиц, комбикормовых предприятий, сахарных заводов, крупных фермерских хозяйств, школ, больниц, административных зданий и жилого сектора.

Для сельского хозяйства является важным разработка когенерационных установок малой мощности (до 100 кВт) с выработкой тепловой и электрической энергии в одном устройстве и возможностью работы на различном топливе, в т.ч. на биогазе из местных энергоресурсов.

На рисунке 9 представлена микрогазотурбинная установка ГТЭ-10С малой мощности [27, с.27]. Ее отличает надежность и простота конструкции, способность работы на различных видах газа (биогаз, генераторный газ, метан и т.д.).

В области возобновляемой энергетики необходимо разрабатывать новые технологии и технические средства для преобразования энергии солнца, ветра, воды в тепловую и электрическую с высоким КПД и сроком службы при снижении стоимости оборудования.

Экономический потенциал ВИЭ составляет порядка 20 % современного внутреннего энергопотребления РФ. Однако фактически используется на селе не более 1,5 % (без учета крупных ГЭС и древесного топлива), а совместно с местными ресурсами и отходами до 2,5 %. Из имеющихся данных о распределении ресурсов ВИЭ по регионам страны следует, что в каждом из них имеется по два-три вида ВИЭ, пригодных для использования. А это обуславливает целесообразность и перспективность развития всех видов ВИЭ в России и, в первую очередь, в сельскохозяйственной энергетике, как альтернатива части традиционных энергоресурсов.



Рисунок 9 – Микрогазотурбинная установка ГТЭ-10С

Электрическая мощность, кВт	10
Тепловая мощность, кВт	50
Выходное напряжение, В	380
КПД установки, %	84
Вид топлива: биогаз, генераторный газ метан пропан-бутан и др.	

Разработана когенерационная установка автономного электро- и теплообеспечения с концентратором и автоматическим слежением за солнцем (рисунок 10). Установка вырабатывает электроэнергию с пиковой мощностью 200 Вт, а также нагревает воду до 70 °С при расходе 180 л в день [28, с.245].

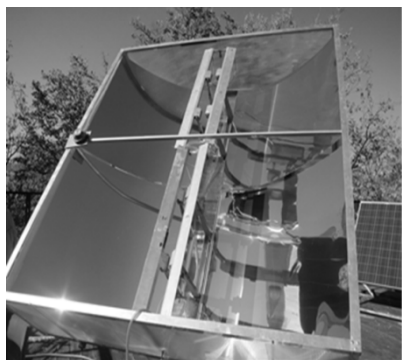


Рисунок 10 – Когенерационная установка автономного электро- и теплообеспечения

Вырабатываемая пиковая электрическая мощность, Вт	200
Температура нагрева теплоносителя (воды), °С	40...60
Средняя дневная выработка электроэнергии, кВт·ч	1,5
Точность слежения за Солнцем, градус	1,5

Предложен проект автономной системы теплообеспечения фермы (рисунок 11), включающей разработанное центром ВИМ как теплогенерирующее, так и теплопотребляющее оборудование с применением утилизации теплоты вентиляционного воздуха, геотермальной энергии, термоэлектричества и аккумуляции тепловой энергии.

Реализация предложенных технических решений обеспечивает снижение энергозатрат до 50 % по сравнению с традиционными системами теплообеспечения и независимость от централизованных сетей.

Разработанная совместно с ООО «ОВЕН» функциональная схема и исходные требования на комплект автоматического управления микроклиматом в животноводческом помещении на примере свинарника служит основой для разработки адаптированного микроконтроллера и комплектации интеллектуальной самообучаемой системы управления отечественным энергосберегающим теплоэнергетическим оборудованием. Предварительное технико-экономическое обоснование показало, что внедрение автоматических систем управления микроклиматом обеспечит снижение энергозатрат до 30% по сравнению с традиционными автоматизированными системами обеспечения микроклимата на животноводческих объектах, применяемых в настоящее время.

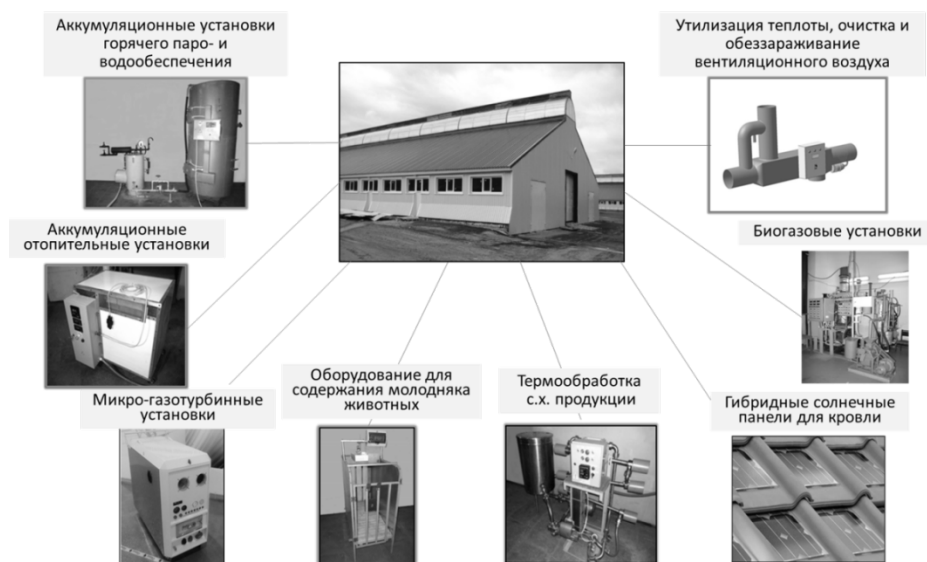


Рисунок 11 – Когенерационная установка автономного электро- и теплообеспечения

Выводы

Реализация программных мероприятий в соответствии с перспективными направлениями развития систем теплообеспечения предусматривает достижение следующих целевых показателей:

- снижение удельных энергозатрат (энергоёмкости) производства сельскохозяйственной продукции в целом на 40 % к 2030 году по сравнению с 2020 годом, в т. ч. за счет применения энергосберегающих систем и технических средств теплообеспечения на 10...15 %;
- расширение использования децентрализованных систем теплообеспечения, в том числе на базе местных и возобновляемых энергоресурсов, в сельской теплоэнергетике позволит: снизить зависимость от централизованного энергоснабжения и установленных тарифов, снизить потери в сетях, повысить КПД топлива;
- широкое применение распределенных и автономных систем энергообеспечения на селе на базе использования местных энергоресурсов, отходов, возобновляемых источников в объеме до 11 млн т у. т. к 2030 году, что составляет 15 % от энергопотребления АПК;
- цифровизация систем управления теплоэнергетическим оборудованием по созданию заданных условий комфортного содержания животных обеспечит наибольшую продуктивность и сохранность при максимальной реализации их генетического потенциала.

Библиографический список

1. **Tikhomirov D., Izmailov A., Lobachevsky Ya., Tikhomirov A.** Energy consumption optimization in agriculture and development perspectives // International Journal of Energy Optimization and Engineering. 2020. Vol. 9. № 4. pp. 1–19.
2. **Тихомиров Д. А.** Энергосберегающие электрические системы и технические средства теплообеспечения технологических процессов в животноводстве: Монография. Орел : Картуш, 2022. 276 с. ISBN 978-5-9708-1012-5.
3. **Стребков Д. С., Тихомиров Д. А., Тихомиров А. В.** Показатели потребления топливно-энергетических ресурсов в сельском хозяйстве и энергоёмкости сельхозпроизводства, их прогноз на период до 2030 года // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2018. № 4(32). С. 4–12.

4. **Тихомиров А. В., Свентицкий И. И., Маркелова Е. К., Уханова В. Ю.** Энергетическая стратегия сельского хозяйства России на период до 2030 года. М. : ФГБНУ ВИЭСХ. 2015. 76 с.
5. **Тихомиров Д. А.** Показатели энергоэффективности сельхозпроизводства и перспективные направления их роста // *Техника и оборудование для села*. 2020. № 5 (275). С. 32–37.
6. **Тихомиров Д. А., Виноградов А. В.** Научные проблемы и практические решения по эффективному и стабильному энергообеспечению объектов животноводства // *Техника и технологии в животноводстве*. 2022. № 2 (46). С. 37–45.
7. **Игнаткин И. Ю.** Способ утилизации теплоты вытяжного воздуха с применением рекуперативного теплообменника // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2018. № 1(56). С. 143–148. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2018.1.143.
8. **Здитовецкая С. В., Володин В. И.** Эффективность теплоутилизационных устройств в системе приточно-вытяжной вентиляции // *Труды БГТУ. № 3. Химия и технология неорганических веществ*. 2010. №3. С. 210–212. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-teploutilizatsionnyh-ustroystv-v-sisteme-pritochno-vytyazhnoy-ventilyatsii> (дата обращения: 28.03.2023).
9. **Giedrius Ge., Ershova I. G., Vasilyev A. N., Tikhomirov D., Samarin G. N., Poruchikov D., Ershov M. A.** Energy saving system based on heat pump for maintain microclimate of the agricultural objects: energy saving system for agriculture: Handbook of Research on Energy-Saving Technologies for Environmentally-Friendly Agricultural Development. Hershey, PA, USA, 2020. pp. 60–84.
10. **Jones BW, Powell R.** Evaluation of distributed building thermal energy storage in conjunction with wind and solar electric power generation. *Renew Energy* 2015;74(2015):699–707. DOI: 10.4018/IJE0E.2020100101.
11. **Ткаченко В. А.** Разработка комплексной системы энергообеспечения сельскохозяйственных ферм на основе когенерации и биогазтехнологий // *Вестник КамчатГТУ*. 2007. – № 6. С. 96–99. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-kompleksnoy-sistemy-energoobespecheniya-selskohozyaystvennyh-ferm-na-osnove-kogeneratsii-i-biogaztehnologiy> (дата обращения: 30.03.2023).
12. **Растимешин С. А.** Локальный обогрев молодняка (теория и технические средства). М. : Агропромиздат, 1991. 140 с.
13. **Kovalev A.** System of Optimization of the Combustion Process of Biogas for the Biogas Plant Heat Supply / A. Kovalev, D. Kovalev, V. Panchenko, V. Kharchenko, P. Vasant // *Intelligent Computing and Optimization. ICO 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. vol. 1072.
14. **Клычев Е. М., Карташов С. Г.** Двухстадийный процесс теплового обеззараживания рассыпных комбикормов // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства*. 2017. № 3 (27). С. 79–82.
15. Моделирование и результаты предпосевной СВЧ и конвективно-тепловой обработки семян / А. А. Васильев, А. Н. Васильев, Д. А. Будников, А. А. Шарко // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2020. Т. 67. № 4(41). С. 35–43.
16. **Довлатов И. М., Юферев Л. Ю., Рудзик Э. С.** Проведение испытаний двухкомпонентного рециркулятора для обеззараживания воздуха в сельскохозяйственных помещениях // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. № 2(31). С. 76–80.
17. **Luis López-Bellido, Jacques Wery, Rafael J. López-Bellido.** Indicators of energy efficiency of agricultural production and perspective directions of their growth // *Energy crops: Prospects in the context of sustainable agriculture*. Volume 60, October 2014. Pages 1–12.

18. **Тихомиров Д. А.** Рациональный выбор систем и технических средств теплообеспечения технологических процессов в животноводстве // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2017. № 3 (27). С. 73–78.
19. **Тихомиров Д. А., Тихомиров А. В.** Разработка экспертной программы выбора эффективной системы энергообеспечения сельхозобъектов // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. № 1(30). С. 75–84.
20. **Tikhomirov D., Vasilyev A.N., Budnikov D., Vasilyev A.A.** Energy-saving automated system for microclimate in agricultural premises with utilization of ventilation air // Wireless Networks. 2020. Т. 26, № 7. С. 4921–4928.
21. **Тихомиров Д. А., Хименко А. В., Кузьмичев А. В.** Напольный обогрев поросят с применением термоэлектрического теплового насоса // Техника и оборудование для села. 2021. № 9(291). С. 28–32.
22. **Tikhomirov D. A., Khimenko A. V., Trunov S. S., Kuzmichev A. V.** Energy-saving automated IR heater for calves. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled, 2021. 848(1), 012088.
23. **Tikhomirov D. A., Dudin S. N., Trunov S. S., Rastimeshin S. A., Tikhomirov A. V., Kuzmichev A. V.** Combined electric accumulation unit for air heating // Revista de la Universidad del Zulia. 2019. Т. 10. № 27. С. 168–183.
24. **Tikhomirov D. A., Trunov S. S., Kuzmichev A. V., Rastimeshin S. A., Shepovalova O. V.** Energy-efficient thermoelectric unit for microclimate control on cattlebreeding premises. Energy Reports. 2020. Т. 6. № Suppl. 6. pp. 293–305.
25. **Ковалев А. А., Панченко В. А., Ковалев Д. А.** Эколого-экономические предпосылки совместного применения биоэнергетических и теплофотоэлектрических установок // Агротехника и энергообеспечение. 2021. № 4(33). С. 61–68.
26. **Ковалев А. А., Ковалев Д. А., Григорьев В. С.** Энергетическая эффективность предварительной обработки синтетического субстрата метантенка в аппарате вихревого слоя // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30. № 1. С. 92–110.
27. **Гусаров В. А., Годжаев З. А.** Разработка газотурбинных установок малой мощности для использования на промышленных предприятиях // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 6. С. 27–33.
28. **Стребков Д. С.** Основы солнечной энергетики / Под ред. д.т.н. Безруких П. П. Изд.2-е, перераб. и доп. М. : ООО «Сам Полиграфист», 2021. 368 с.

УДК 66.047:532.5

Пётр Васильевич Акулич, доктор технических наук, главный научный сотрудник,
akul@hmti.ac.by

Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

Тепломассообмен в процессах распылительной конвективно-радиационной сушки

Аннотация. Приведены результаты моделирования и экспериментальных исследований тепломассообменных процессов и параметров работы опытной распылительной установки для дегидратации концентрированных растворов при конвективно-радиационном энергоподводе. Проанализировано влияние различных параметров на кинетику испарения капель. Показаны возможности интенсификации тепломассообменных процессов и увеличения производительности по испаренной влаге, влагонапряженности камеры наряду со снижением удельного расхода теплоты за счет воздействия инфракрасного излучения на область факела распыленной жидкости и создания режима встречных вертикальных потоков теплоносителя.

Ключевые слова: тепломассоперенос, распылительная сушка, конвективно-радиационная сушка.

Piotr V. Akulich, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Chief Researcher, *akul@hmti.ac.by*
A. V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus

Heat and mass transfer in processes of spray convective-radiation drying

Abstract. The results of modeling and experimental studies of heat and mass transfer processes and operating parameters of an experimental spray installation for dehydration of concentrated solutions with convective-radiation energy supply are presented. The effect of various parameters on the kinetics of droplet evaporation is analyzed. The possibilities of intensifying heat and mass transfer processes and increasing productivity in terms of evaporated moisture, moisture density of the chamber are shown along with a decrease in the specific heat consumption due to the effect of infrared radiation on the area of the atomized liquid flame and creating a regime of counter vertical coolant flows.

Keywords: heat and mass transfer, spray drying, convective-radiation drying.

В связи с насущной проблемой повышения эффективности технологических процессов и разработки новых перспективных технологий в последнее время расширяются исследования и находят развитие различные способы и технологии распылительной сушки растворов и суспензий. Это обусловлено тем, что данный метод сушки жидких материалов широко используется в промышленности и востребован в современных технологиях. Однако распылительные установки характеризуются низкой влагонапряженностью, большими габаритами и энергоемкостью. Вследствие этого находят развитие и применяются различные методы интенсификации и повышения эффективности, к которым можно отнести: совершенствование многостадийных режимов обработки, например, выпаривания и сушки или распылительной сушки и досушивания материала в кипящем и виброкипящем слоях; применение максимально возможных температур теплоносителя при недопущении негативного термического влияния на обезвоживаемый материал; создание активных гидродинамических режимов на основе струйных, закрученных и сильно нестационарных пульсирующих

потоков теплоносителя (камер пульсационного горения); повышение роли предварительных стадий подготовки теплоносителя и жидкого материала, максимальное увеличение концентрации растворенного вещества, подогрев и перегрев термостойких жидкостей; ввод мелкой фракции продукта в область распыления; применение эффективных способов и устройств диспергирования жидкостей, систем улавливания частиц из газодисперсного потока, автоматизированных систем управления, в том числе очистки поверхностей камеры, рекуперации теплоты и других мероприятий [1–8].

Отметим распылительные сушильные установки с интегрированным псевдоожиженным слоем, например, фирм «Ниро Атомайзер», «Ангидро» (Дания), «Вздухоторг» (Словакия). В этих установках сушка жидкости на первой стадии осуществляется распылительным способом, а на второй – в псевдоожиженном слое. Для нагрева воздуха применяются газовые теплогенераторы, позволяющие снизить расход энергии по сравнению с паровыми калориферами. Известны разработки двухступенчатых испарительно-сушильных агрегатов [2].

Опыт промышленной эксплуатации распылительной установки производительностью 300 кг/ч по испаренной влаге со струйным газораспределением, многосопловой форсункой и пневмотранспортированием высушенного продукта с помощью вращающегося сборника в производстве сухого яичного меланжа показал более высокую влагонапряженность (в 2–2,5 раза) сушильной камеры по сравнению с зарубежными аналогами [5, 7].

В результате активизации режима за счет создания встречных потоков значительно увеличивается производительность вихревой распылительной установки [7]. Сравнительный анализ показал, что при одном и том же температурном режиме влагонапряженность камеры может возрастать в несколько раз.

Контактно-сорбционный способ обезвоживания преимущественно микробиологических материалов заключается в перераспределении влаги за счет контактного влагообмена между компонентами образуемой смеси, в состав которой входит обезвоживаемая биомасса и сорбент-наполнитель [5]. Реализация технологии осуществляется путем одновременного диспергирования жидкого вещества и сорбента-наполнителя.

В распылительных установках фирм «Верех», «Pulse Combustion Systems» (США) интенсификация процесса достигается за счет применения камер пульсационного горения (КПГ). Они создают высокоамплитудные звуковые колебания вплоть до 180 дБ с частотой 125...200 Гц. Удельный расход теплоты составляет 3256 кДж/кг удаляемой влаги. Отмечается, что уровень шума не превышает 85 дБ [9].

В настоящее время вызывают интерес и находят развитие процессы низкотемпературной сублимационной сушки жидких материалов методом распыления и во взвешенном слое, причем вакуумной и атмосферной [10].

Развиваются исследования конвективно-радиационного подвода энергии в процессах распылительной сушки. В работе [11] рассматривается конвективно-радиационный способ сушки распылением, в котором поток излучения создается за счет нагрева стенок камеры или от нагревателя расположенного по оси цилиндрической камеры. Известна конструкция распылительной установки [12], в которой инфракрасные излучатели расположены на боковой поверхности между жалюзи, через которые подается дополнительный поток теплоносителя. В работах [13–15] приведены описание и некоторые исследования способа распылительной сушки, сущность которого состоит в комбинированном энерговоздействии на капли распыляемой жидкости конвекцией и инфракрасным излучением, направленным на область факела распыла.

С развитием численных методов и программных комплексов для оптимизации процессов и поиска путей повышения их эффективности все шире применяются различные методы моделирования. Они часто основываются на механике сплошных сред, отдельном описании движения фаз с учетом тепломассообмена дисперсных частиц, описании структуры потоков на основе идеализации их смешения. Однако множество факторов и взаимосвя-

занных физических явлений при сушке распылением усложняют как задачу, так и интерпретацию результатов. В частности, процесс сушки капель растворов и суспензий связан с образованием структуры твердой фазы или корочки на их поверхности, изменением физико-химических свойств и механизмов переноса [2, 14, 15]. Исследования в данном направлении развиваются, в частности, анализируются вопросы влияния циркуляции жидкости внутри капель на тепломассообмен особенно многокомпонентных жидкостей, закономерности испарения малых капель, влияние комбинированных энергвоздействий, в том числе конвективно-радиационного энергоподвода, сильно нестационарных термогидродинамических течений [2, 14–16].

В работе [17] приведены результаты исследования характеристик испарения одиночной неподвижной капли в условиях лучистого и конвективного нагрева.

Эффекты микровзрывной фрагментации капель жидкостей с многокомпонентным составом в условиях интенсивного нагрева установлены достаточно давно, но их активные исследования проводятся лишь в последние десятилетия. Отметим, что данные эффекты в определенной степени могут иметь место и в распылительных камерах при интенсивных режимах теплового воздействия.

Для описания фазовых превращений жидкостей используются различные подходы и модели, которые условно разделяют на две группы «диффузионные» и «кинетические» по доминирующему фактору влияния на интенсивность отрыва и последующего переноса молекул от поверхности раздела сред. Следует отметить, что наиболее исследованы процессы конвективного тепломассообмена капель.

В данной работе приводятся результаты исследования тепломассообмена и режимных параметров экспериментальной установки с подводом теплоты конвекцией и инфракрасным (ИК) излучением в условиях встречных потоков теплоносителя. Схема экспериментальной распылительной установки приведена на рисунке 1.

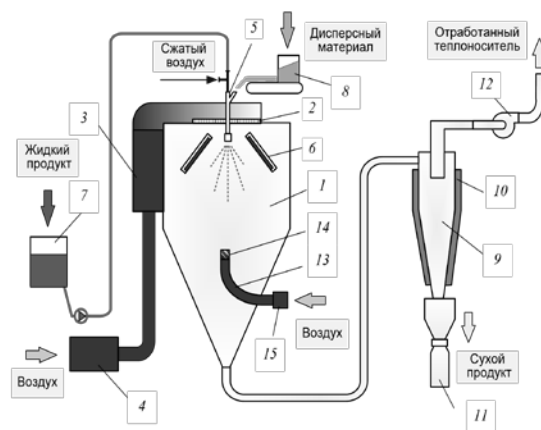
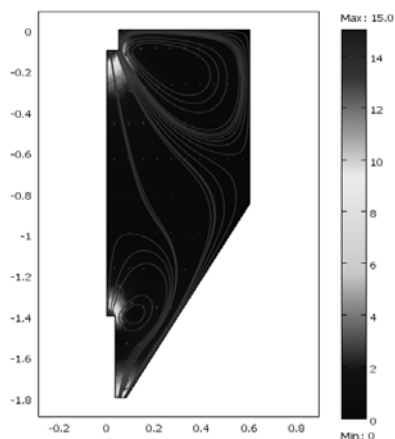


Рисунок 1 – Схема распылительной установки с конвективно-радиационным энергоподводом и встречными потоками теплоносителя:

1 – сушильная камера; 2 – газораспределительное устройство; 3, 4, 15 – электрические калориферы; 5 – распылитель; 6 – инфракрасные излучатели; 7 – емкость для раствора, 8 – дозатор дисперсного материала; 9 – циклон; 10 – водяная рубашка; 11 – сборник готового материала; 12 – вентилятор; 13 – трубопровод; 14 – завихритель

Отличительной особенностью установки является создание встречных вертикальных потоков теплоносителя, который вводится сверху через газораспределительное устройство 2 и снизу по трубопроводу 13 и завихритель 14. Жидкий материал распыливается форсункой 5. Факел жидких капель оказывается в зоне соударения потоков теплоносителя, на который фокусируется инфракрасное излучение от нагревателей 6, расположенных под углом к вертикальной оси.



**Рисунок 2 – Поле скоростей (поверхность),
линии тока и векторы скорости газовой фазы**

Выполнено моделирование тепломассообменных процессов в распылительной камере. Рассматривается движение монодисперсных частиц в несущей двухкомпонентной газовой фазе, состоящей из смеси сухого воздуха и водяного пара. Применяется метод динамики взаимопроникающих континуумов. Поскольку в данных аппаратах объемная концентрация частиц мала, пренебрегается взаимодействием и столкновением частиц между собой. Пренебрегается также теплообменом и трением на стенках камеры. Задача решается в двухмерной постановке в цилиндрической системе координат. Модель включает дифференциальные уравнения сохранения масс фаз, импульса и энергии. Количество теплоты, выделяемое в частицах материала при воздействии инфракрасного излучения определяется на основе закона Бугера.

Показано, что при встречных потоках теплоносителя и инфракрасном воздействии в периферийной зоне камеры образуется две области завихренности газового и дисперсного потоков (рисунок 2). Одна имеет место в верхней части камеры, а вторая – в нижней её части. При соударении потоков теплоносителя происходит их растекание в периферийную зону с образованием вихрей, которые вызывают подобные образования завихренности дисперсной фазы. В режиме прямоточного движения фаз, т.е. отсутствии нижнего ввода теплоносителя, завихренности газовой и дисперсной фаз наблюдаются только в верхней части камеры.

В области верхнего ввода теплоносителя, т. е. в зоне факела распыленной жидкости, происходит значительное снижение температуры теплоносителя (кривая 1, рисунок 3). В периферийной зоне и нижерасположенных сечениях камеры температура газовой фазы возрастает, что обусловлено воздействием ИК-излучения. Расчетные зависимости по уровню температур согласуются с полученными опытными данными. Температура частиц вне области факела распыла выше температуры мокрого термометра, что обусловлено влиянием лучистого потока. Распределение температуры несущей фазы значительно отличается от случая конвективного подвода теплоты (рисунок 3).

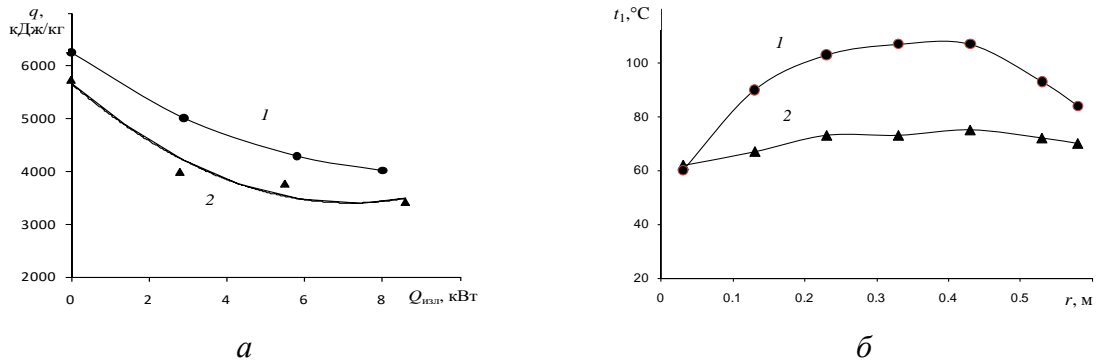


Рисунок 3 – Зависимости температуры газа в различных сечениях камеры:

а) расчетные: 1 – $z = 0,2$ м; 2 – $0,77$; 3 – $1,2$; 4 – $1,8$; б) экспериментальные при $z = -520$ мм; 1 – конвективно-радиационный энергоподвод со встречными потоками теплоносителя; 2 – конвективный подвод теплоты со встречными потоками

На основе численного моделирования тепломассообмена одиночных капель в условиях прямоточного и противоточного движения фаз, импульсных встречных потоков теплоносителя и воздействия инфракрасного излучения проанализировано влияние различных параметров, в частности, плотности потока инфракрасного излучения, скорости встречных потоков теплоносителя, частоты импульсов на кинетику испарения капель. Показаны возможности сокращения продолжительности испарения капель за счет лучистого воздействия и встречных потоков.

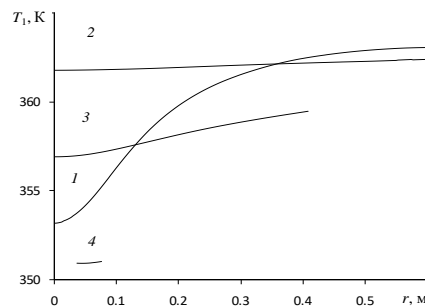


Рисунок 4 – Зависимость удельного расхода теплоты на испарение влаги от теплового потока, вводимого в распылительную камеру инфракрасными излучателями:

1 – прямоточное движение фаз; 2 – со встречными потоками теплоносителя

Определены параметры экспериментальной установки при сушке водного раствора NaCl с концентрацией 20 % при конвективном и конвективно-радиационном энергоподводах. Анализ полученных данных свидетельствует о возможности значительного увеличения производительности установки по испаренной влаге при конвективно-радиационном энергоподводе по сравнению с чисто конвективным способом. При температуре теплоносителя на входе в камеру 130 °C и выходе из нее 70 °C и установленной мощности излучателей 9 кВт производительность по испаренной влаге увеличивается примерно в три раза. При этом очень важно, что удельный расход теплоты уменьшается примерно в полтора раза, а влагонапряженность объема камеры возрастает в три раза. Показана возможность повышения энергоэффективности работы установки, которая достигается за счет интенсификации процессов тепломассообмена и сокращения удельного расхода теплоносителя. Зависимость удельного расхода теплоты на испарение влаги от теплового лучистого потока приведена на рисунке 4. В этом случае в качестве модельной жидкости использовалась вода.

Таким образом, на основе численного моделирования и экспериментальных исследований показана возможность интенсификации испарения диспергируемой жидкости и повышения эффективности распылительных установок за счет инфракрасного излучения, фо-

кусируемого на область факела распыла. В то же время следует иметь в виду, что эффективность данного способа зависит от множества факторов, в частности от интенсивности и фокусировки инфракрасного излучения, температуры теплоносителя, концентрации дисперсной фазы в потоке и других параметров.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ, грант № T22-008.

Библиографический список

1. Handbook of Industrial Drying. Fourth Edition. Edited by Arun S. Mujumdar. CRC Press. 2014. 1334 p.
2. **Долинский А. А., Малецкая К. Д.** Распылительная сушка: в 2-х томах. Т.1. Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения. Киев : Академперіодика, 2011. 376 с.
3. **Kudra T., Mujumdar A. S.** Advanced Drying Technologies. New York. Marcel Dekker, Inc. 2002. 459 p.
4. **Рудобахта С. П.** Современное состояние и направления развития теории и практики сушки // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы): сборник научных трудов Седьмой Международной научно-практической конференции (13–15 октября 2020 года). М. : ООО «Мегаполис», 2020. С. 13–22.
5. **Акулич П. В., Драгун В. Л., Куц П. С.** Технологии и техника сушки и термообработки материалов. Минск : Белорусская наука, 2006. 190 с.
6. **Акулич П. В., Акулич А. В.** Конвективные сушильные установки: методы и примеры расчета. Минск : Вышэйшая школа, 2019. 376 с.
7. **Тугова Э. Г., Куц П. С.** Сушка продуктов микробиологического производства. М. : Агропромиздат, 1987. 303 с.
8. Modern Drying Technology. Vol. 5: Process Intensification / E. Tsotsas and A. S. Mujumdar (Eds.). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, Germany. 2014. 372 с.
9. **Wu Z., Yue L., Li Z. et al.** Pulse Combustion Spray Drying of Egg White: Energy Efficiency and Product Quality. Food Bioprocess Technology. 2015. No. 8. pp. 148–157.
10. Разработка и моделирование технологии непрерывной распылительной сушки пробиотиков / Н. В. Меньшутина, М. Г. Гордиенко, А. А. Аванесова, Ю. В. Маковская // Тонкие химические технологии. 2008. Т. 3, № 6. С. 45–50.
11. **Richard Wisniewski.** Spray Drying Technology Review / NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA 9403 // 45th International Conference on Environmental Systems 12–16 July 2015. Bellevue, Washington. pp. 1–46.
12. **Феклунова Ю. С.** Разработка и научное обоснование способа распылительной сушки пюре из тыквы при конвективно-радиационном энергоподводе: Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 Феклунова Юлия Сергеевна. Астрахань. 2015.
13. **Акулич П. В.** Способ сушки жидких материалов. Патент № 18467 Республики Беларусь на изобретение // Официальный бюллетень. 2013. № 2. С. 23.
14. **Акулич П. В., Слижук Д. С.** Термогидродинамические процессы при распылительной сушке в условиях конвективно-радиационного энергоподвода // Теоретические основы химической технологии. 2021. Т. 55, № 1. С. 34–45.
15. **Акулич П. В.** Моделирование тепломассообмена капель при сушке перегретой жидкости в условиях комбинированного энергвоздействия // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92, № 2. С. 404–413.
16. **Терехов В. И., Терехов В. В., Шимкин Н. Е., Би К. Ч.** Экспериментальное и численное исследования нестационарного испарения капель жидкости // Инженерно-физический журнал. 2010. Т. 83, № 5. С. 829–836.
17. **Mezhericher M., Levy A., Borde I.** The Influence of Thermal Radiation on Drying of Single Droplet/Wet Particle // Drying Technology. 2008. Vol. 26. Issue 1. pp. 78–89.

УДК 664.8/.9

Геннадий Вячеславович Семёнов, доктор технических наук, профессор,
руководитель лаборатории сублимационной сушки, sgv47@yandex.ru

Ирина Станиславовна Краснова, кандидат технических наук,
старший научный сотрудник лаборатории сублимационной сушки, ira3891@mail.ru
Российский биотехнологический университет (Институт прикладной биотехнологии им.
Академика РАН И. А. Рогова)», Россия, Москва

Развитие технологии сублимационной сушки в современной России

Аннотация. В статье представлены данные о истории развития и современном состоянии применения технологии вакуумной сублимационной сушки в пищевой промышленности. Показаны перспективы создания крупных промышленных производств, базирующихся на современных образцах отечественного оборудования для сублимационной сушки. Приведены экономически целесообразные виды продукции для консервирования их сублимационной сушкой, в особенности для северных регионов страны.

Ключевые слова: вакуумная сублимационная сушка, сублимационная установка, сублимированные продукты, заводы сублимационной сушки.

Gennadiy V. Semenov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor, Head of the Freeze Drying Laboratory, sgv47@yandex.ru

Irina S. Krasnova, Ph. D. of Engineering Sciences, Senior Researcher at the Freeze Drying Laboratory, ira3891@mail.ru

Russian Biotechnological University (Institute of Applied Biotechnology named after Academician of the Russian Academy of Sciences I.A. Rogova), Russia, Moscow

Development of freeze-drying technology in modern Russia

Abstract. The paper presents data on the history of development and the current state of the application of vacuum freeze drying technology in the food industry. The prospects for the creation of large industrial facilities based on modern samples of domestic equipment for freeze drying are shown. Economically expedient types of products for their preservation by freeze-drying are given, especially for the northern regions of the country.

Keywords: vacuum freeze drying, freeze drying plant, freeze dried products, freeze drying plants.

В индустриально развитых странах технология вакуумной сублимационной сушки сегодня получает все более широкое применение в пищевой и фармацевтической промышленности. Наша страна одной из первых также начала ее использование. Уже в 1921 году русский инженер Лаппа-Старженецкий запатентовал способ сублимационной сушки пищевых продуктов. Для полноты картины обратимся к истокам развития этого направления. Весьма примечательно то обстоятельство, что в нашей стране вопросами теории обезвоживания различных материалов в вакууме, изучением тепло-массообменных характеристик объектов сушки, созданием технологии сушки, разработкой принципов конструирования сушильных устройств, включая системы подвода энергии, десублимации водяных паров и т.д., занимались сотни человек, работавших в учебных и научно-исследовательских институтах, на предприятиях оборонного комплекса. Доказательством актуальности и одним из результатов этих разносторонних усилий явилась защита порядка двадцати докторских и

трехсот кандидатских диссертаций, полностью или преимущественно посвященных проблемам сублимационной сушки в различных областях пищевой промышленности, фармацевтических производств и прикладной биотехнологии. В основном в этих работах исследовались процессы замораживания и последующее вакуумное обезвоживание.

В российской пищевой промышленности, начиная с 1955 г., уже были созданы предприятия по выпуску сублимированных фруктов и овощей, мяса, рыбы, творога. Первый из них – это цех сублимационной сушки в составе консервного завода Смычка в г. Ростове-на-Дону – на тот момент крупнейший в Европе. Очень важно, что были использованы только отечественные сублимационные установки! Был получен и опыт успешного использования сублимированных продуктов питания в особых условиях повышенных нагрузок. Например, начиная с 1964 г., в Молдавском НИИ пищевой промышленности были разработаны, изготовлены и использованы в полетах десятки рецептур продуктов питания для космонавтов. Примерно в этот же период, на Кишиневском консервном заводе было начато производство по оригинальным рецептурам сублимированных фруктов для экипажей подводных лодок. В летние месяцы 1973–1974 гг. отечественные сублимированные продукты были успешно применены для питания участников экспедиций в Арктику, организованных газетой «Комсомольская правда» для поиска следов российских первопроходцев на севере. В 1984 г. первая экспедиция советских альпинистов на Эверест также использовала комплекты специальных продуктов, высушенных сублимацией [1, с.6].

К сожалению, в годы перестройки практически все выпускающие сублимированные продукты питания предприятия были по разным причинам ликвидированы. Однако в настоящее время интерес к использованию технологии сублимационной сушки в пищевой промышленности России неуклонно растет. На наш взгляд, главной движущей силой этой тенденции является рост требований потребителей к уровню качества и срокам хранения пищевых продуктов, а также внедрение новых технологий, которые создаются на основе использования высококачественных сублимированных ингредиентов. Совокупность знаний, накопленных отечественными исследователями в этой области, отвечает мировому уровню.

Это уже реализовано при создании отечественных производств. Во-первых, это завод сублимационной сушки широкого ассортимента продукции преимущественно растительного происхождения (порядка ста наименований) в городе Боровске Калужской области, созданный и возглавляемый А. Н. Мазуриным. История завода начинается с 1990 годов. Сегодня на предприятии эксплуатируются уже двадцать две отечественные сублимационные установки производительностью до 340 кг сырья за цикл сушки. Установки эти изготавливаются самостоятельно персоналом предприятия! При этом конструкция каждого последующего изделия планомерно улучшается. Успешная деятельность завода отмечена Премией Правительства РФ за 2022 год. Еще одним примером служит действующий с 2014 года завод «Гала-Гала» в Волгограде. Завод ориентирован на производство сублимированных продуктов питания высокой кулинарной готовности и также оснащен отечественным сушильным оборудованием. Успешно используются крупные отечественные сублимационные установки с корпусами кубической формы на фирме «Ягоды Карелии». Профиль деятельности соответствует названию, продукция успешно реализуется на зарубежных рынках.

За последние пять-семь лет преимущественно в Крыму, Краснодарском крае, подмосковном регионе и прилегающих областях возникли по нашим оценкам порядка двадцати небольших производителей самых разных сублимированных пищевых продуктов и сырья для их производства, а также БАДов. На них преимущественно используются одна или несколько китайских установок производительностью 100...300 кг сырья за цикл сушки. Цель деятельности производств – найти и оценить свое место в этой новой для них сфере. При этом однозначно положительным результатом является все более масштабное вовлечение технологии сублимационной сушки в промышленность нашей страны.

Еще одним знаковым событием наших дней явился массовый выход на российский рынок сублимационных установок американской фирмы Harvest Right. Эти простые по конструкции и доступные по цене сушильные устройства производительность несколько килограммов сырья цикл быстро нашли массу поклонников. В интернете сформировались сообщества популяризаторов использования сублимационной сушки в быту. На этой волне и несколько отечественных производителей начали делать аналогичные сушилки. К слову, существенно надежнее и удобнее в использовании, нежели американский аналог. Большинство потребителей этих устройств пока только используют их в быту, но некоторые энтузиасты уже обратили взоры на более крупные изделия, задумались о развитии бизнесов.

В настоящее время появились новые машиностроительные предприятия, которые разработали конструкции, готовы изготавливать и уже изготавливают оборудование для сушки любой производительности. Лидером в этой сфере является фирма «СХ-Техника» в Казани. Недавний анализ уровня цен и технических параметров различных образцов сублимационных установок показал, что во многих случаях по показателю «цена–качество» оборудование фирмы «СХ-Техника» превзошло китайские изделия.

В завершение обозначим те направления использования сублимационной сушки, которые наиболее интересны и перспективны для промышленности. Во-первых, это развитие и масштабирование сушки растительного сырья. Доступная нам информация о состоянии мировых рынков свидетельствует о том, что лидерами производства и потребления являются клубника и малина. Также особое внимание зарубежных потребителей привлекают ягоды и грибы, особенно выращиваемые в естественных условиях. К нам начали поступать запросы о перспективах создания в северных регионах заводов, использующих эти виды сырья. Наглядным примером реализации таких проектов является создание в 2023 году крупного завода сублимационной сушки фирмой «Green Line» в г. Тюмени. Для этих целей фирмой «СХ-Техника» спроектированы и изготовлены восемь установок производительностью 500 кг сырья/цикл сушки каждая.

Большие перспективы имеет сушка готовых к употреблению блюд и наборов сублимированных продуктов для быстрого приготовления еды. Это общемировая тенденция развития структуры быстрого питания с применением продуктов высокого качества. В США успешно действуют крупные фирмы по производству таких продуктов. В одном из подмосковных городов ведется строительство завода сублимированных продуктов быстрого приготовления, также с использованием пятисоткилограммовых отечественных сублиматоров.

Хорошие экономические условия сформировались для производства сухих сублимированных кормов премиум класса для домашних животных и рыб, поскольку поступление зарубежных аналогов прекращено.

Анализ рынка продуктов питания для северных регионов страны позволяет увидеть обнадеживающие перспективы разработки специальных рецептур и создание масштабных производств сублимированных молочных продуктов – различных йогуртов, творогов, фруктово-молочных напитков и т. д. Достоинства сублимированных продуктов питания в наибольшей мере раскрываются в регионах с неразвитой структурой транспорта и хранения.

В заключение отметим, что несмотря на очевидный прогресс, темпы внедрения технологий сублимационной сушки в пищевую промышленность нашей страны пока недостаточны. По мнению авторов, необходима дальнейшая разносторонняя популяризация этих продуктов.

Библиографический список

1. Семёнов Г. В., Краснова И. С. Сублимационная сушка. М. : ТД ДеЛи, 2021. 326 с.

УДК 620.92:621.3:631.36

Алексей Николаевич Васильев, доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник, vasilev-viesh@inbox.ru

Дмитрий Александрович Будников, доктор технических наук,
главный научный сотрудник, Dimm13@inbox.ru

Алексей Алексеевич Васильев, кандидат техн. наук,
ведущий научный сотрудник, lex.of@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Россия, Москва

Методика согласования параметров волноводов в установках СВЧ-конвективной обработки зерна

Аннотация. Цель. Согласовать параметры источника СВЧ излучения с волноводом с щелевыми излучателями, чтобы получить максимум радиационной эффективности и минимум коэффициента стоячей волны. **Метод.** Достижение поставленной цели достигается за счёт определения расстояния между источником излучения и отражающей пластины в волноводе, при моделировании процесса. **Результат.** Максимум радиационной эффективности и минимум коэффициента стоячей волны при использовании волноводов с щелевыми излучателями. **Выводы.** Изменяя расстояние между источником СВЧ излучения и отражающей пластиной возможно обеспечить наилучшее согласование системы «магнетрон – волновод». Это возможно при моделировании процесса.

Ключевые слова: микроволновое поле, волновод, щелевой излучатель, радиационная эффективность, коэффициент стоячей волны.

Alexey N. Vasiliev, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor, Chief Researcher

Dmitry A. Budnikov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Chief Researcher

Alexey A. Vasiliev, Ph. D. of Engineering Sciences, Leading Researcher

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Russia, Moscow

Method for matching parameters of waveguides in units for microwave convective processing of grain

Abstract. Target. Coordinate the parameters of the microwave radiation source with a waveguide with slotted radiators in order to obtain the maximum radiation efficiency and the minimum standing wave coefficient. **Method.** The achievement of the set goal is achieved by determining the distance between the radiation source and the reflecting plate in the waveguide, when modeling the process. **Result.** Maximum radiation efficiency and minimum standing wave ratio when using waveguides with slotted radiators. **Conclusions.** By changing the distance between the source of microwave radiation and the reflecting plate, it is possible to ensure the best matching of the «magnetron – waveguide» system. This is possible when modeling the process.

Keywords: microwave field, waveguide, slot emitter, radiation efficiency, standing wave ratio.

Введение

Авторами разработана установка СВЧ – конвективной обработки зерна [1, 2], которая может быть использована для сушки зерна [3, 4], его обеззараживания [5, 6] и для предпосевной обработки семян [7, 8]. Установка собирается из модулей, которые вертикально располагаются друг над другом (рисунок 1а). Это позволяет обеспечивать заданную производи-

тельность установок используя требуемое количество модулей. Модуль состоит из корпуса, в котором установлены магнетроны, излучение которых направлено встречно друг другу (рисунок 1б).

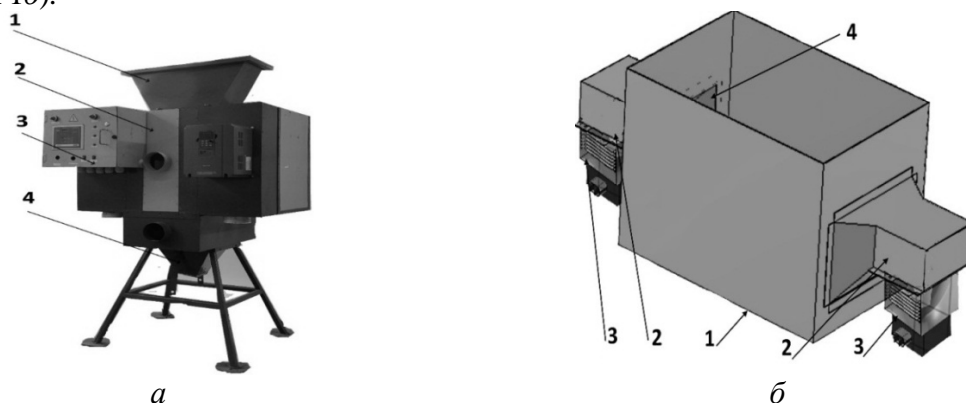


Рисунок 1 – Внешний вид установки и модуля для СВЧ – конвективной обработки зерна и семян:

1 – загрузочный бункер; 2 – СВЧ активная зона; 3 – блок управления;
4 – выгрузной бункер: а) внешний вид установки для СВЧ – конвективной обработки зерна;
1 – корпус модуля; 2 – рупорные излучатели; 3 – магнетроны;
4 – зона СВЧ излучения: б) модуль с рупорными СВЧ излучателями на базе которого построена установка

Распределение поля СВЧ в модуле зависит от конструкции рупорного излучателя (раскрыва излучателя A и длины рупора R , рисунок 2) и согласования источника излучения с излучателем.

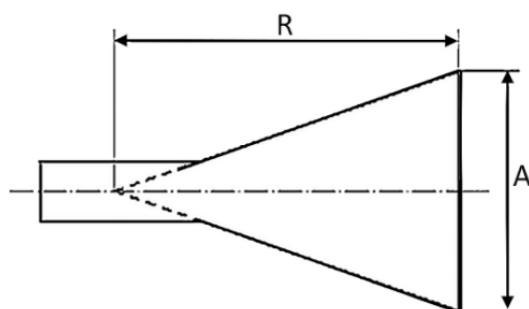


Рисунок 2 – Ключевые размеры рупорного излучателя

Основным показателем согласованности источника излучения и излучателя является коэффициент стоячей волны КСВ. КСВ – отношение наибольшего значения амплитуды напряжённости электрического или магнитного поля к наименьшему в линии передачи электромагнитного поля. В данном случае в волноводе. При $КСВ = 1$ волна чисто «бегущая», отражения нет. В этом случае вся энергия от магнетрона попадает в нагрузку (зерновой слой). Кроме того, важным показателем является радиационная эффективность излучателя $RadEff$.

Материалы и методы. Для определения данных параметров для конкретного излучателя использовали программу CST Microwave Studio [9], которая позволяет в результате моделирования получить распределение электромагнитного поля в зерновом слое и оценить степень согласования источника излучения с волноводом. В результате моделирования для рупорного излучателя с магнетроном работающем на частоте 2,45 ГГц получены следующие результаты (рисунок 3).

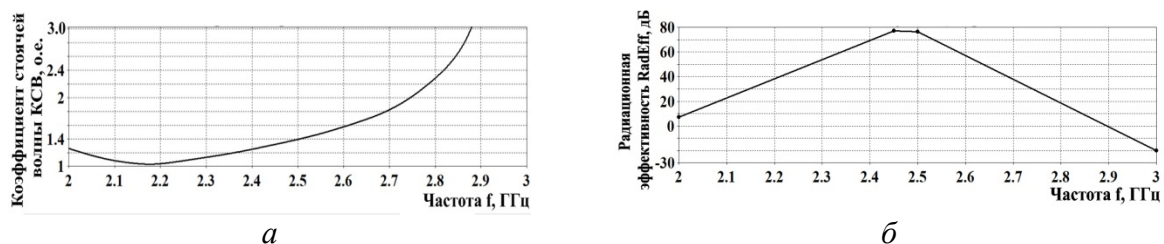


Рисунок 3 – Показатели согласованности для рупорного излучателя:

a – коэффициент стоячей волны (КСВ); b – радиационная эффективность

Из рисунка 3 видно, что КСВ для частоты магнетрона 2,45 ГГц составляет 1,3 при радиационной эффективности *RadEff* порядка 80 дБ. Эти показатели оцениваются как хорошие. Однако, если рассмотреть диаграмму направленности излучения в 3D виде (рисунок 4), то явно видны недостатки использования такого излучателя.

Из рисунка 4 видно, что имеется существенная неравномерность распространения электромагнитного поля на выходе рупорного излучателя. Это существенно сказывается на качестве обработки зерна в СВЧ – конвективной зоне. Поэтому авторами предложено использовать волноводы, которые располагаются внутри зернового слоя, а излучение в зерновой слой осуществляются через боковые поверхности, закрытые радиопрозрачным материалом [10].

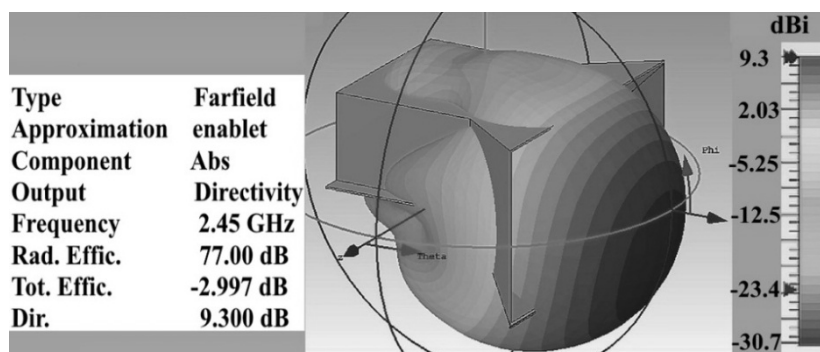


Рисунок 4 – Диаграмма направленности излучения в 3D виде

В модификации данной разработки использован волновод прямоугольного сечения 55×110 мм, длиной 400 мм с щелевыми излучателями, расположенными на широкой грани волновода (рисунок 5).

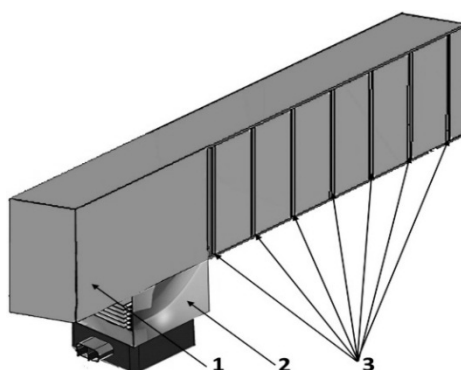


Рисунок 5 – Внешний вид прямоугольного волновода с щелевыми излучателями:

1 – волновод; 2 – магнетрон; 3 – щелевые излучатели, расположенные на расстоянии друг от друга на 0,5 длины волны

В СВЧ – конвективной зоне два волновода располагают неизлучающими сторонами друг к другу. Следующую пару волноводов располагают на таком расстоянии, чтобы обеспечить проникновение микроволнового поля в зерновой слой на заданную глубину. Поскольку влажность зерна, особенно при его сушке, может колебаться от 28 % до 14, то расстояние между парами волноводов в модулях может быть разным по высоте СВЧ – конвективной установки.

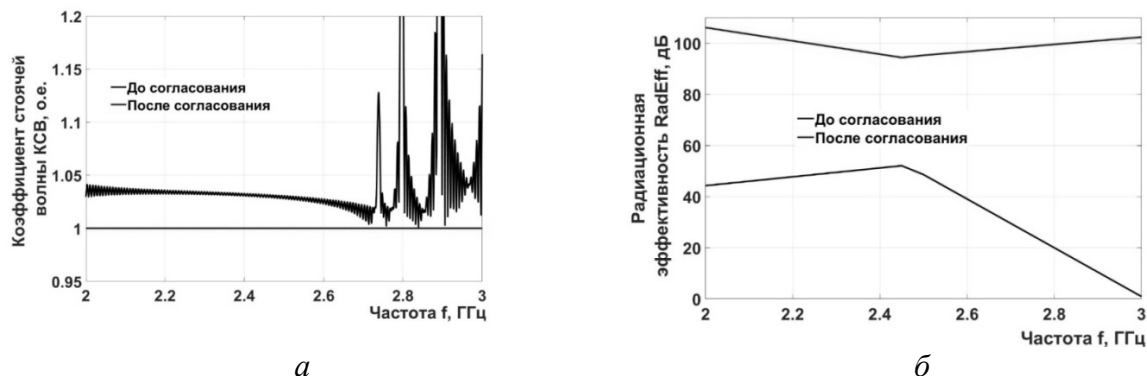


Рисунок 6 – Результаты согласования параметров волновода:

а – КСВ; *б* – радиационная эффективность

Для волновода, внешний вид которого представлен на рисунке 5 провели моделирование распределения поля СВЧ и получили данные, представленные в виде графиков на рисунке 6.

Из рисунка 6 видно, что по сравнению с рупорным излучателем КСВ прямоугольного волновода, располагаемого в зерновом слое выше (1,03 вместо 1,3), однако радиационная эффективность данного волновода ниже (55 дБ вместо 77 дБ). Поэтому провели согласование волновода, чтобы увеличить его радиационную эффективность. Для этого моделировали перемещение отражающей заглушки, расположенной за излучателем магнетрона, закрывающей выход поля СВЧ за пределы волновода. При первоначальном моделировании использовали расстояние от излучающей части магнетрона до заглушки 5 мм. При моделировании перемещения заглушки это расстояние изменялось до 100 мм с интервалом 1 мм.

Результаты моделирования (рисунок 6) позволили найти такое расположение заглушки, при котором КСВ стал равен 1, а радиационная эффективность повысилась до 94 дБ.

Полученные результаты позволили сформулировать методику согласования параметров волноводов с целевыми излучателями, размещаемых в зерновом слое для повышения их радиационной эффективности и понижения КСВ:

- определяют сечение волновода, которое подходит для частоты излучения магнетрона;
- в зависимости от технологических задач, которые необходимо решать с использованием установки СВЧ – конвективной обработки зерна, определяют длину волновода;
- на широкой стенке волновода прорезают целевые излучатели, расстояние между которыми должно составлять 0,5 длины волны для частоты магнетрона;
- перемещением отражающей заглушки, расположенной за излучателем магнетрона, добиваются минимального КСВ при максимальной радиационной активности.

Выводы

Проведенные исследования, с использованием программы для моделирования CST Microwave Studio, показали, что изменение расстояния между источником СВЧ излучения и отражающей заглушкой позволяет согласовать источник излучения и волновод с целевыми излучателями, чтобы получить максимальную радиационную эффективность и минимум коэффициента стоячей волны.

Библиографический список

1. Совершенствование процессов сушки и обеззараживания зерна в СВЧ-поле / А. Б. Оспанов, А. Н. Васильев, Д. А. Будников, Д. К. Карманов, А. А. Васильев, Д. Ш. Баймуратов [и др.]. Алматы : Нур-Принт, 2017. 164 с.
2. **Budnik D., Alexey N.** Vasilyev Development of a Laboratory Unit for Assessing the Energy Intensity of Grain Drying Using Microwave. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. pp. 93–99.
3. **Olatunde G. A., Atungulu G. G., Smith D. L.** One-pass drying of rough rice with an industrial 915 MHz microwave dryer: Quality and energy use consideration. *Biosystems engineering*. 2017. Vol.: 155 pp. 33–43.
4. **Atungulu G. G., Smith D. L., Wilson S. A., Zhong H., Sadaka S., Rogers S.** Assessment of one-pass drying of rough rice with an industrial microwave system on milling quality. *Applied engineering in agriculture*. 2016. Vol.: 32. edition: 3 pp. 417–429.
5. **Brodie G., Bootes N., Dunshea F., Leury B.** Microwave processing of animal feed: a brief review *transactions of the asabe*. 2019. Vol.: 62. edition: 3. pp. 705–717.
6. **Jian F. J., Jayas D. S., White N. D. G., Fields P. G., Howe N.** An evaluation of insect expulsion from wheat samples by microwave treatment for disinfestation. *Biosystems engineering*. 2015. Vol.130. pp. 1–12.
7. **Vadivambal R., Jayas D. S.** Changes in quality of microwave-treated agricultural products – a review. *Biosystems engineering*. 2007. Vol: 98. edition: 1. pp. 1–16.
8. **Киприянов Ф. А., Белозерова С. В.** Оценка влияния предпосевной обработки зерна микроволновым излучением на качество семян ячменя в условиях северной части чернозёмной зоны России // *Вестник АПК Верхневолжья*. 2022. № 2 (58). С. 91–97.
9. **Курушин А. А., Пластиков А. Н.** Проектирование СВЧ-устройств в среде CST Microwave Studio. М. : Издательство МЭИ, 2011. 155 с.
10. Патент РФ 2764168. Установка для сушки, обеззараживания зерна и предпосевной обработки семян. Васильев А. Н., Будников Д. А., Васильев А. А. Опубликовано: 13.01.2022 ; Бюл. № 2.

УДК 620.92:621.3:631.36

*Алексей Николаевич Васильев, доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник, vasilev-viesh@inbox.ru*

*Дмитрий Александрович Будников, доктор технических наук,
главный научный сотрудник, Dimm13@inbox.ru*

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Россия, Москва

Применение программного комплекса CST Microwave при проектировании установки СВЧ-конвективной тепловой обработки зерна

Аннотация. Цель. Представить процесс разработки конструкции установок СВЧ-конвективной тепловой обработки зерна с применением программных средств. **Метод.** Достижение поставленной цели достигается за счет численного моделирования отдельных узлов установок СВЧ-конвективной тепловой обработки зерновых материалов. **Результат.** Картина распространения электромагнитного поля в слое обрабатываемого материала. Оценка равномерности распространения электромагнитного поля в слое обрабатываемого материала. **Выводы.** Применение программных комплексов электродинамического моделирования позволяет: сократить время на разработку установки, оптимизировать конструкцию рабочих зон, волноводов и т.д. Для повышения качества вычислений необходимо создание и пополнение данных о диэлектрических свойствах сельскохозяйственных материалов.

Ключевые слова: электродинамическое моделирование, микроволновое поле, диэлектрические свойства, послеуборочная обработка зерна.

Alexey N. Vasiliev, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor, Chief Researcher

Dmitry A. Budnikov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Chief Researcher

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Russia, Moscow

Application of CST Microwave software for designing of a plant for microwave-convective thermal grain processing

Abstract. Background. To present the process of the development of plants for microwave-convective thermal grain processing by applying the software. **Method.** This objective is achieved by using the numerical modelling of individual units of plants for microwave-convective thermal grain material processing. **Result.** The picture of electromagnetic field spreading in the layer of processed material is presented. The article conducts an estimation of the electromagnetic field spreading uniformity in the processed material layer. **Conclusions.** Application of electrodynamic simulation software complexes makes it possible: to reduce time for development of plant; to optimize the design of working areas, waveguides, etc. It is necessary to create and complete data on dielectric properties of agricultural materials to improve the quality of calculations.

Keywords: electrodynamic modeling, microwave field, dielectric properties, post-harvest processing of grain.

Введение

Разработка и внедрение новой техники и оборудования для переработки сельскохозяйственных продуктов и материалов является сложной научно-технической проблемой, требующей решения ряда взаимосвязанных фундаментальных и прикладных задач, таких как: обоснование целесообразных областей применения электрофизических методов воздей-

ствия; комплексное изучение электрофизических и теплофизических свойств обрабатываемых материалов; исследование процессов тепло- и массообмена при комбинированном воздействии на материалы; разработки теоретических основ для обоснования режимов и расчета конструктивных параметров новой техники для производства и переработки сельскохозяйственных продуктов и материалов [1, 2].

В настоящее время эффективная разработка технологического оборудования для различных областей человеческой деятельности неотрывно связана с применением пакетов прикладных программных средств. Применение программных комплексов для прототипирования установок позволяет существенно сократить время, затрачиваемое на разработку оборудования, снизить затраты, возникающие на финальных стадиях разработки, определить оптимальные (рациональные) конструкции рабочих зон.

Разработка установок СВЧ-конвективной тепловой обработки зерна предполагает применение программных продуктов для моделирования волноводов, зон СВЧ-конвективной обработки, распространения электрического поля в слое обрабатываемого материала [3, 4]. Для реализации данного вида моделирования применяются следующие программные продукты: CST Microwave Studio, HFSS, AWR Microwave office, FEKO, Keysight EMPro и другие. С помощью программных средств электродинамического моделирования решаются следующие задачи: расчет параметров антенн и устройств СВЧ; моделирование распространения радиоволн; моделирование отражения от объектов; расчет эффективной поверхности рассеяния; электромагнитная совместимость; расчет нагрева устройств СВЧ; расчет поглощаемой мощности [5, 6].

Основные этапы моделирования следующие: задание геометрии задачи; задание источников; задание параметров моделирования (в том числе граничных условий); создание сетки; процесс моделирования; анализ результатов. Рассмотрим процесс проектирования в программном комплексе CST Microwave Studio.

Задание геометрии задачи производится встроенными средствами программы либо через импорт моделей проекта установки или отдельных ее узлов из файлов, выполненных в программах CAD-моделирования. На рисунке 1 представлены примеры моделей зон СВЧ-конвективного воздействия, загружаемых в систему электродинамического моделирования. В большинстве случаев не требуется детальная проработка, так как это приводит к увеличению времени, затрачиваемого на расчеты и модели существенно упрощаются.

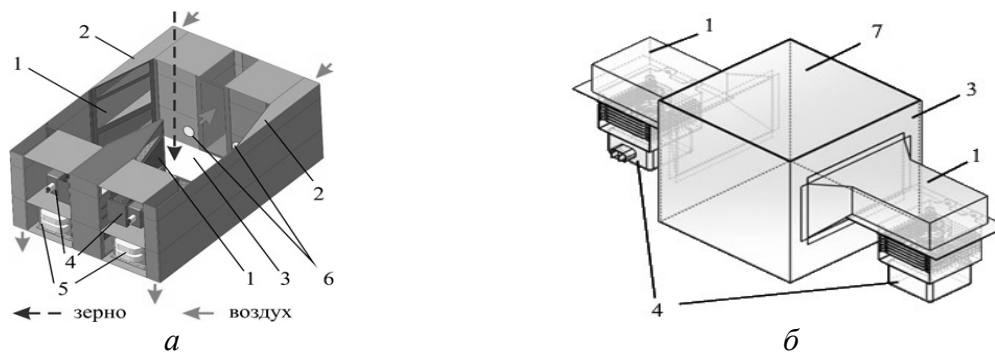


Рисунок 1 – Модели зон СВЧ-конвективного воздействия:

1 – волноводы; 2 – воздуховоды; 3 – продуктопровод; 4 – магнетроны; 5 – блоки питания;
6 – датчики косвенного определения влажности зерна; 7 – зерновой слой;

а – содержит четыре источника СВЧ и клиновидный волновод; б – содержит два источника СВЧ и ассиметричный рупорный волновод

Задание источников. При задании источников указываются параметры и направления подвода энергии. На рисунке 2 приведены модели с указанием портов подвода электромагнитной энергии.



Рисунок 2 – Задание портов при моделировании:

1 – волновод; 2 – продуктопровод; 3 – источники микроволновой энергии:
 а – модель зоны с указанием портов; б – векторы электромагнитного поля и направление распространения энергии

Задание параметров моделирования (в том числе граничных условий). При задании параметров указываются материалы из которых изготавливаются элементы установки из встроенной базы данных материалов; в случае, если свойств материалов, например, обрабатываемого материала, нет в базе, их можно внести в ручном режиме, задав как электрофизические, так и теплофизические свойства материалов. Провести моделирование возможно только после задания граничных условий и условий симметрии. Задание указанных условий происходит в раздел Boundary Conditions (рисунок 3). На рисунке 3а приведен пример задания граничных условий.

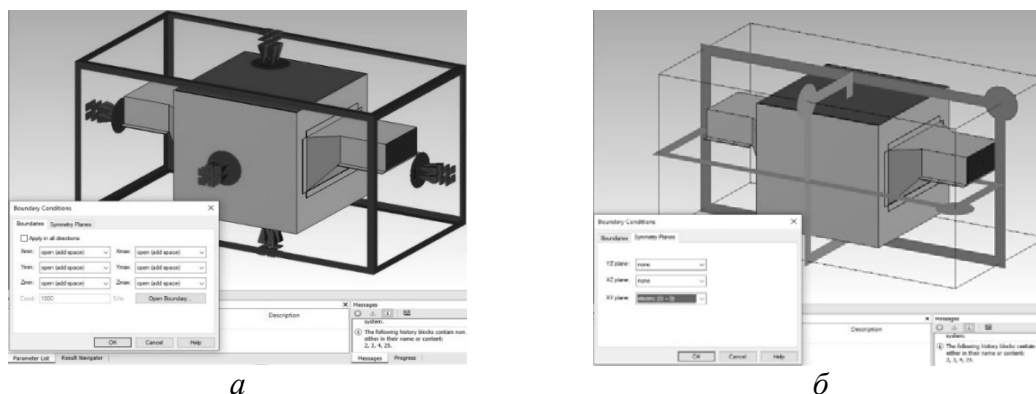


Рисунок 3 – Задание граничных условий:

а – задание граничных условий; б – задание условий симметрии

Особенно актуальным становится задание граничных условий (рисунок 3б) для установок, содержащих большое количество источников, материал с множественными переотражениями, но с симметричными источниками, например, симметричные по одной или нескольким плоскостям рупорные волноводы. Данные условия позволяют существенно сократить требуемое машинное время на проведение расчетов.

Для проведения моделирования следует задать типы необходимых полей (E-Field, H-Field, Currents, Power flow и т. д.) в закладке Field Monitor.

Создание сетки. Создание структурной сетки позволяет учесть особенности моделируемых структур при решении задач методом конечного интегрирования. Прежде всего, плотность разбиения структур влияет на усреднение свойств при учете искривленных границ трехмерных моделей. Существует несколько вариантов сеточной аппроксимации: стандартная, треугольная, неортогональная, техника идеальной аппроксимации границы (Perfect Boundary Approximation).

CST Studio позволяет провести автоматическую генерацию сетки, которая, в большинстве случаев, дает разбиение, достаточное для проведения качественного расчета. Также

можно реализовать поиск более лучшего разбиения, в данном случае будет реализовано более плотное разбиение в местах резких переходов.

Процесс моделирования. В процессе моделирования могут быть заданы один или несколько источников энергии, по которым будет производиться расчет. Соотношение максимальной энергии в структуре и пределом остановки моделирования также задается до начала моделирования (в поле Accuracy в dB). Установив точность – 40 дБ, при задании параметров моделирования, максимальная ошибка отбрасывания будет ограничена 1 %. Следует иметь в виду, что при проведении моделирования структура будет возбуждаться мощностью 1 Вт, а все полученные данные будут нормированы к этому уровню входной мощности. Далее производится моделирование. Длительность моделирования зависит от сложности моделируемых структур и мощности компьютера.

Анализ результатов. В результате моделирования получаем двух и трехмерные распределения искомых полей. После моделирования доступны результаты для каждого из источников при базовой мощности. В закладке Post-Processing можно провести пост обработку, в том числе комбинирование для результатов различных источников и установку требуемого уровня мощности. На рисунке 4 представлены примеры результатов моделирования рассеивания микроволновой мощности в зерне влажностью 17 % при 4-х источниках СВЧ мощности и прямоугольных волноводах с клиновидным выводом в слой. Формат представления может быть различным для удобства анализа и обработки.

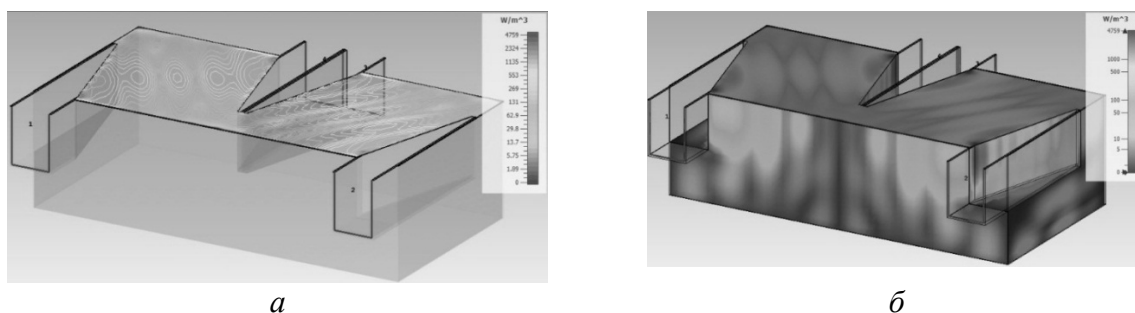


Рисунок 4 – Результаты моделирования рассеивания в материале мощности:
а – Isolines; б – Contour

Кроме графического представления, результаты можно выгрузить с требуемым шагом по всем осям для дальнейшей обработки и использования в моделировании, оптимизации конструкции и т. д. В случае необходимости оптимизации возможно использование параметризации при расчете.

По результатам отсеивающего эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Применение программных комплексов электродинамического моделирования позволяют ускорить разработку оборудования послеуборочной обработки сельскохозяйственных материалов.

2. При проектировании устройств оборудования послеуборочной обработки сельскохозяйственных материалов в программных комплексах электродинамического моделирования необходимо ограничить детализацию проработки моделей и материала. Представление материала следует организовать способом, позволяющим достоверно описать его поведение под действием поля.

3. Равномерность распространения поля в слое обрабатываемого материала может быть оценена как по визуальному представлению, так и при обработке выгруженных в датасет данных.

4. Для проведения достоверного моделирования, необходимо всестороннее исследование диэлектрических свойств сельскохозяйственных материалов, накопление.

Библиографический список

1. **Nelson S. O.** Dielectric Properties of Agricultural Materials and Their Applications. Academic Press. 2015. – 229 p.
2. **Будников Д. А.** Проектирование рабочих зон установок СВЧ-конвективной обработки зерна путем электродинамического моделирования / Д.А. Будников, А.Н. Васильев, А.А. Васильев. – Орёл: ООО ПФ «Картуш», 2022. – 348 с. – ISBN 978-5-9708-0996-9.
3. **Pattanayak S., Laskar S., & Sahoo S.** (2021). Microwave absorption study of dried banana leaves-based single-layer microwave absorber. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 13(2), 154-163. doi:10.1017/S1759078720000707.
4. **Rocio Sanchez-Montero, Pablo-Luis Lopez-Espi, Juan Antonio Martinez-Rojas.** Jesus Alpuente-Hermosilla and Cristina Alen-Cordero Numerical Study of Focusing Effects of Microwaves inside Wood Due to Timber Ring Structure. *Forests*. 2018. 9. 106. DOI <https://doi.org/10.3390/f9030106>.
5. **JP Rogelio, GL Abulencia, RG Baldovino, TAU Tolentino, RS. Alamon** Optimization of microwave vacuum dryer design parameters using CST microwave studio for low-moisture food application. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015. Vol 1. IMECS 2015. March 18–20. 2015. Hong Kong.* pp. 268–273.
6. **Будников Д. А.** Применение программных продуктов при моделировании СВЧ-обработки зерна // Информационные технологии, системы и приборы в АПК: материалы 7-й Международной научно-практической конференции «АГРОИНФО-2018» (Новосибирская обл., р.п. Краснообск, 24–25 октября 2018 г.) / Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Сибирский физико-технический институт аграрных проблем. Новосибирская обл., р.п. Краснообск, 2018. С. 149–153.

УДК 664.8.039.51

Алексей Алексеевич Завалий, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Общетехнические дисциплины», zavalym@mail.ru

Людмила Анатольевна Лаго, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Общетехнические дисциплины», luda_lago@mail.ru

Михаил Александрович Сергеев, кандидат технических наук, m-sergeev1@mail.ru

Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, Институт «Агротехнологическая академия» КФУ имени В. И. Вернадского, Республика Крым, Симферополь

Компактные устройства инфракрасной сушки высоковлажного сельскохозяйственного сырья

Аннотация. Разработаны энергоэффективные компактные устройства инфракрасной сушки, обеспечивающие высокую степень сохранения нативных свойств высоковлажного скоропортящегося сельскохозяйственного сырья. В устройствах реализуются импульсные режимы теплового воздействия инфракрасного излучения на сырьё, интенсифицирующие влагоудаление из сырья и способствующие повышению качества продукта сушки. Устройства предназначены для получения продуктов питания высокого качества и концентратов биологически активных веществ.

Ключевые слова: инфракрасная сушка, сельскохозяйственное сырьё.

Alexey A. Zavaliy, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of General Technical Disciplines, zavalym@mail.ru

Ludmila A. Lago, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department,
luda_lago@mail.ru

Mikhail A. Sergeev, Ph. D. of Engineering Sciences, m-sergeev1@mail.ru

V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Institute, Agrotechnological Academy, of V. I. Vernadsky KFU, Republic of Crimea, Simferopol

Compact infrared drying devices for highmoisture agricultural raw materials

Abstract. Energy-efficient compact infrared drying devices have been developed to ensure a high degree of preservation of the native properties of highly moist perishable agricultural raw materials. The devices implement pulsed modes of thermal exposure to infrared radiation on raw materials, intensifying moisture removal from raw materials and contributing to improving the quality of the drying product. The devices are designed to produce high-quality food products and concentrates of biologically active substances.

Keywords: infrared drying, agricultural raw materials.

Под компактными устройствами сушки сельскохозяйственного сырья мы понимаем камерные или шкафные устройства с разовой загрузкой от 5 до 100 кг сырья. Актуальность разработки энергоэффективных компактных устройств сушки сельскохозяйственного сырья определяется двумя факторами: сельскохозяйственное производство имеет территориально распределенный характер и сельскохозяйственное сырьё является скоропортящимся.

Энергоэффективность устройства определяется отношением полезности продукта сушки к затратам энергии для получения этого продукта. Полезность продукта сушки тем выше, чем больше в нем сохраняется нативных свойств сырья, его питательных и биологически активных веществ при обеспечении сохранности продукта длительное время.

К потенциально энергоэффективным устройствам сушки сельскохозяйственного сырья следует отнести устройства инфракрасной (ИК) сушки, сушка в которых позволяет сохранить не только питательные вещества, но и значительную долю биологически активных веществ и витаминов [5, 6], а инфракрасное излучение обладает выраженным антибактериальным и антимикотическим действием [1, 2].

В сельскохозяйственном сырье можно условно выделить сырьё с низкой влажностью, не превышающей 30 % (например, зерновые культуры, подсолнечник, сорго), и сырьё с высокой влажностью, достигающей 90 % (ягоды, фрукты, овощи, травы, мясо, рыба).

Применение компактных устройств актуально для высоковлажного сырья, подверженного быстрой порче, например, под действием биохимических процессов брожения или интенсивного действия патогенной микрофлоры [4]. Для предотвращения порчи сырья и предотвращения снижения качества продукта сушки сырьё необходимо перерабатывать непосредственно в местах его производства: в садах, ягодниках, парниках, теплицах, винодельнях. Не менее важным является изготовление продуктов сушки как высококачественных продуктов длительного хранения без специальных условий, продукты сушки являются ценным пищевым концентратом в условиях мобильности, например, на транспорте, в армии.

Наш опыт разработки и использования устройств сушки сельскохозяйственного сырья показывает, что чем меньше устройство, тем выше удельные затраты на получение единицы продукта сушки. Удельные характеристики малых устройств, например, удельная масса (отношение массы устройства к массе загрузки сырья), удельный объем (отношение объема устройства к объему загрузки сырья), удельная стоимость (отношение стоимости устройства к стоимости сырья) также выше, чем у больших устройств. В малых устройствах существенно труднее обеспечить равномерность теплового действия на сырьё и удаление из него влаги.

Нами для сушки высоковлажного скоропортящегося сельскохозяйственного сырья разрабатываются два типа камерных многоярусных компактных устройств инфракрасной сушки. В первом типе используются неподвижные «светлые» источники теплового излучения – линейные галогеновые лампы накаливания, оснащенные системами направленного зеркального отражения теплового излучения источников на поверхность сырья (смотри рисунок 1) [7]. Во втором типе используются подвижные «тёмные» источники теплового излучения – размещённые в трубках из кварцевого стекла нихромовые или фехралевые спиральные нагревательные элементы, установленные на подвижной каретке [10]. Каретка выполняет возвратно-поступательное движение, перемещая источники излучения вдоль поверхностей сетчатых лотков с сырьем (смотри рисунок 2). Схема ИК-излучателя устройства с подвижными источниками теплового излучения изображена на рисунке 3.

В этих устройствах осуществляется автоматическое регулирование температуры сырья в ходе сушки по релейному закону регулирования. Диапазон температуры, при которой осуществляется процесс сушки, составляет от 35 до 65 °С. Величина гистерезиса релейного регулирования составляет от 0,5 до 1,0 °С. Для измерения температуры сырья в ходе сушки используются термопары типа К (хромель-алюмель) с открытым спаем и электродами диаметром 0,3 мм. Рабочий спай термопары перед сушкой помещают в слой сырья, расположенного в серединной части лотка, размещённого в середине многоярусного устройства. Использование одной термопары для контроля процесса сушки в устройстве требует обеспечения высокого уровня равномерности теплового воздействия на сырьё и удаления из сырья влаги.

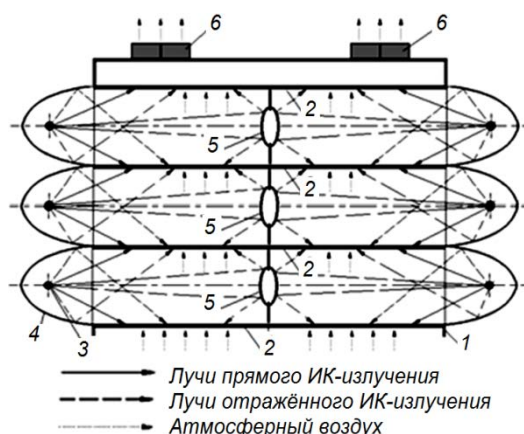


Рисунок 1 – Компактное устройство ИК-сушки с системой направленного зеркального отражения теплового излучения источников на поверхность сырья:

1 – корпус (камера) устройства; 2 – сетчатый лоток с сырьем; 3 – источник ИК излучения; 4 – боковой зеркальный отражатель; 5 – центральный отражатель; 6 – вытяжные вентиляторы

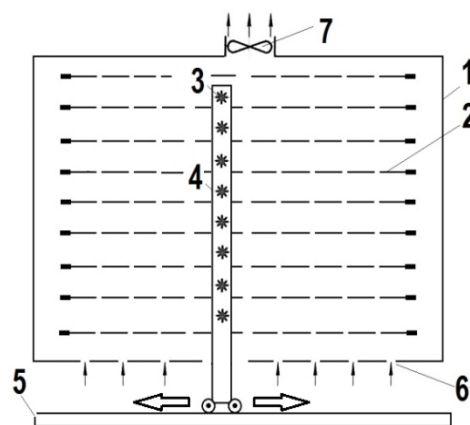


Рисунок 2 – Компактное устройство ИК-сушки с подвижными источниками теплового излучения:

1 – корпус (камера) устройства; 2 – сетчатый лоток с сырьем; 3 – источник ИК излучения; 4 – подвижная каретка; 5 – направляющие каретки; 6 – отверстия для забора воздуха в объем камеры; 7 – вытяжной вентилятор

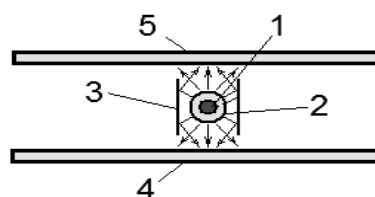


Рисунок 3 – Схема ИК излучателя устройства с подвижными источниками теплового излучения:

1 – спираль ИК излучателя; 2 – трубка из кварцевого стекла; 3 – зеркальный отражатель; 4 – нижний лоток; 5 – верхний лоток

Подключение инфракрасных излучателей каждого яруса к сети электрического питания автономно, что позволяет использовать только требуемое для выполняемого процесса сушки количество излучателей при неполной загрузке устройства сырьем.

Технические решения, реализованные в устройствах, направлены на достижение равномерности теплового воздействия на поверхность сырья и равномерности удаления из сырья влаги; конкурентоспособной по сравнению с конвективными устройствами сушки объемной производительности; более низких удельных энергетических затрат и более высокой степени сохранения биологически активных веществ в продукте сушки по сравнению с конвективными устройствами аналогичной производительности.

К недостаткам компактного устройства ИК сушки с системой направленного зеркального отражения теплового излучения следует отнести дороговизну используемого для изготовления отражателей и ограничивающих рабочий объем камеры поверхностей зеркально отражающего материала «аланод» [8], технологической сложности изготовления поверхностей отражателей, расстояния между лотками 100 мм, что больше, чем в камерах конвективной сушки. В устройстве с подвижными источниками теплового излучения осуществлена попытка устранить эти недостатки: в устройстве используется минимальное ко-

личество зеркально отражающего «аланода» в виде плоских линейных отражателей, размещённых у каждого источника теплового излучения (смотри рисунок 3, поз. 3). Благодаря размещению линейных источников теплового излучения между лотками, расстояние между лотками удалось уменьшить до 50 мм, повысив тем самым объёмную загрузку устройства в 2 раза. Выполненное нами экспериментальное сравнение равномерности теплового воздействия источников излучения на поверхность сырья показали, что в устройстве с подвижными источниками теплового излучения при температуре сырья в ходе сушки 50 °С максимальные отклонения температуры от среднего значения не превышают 2,117 °С, что меньше отклонений в устройстве с системой направленного зеркального отражения в 1,8–2,6 раза. Повышение степени равномерности температуры сырья на лотке является основным фактором повышения качества продукта сушки, увеличения сохранённого в продукте сушки биологического потенциала растительного сырья. Конструкция устройства с подвижными источниками теплового излучения имеет резервы увеличения равномерности распределения температуры сырья, например, за счёт повышения равномерности распределения нагревательной спирали инфракрасного излучателя в его кварцевой трубке [11].

В устройствах с системой направленного зеркального отражения и с подвижными источниками теплового излучения реализуются импульсные режимы теплового воздействия на поверхность сырья, благодаря релейному регулированию температуры сырья в ходе сушки и движению источников излучения над поверхностью сырья. Импульсное тепловое воздействие способствует созданию термодиффузионных потоков влаги из глубины слоя сырья к его поверхности, интенсифицируя тем самым процесс сушки [3, 9].

Изготовленные нами образцы камерных многоярусных компактных устройств инфракрасной сушки имеют загрузку от 15 до 90 кг высоковлажного сельскохозяйственного сырья, средняя потребляемая мощность устройств составляет от 2 до 10 кВт. Сушка выполняется при температуре сырья от 35 до 65 °С при тепловой нагрузке от 600 до 1250 Вт/м² площади лотка. Время сушки до влажности продукта 7...9 % составляет от 15 до 24 ч в зависимости от массы загрузки, размеров и исходной влажности сырья.

Затраты энергии на удаление 1 кг влаги из сырья составляют не более 1,6 кВт·ч для температуры сырья в ходе сушки 60 °С и не более 1,68 кВт·ч для температуры сырья в ходе сушки 50 °С [10]. Продукт сушки малины, полученный в устройстве инфракрасной сушки, сохраняет количество витамина С в 1,35–1,95 раза больше, чем продукт, полученный при сушке в конвективном устройстве. Энергоэффективность устройств инфракрасной сушки выше в 2,3–2,5 раза энергоэффективности устройств конвективной сушки сравнимой производительности [6].

Библиографический список

1. Получение и подготовка к хранению семян хвойных растений в устройстве инфракрасной сушки / С. С. Воложанинов, А. А. Завалий, В. В. Разумный, Д. Д. Волобуев, В. С. Воложанинова // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2021. № 27(190). С. 87–114.
2. Применение физических методов обработки для обеззараживания почвы / С. С. Воложанинов, Н. В. Алдошин, А. А. Завалий, Н. В. Воложанинова, С. В. Щиголев // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 6. С. 32–37.
3. Григорьев И.В., Рудобашта С. П. Импульсная инфракрасная сушка семян овощных культур // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина. 2009. № 4. С. 7–10.
5. Дементьева М. И., Выгонский М. И. Болезни плодов, овощей и картофеля при хранении. М. : Агропромиздат, 1988. 231 с.

6. Подбор и обоснование элементов технологии производства функциональных напитков из виноградной выжимки / Г. В. Ермолина, Д. В. Ермолин, А. А. Завалий, Л. А. Лаго, А. С. Помозова // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2017. № 12(175). С. 64–71.
7. **Завалий А. А., Лаго Л. А., Рыбалко А. С.** Сравнительная оценка энергоэффективности сушки ягод в компактных устройствах конвективной и инфракрасной сушки // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2020. Вып. № 22(185). С. 78–90.
8. **Завалий А. А., Снежкин Ю. Ф.** Разработка и тепловое моделирование устройств инфракрасной сушки термолабильных материалов. Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2016. 264 с.
9. Продукция АЛАНОД [Электронный ресурс]. URL: <http://аланод.рф/production/> (дата обращения 07.03.2023).
10. **Рудобашта С. П., Проничев С. А.** Организация осциллирующего режима ИК-сушки зерна с помощью информационно-измерительной и управляющей системы // Хранение и переработка сельхозсырья. 2006. № 8. С. 72–75.
11. **Сергеев М. А., Завалий А. А., Ермолин Д. В.** Экспериментальное определение характеристик процесса сушки сельскохозяйственного сырья в компактном устройстве динамической инфракрасной сушки // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2021. № 28(191). С. 75–84.
12. **Сергеев М. А.** Экспериментальное исследование равномерности нагрева высоковлажного растительного сырья в устройстве динамической инфракрасной сушки // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 177. С. 219–231.

СЕКЦИЯ 1.

ТЕОРИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СУШКИ, ТЕПЛОВЫХ И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 66.047:532.5

Акулич Пётр Васильевич, доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник, akul@hmti.ac.by

Слижук Дмитрий Станиславович, научный сотрудник, slizhuk@hmti.ac.by

Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

Тепломассоперенос в плотном слое растительных материалов при сушке в условиях циклического радиационно-конвективного энергоподвода

Аннотация. Обсуждаются результаты экспериментального исследования и численного моделирования тепломассопереноса в продуваемом плотном неподвижном и перемешиваемом слоях растительных материалов при конвективном и циклическом радиационно-конвективном подводах теплоты. На основе анализа кинетических зависимостей дегидратации растительных материалов показана возможность интенсификации процесса и сокращения его продолжительности. Сделано сравнение расчетных и опытных данных по кинетике процесса, свидетельствующее об их удовлетворительном соответствии и адекватности модели.

Ключевые слова: тепломассоперенос в плотном слое, конвективно-радиационная сушка, сушка растительных материалов.

Piotr V. Akulich, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor, Chief Researcher,
akul@hmti.ac.by

Dmitriy S. Slizhuk, Research Associate, slizhuk@hmti.ac.by

Institute of Heat and Mass Transfer named after A. V. Lykov of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Heat and mass transfer in a dense layer plant materials when drying under conditions cyclic radiation-convective energy supply

Abstract. The results of an experimental study and numerical simulation of heat and mass transfer in a blown dense fixed and stirred layers of plant materials under convective and cyclic radiative-convective heat supply are discussed. Based on the analysis of the kinetic dependences of the dehydration of plant materials, the possibility of intensifying the process and reducing its duration is shown. A comparison is made of the calculated and experimental data on the kinetics of the process, indicating their satisfactory agreement and the adequacy of the model.

Keywords: heat and mass transfer in a dense layer, convective-radiation drying, drying of plant materials.

В настоящее время пристальное внимание исследователей привлекает применение комбинированных импульсных, циклических и осциллирующих электромагнитно-конвективных способов обработки растительных материалов, а также режимов вакуумного или сублимационного воздействия в сочетании с микроволновым или инфракрасным (ИК) излучением [1–6]. Это вызвано прежде всего тем, что процессы обезвоживания растительных материалов, как правило, требуют значительных энергетических затрат, которые вызва-

ны необходимым расходом теплоты на фазовый переход влаги, высокой начальной влажностью материалов, их термолабильными свойствами, препятствующими использованию высоких температур обработки.

В работе [7] показано, что тепловая обработка ИК-излучением плодов (например, яблок, айвы и дыни) в начале сушки значительно интенсифицирует процесс обезвоживания, сокращает энергозатраты на 25...35 % и улучшает качество конечного продукта, приводит к уменьшению потерь витаминов.

Результаты исследования осциллирующей инфракрасной сушки семян овощных культур (огурцов, лука) свидетельствуют о стимуляции семян, которая заключается в увеличении их энергии прорастания и всхожести [8].

В работах [9, 10] отмечается эффективность метода инфракрасной сушки для фруктов и овощей с высоким содержанием воды, в том числе, таких как киви, чеснок, различные разновидности грибов, овощи, фрукты, морепродукты. Указывается, что исследования в этом направлении сосредоточены преимущественно на оптимизации технологии сушки за счет изменения времени процесса и температуры, комбинировании различных способов энергоподвода для обеспечения высоких качественных показателей продуктов.

В работе [11] представлен обзор литературы за последние пять лет, посвященный разработке технологий сушки (микроволновой, инфракрасной, ультразвуковой) для фруктов и овощей. Подчеркивается, что эти методы сушки обеспечивают более высокую скорость процесса, термическую эффективность и позволяют получать высушенные продукты улучшенного качества (например, цвета, аромата, текстуры и сохранения питательных веществ) по сравнению с традиционной сушкой горячим воздухом.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1. Она состоит из теплоизолированной камеры 7, расположенной на газоходе 10, калорифера 2 и вентилятора 1. В камере 7 расположен источник инфракрасного (ИК) излучения 5 (керамический нагреватель с отражателем в форме трапеции), высоту положения которого можно изменять относительно газохода 10.

В качестве излучателя использовался инфракрасный керамический нагреватель марки ИКН-101 мощностью 1 кВт (ООО «Номакон», Беларусь).

В нижней части камеры над газоходом располагается сетчатый контейнер 3, в который загружается исследуемый материал в виде дисперсного слоя. Контейнер в процессе дегидратации периодически извлекается из камеры и взвешивается на электронных весах. Для реализации режима циклического воздействия инфракрасного излучения на исследуемый материал камера 7 оборудована поворотной заслонкой 4, которая с отражателем позволяет на короткое время исключать воздействие лучистого потока на материал. Конструкция установки позволяет осуществлять продувку теплоносителя через дисперсный слой, либо создавать продольный обдув слоя или образцов материала.

Воздух подается вентилятором 1 и подогревается в калорифере 2. Расход теплоносителя (нагретого воздуха) может регулироваться, обеспечивая скорость v фильтрации или обдува от 0,3 до 3,0 м/с. Температура теплоносителя t_1 задается в диапазоне 30...150 °С и автоматически поддерживается терморегулятором. Регистрация температур в камере (теплоносителя и материала) осуществляется в режиме реального времени посредством компьютера.

Проанализированы результаты численного моделирования тепломассопереноса в плотном неподвижном и перемешиваемом слоях при дегидратации в условиях циклического радиационно-конвективного подвода теплоты. Математическая модель основана на уравнениях сохранения массы газовой фазы, фильтрации, переноса теплоты и влаги в фазах [5]. Фильтрация газа в дисперсном слое описывается уравнением Дарси. Перенос влаги в частицах материала учитывается в определении коэффициента массоотдачи. Последний рассчитывается как коэффициент массопередачи, учитывающий сопротивление массоотдачи с поверхности частиц и внутридиффузионное сопротивление переносу влаги. Аналогично учи-

тывается термическое сопротивление переносу теплоты внутри частиц. Учитывается энергия связи влаги с материалом в определении удельной теплоты испарения влаги с использованием уравнения Клапейрона-Клаузиуса совместно с уравнением изотермы десорбции. Поглощение электромагнитного излучения в дисперсном слое описывается уравнением Бутера. Получено численное решение для нестационарного двухмерного случая.

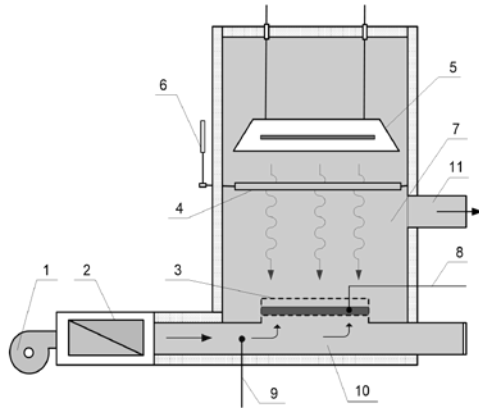


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки с радиационно-конвективным энергоподводом:

- 1 – вентилятор; 2 – электрокалорифер;
3 – сетчатый контейнер с образцом материала; 4 – заслонка;
5 – инфракрасный излучатель;
6 – управление заслонкой;
7 – теплоизолированная камера;
8 и 9 – термопреобразователи;
10 – нижний газоход; 11 – верхний газоход для отвода отработанного теплоносителя

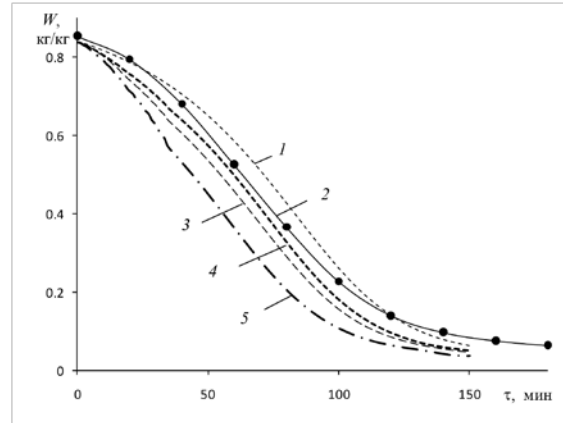


Рисунок 2 – Кинетические зависимости дегидратации частиц картофеля при циклическом радиационно-конвективном энергоподводе ($h = 30$ мм, размеры частиц $\sim 7,4 \times 7,4 \times 7,4$ мм):

- 1 – конвективная сушка при $t_1 = 60$ °С; $v \approx 0,5$ м/с; $D_{эф} = 10^{-9}$ м²/с; $\lambda_{эф} = 0,18$ Вт/(м·К); 2 – экспериментальная зависимость при параметрах кривой 1; 3 – время $\sim 0...20$ мин, $(\tau_{изл} + \tau_{п}) \times n: (2+1) \times 6; \sim 20...40$ мин: $(1+2) \times 6$; далее конвективный режим при $t_1 = 60$ °С, $q_0 = 8,8$ кВт/м², $D_{эф} = 10^{-9}$ м²/с, $\lambda_{эф} = 0,18$ Вт/(м·К); 4 – $D_{эф} = 10^{-7}$ м²/с, $\lambda_{эф} = 18$ Вт/(м·К), $q_0 = 8,8$ кВт/м², остальные параметры соответствуют кривой 3; 5 – $q_0 = 7,6$ кВт/м², остальные параметры соответствуют кривой 4

Установлено, что перемешивание слоя, т. е. увеличение эффективных коэффициентов диффузии $D_{эф}$ и теплопроводности $\lambda_{эф}$, при постоянной плотности лучистого потока q_0 приводят к некоторому снижению скорости процесса (кривая 4, рисунок 2). Однако перемешивание слоя позволяет значительно увеличить плотность лучистого потока, предотвратить перегрев верхнего слоя материала и существенно интенсифицировать процесс удаления влаги (кривая 5).

При перемешивании слоя заметно понижается уровень температуры частиц в верхней области в период лучистого воздействия, что дает возможность для повышения плотности потока излучения. Так, увеличение плотности потока q_0 в два раза, приводит к примерно таким же максимальным значениям температуры частиц (рисунок 3б), как и для практически неподвижного слоя (рисунок 3а). Отличие состоит в возрастании равномерности распределения температуры частиц по высоте h слоя.

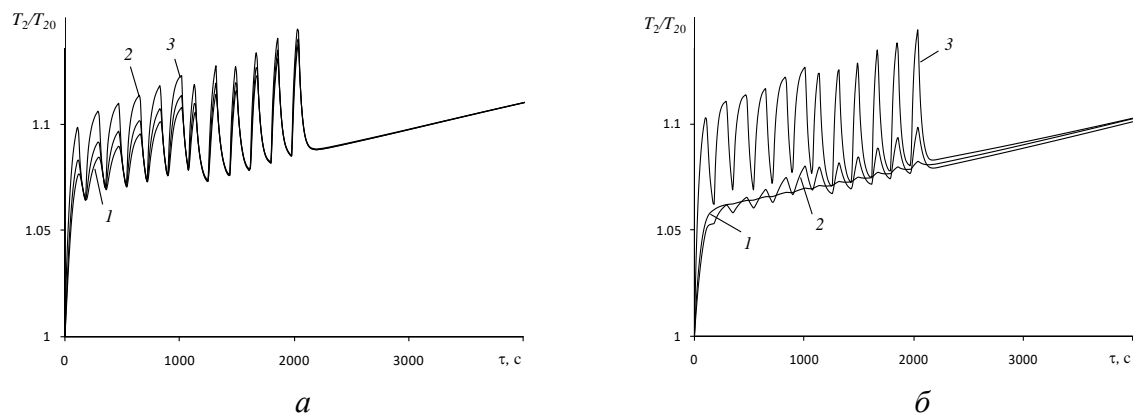


Рисунок 3 – Температурные зависимости частиц в различных сечениях слоя:
 $\sim 0 \dots 20$ мин, $(\tau_{\text{изл}} + \tau_{\text{п}}) \times n$: $(2+1) \times 6$; $\sim 20 \dots 40$ мин: $(1+2) \times 6$, далее конвективный режим при $t_1 = 60^\circ\text{C}$: 1 – $y = 0$; 2 – $y = 0,5h$; 3 – $y = h$: а – $q_0 = 8,8 \text{ кВт/м}^2$, $D_{\text{эф}} = 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda_{\text{эф}} = 0,18 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; б – $q_0 = 17,6 \text{ кВт/м}^2$, $D_{\text{эф}} = 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda_{\text{эф}} = 18 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$

При этом существует возможность перейти к непрерывному облучению слоя в начале процесса, увеличить плотность лучистого потока примерно в полтора раза, практически не превышая максимальных значений температуры частиц по сравнению с неподвижным слоем. Это способствует интенсификации тепломассообменных процессов, возрастанию скорости дегидратации и заметному сокращению продолжительности процесса.

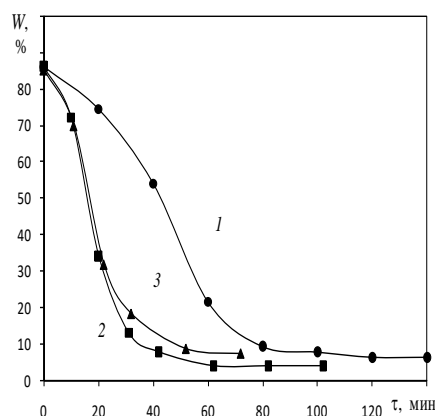


Рисунок 4 – Кинетические зависимости сушки яблок нарезанных в виде пластин при конвективном и циклическом радиационно-конвективном энергоподводах:
толщина пластин $\sim 3,5$ мм; 1 – конвективная сушка при $t_1 = 70^\circ\text{C}$, m ; $v \approx 0,9 \text{ м/с}$; 2 – время 0–11 мин, $(\tau_{\text{изл}} + \tau_{\text{п}}) \times n$: $(3+2) \times 1$, $(1+2) \times 2$, $t_1 = 70^\circ\text{C}$; 11–22 мин: $(1+2) \times 2$, $(0,5+2) \times 2$, далее конвективный режим при $t_1 = 70^\circ\text{C}$, сорт яблок «Чемпион»; 3 – режим соответствует кривой 2, сорт яблок «Редпринц»

Распределения влагосодержания в различных сечениях слоя свидетельствуют о практически равномерной концентрации влаги по высоте слоя.

Выполнены исследования кинетики сушки яблок, нарезанных в виде пластин толщиной 3,5 и 6 мм. На рисунке 4 отчетливо видно, что радиационно-конвективный подвод теплоты значительно увеличивает скорость удаления влаги, особенно свободной и слабосвязанной. Кривые кинетики при комбинированном энергоподводе приведены для двух сортов, из которых следует незаметная разница в скорости и продолжительности процесса.

На основе численного моделирования и экспериментальных исследований показано, что циклический радиационно-конвективный подвод теплоты позволяет в значительной степени интенсифицировать перенос влаги по сравнению с чисто конвективным способом сушки. Увеличение высоты неподвижного слоя при инфракрасном облучении слоя приво-

дит к существенному росту неравномерности распределения температуры и влажности. Для предотвращения перегрева верхней области слоя, повышения равномерности обработки частиц и качества продукта целесообразно осуществлять перемешивание слоя. При этом появляется возможность увеличить плотность лучистого потока и время его воздействия на слой. Показана возможность интенсификации процесса сушки за счет циклического комбинированного энергоподвода и перемешивания слоя.

Библиографический список

1. **Акулич П. В.** Расчеты сушильных и теплообменных установок. Минск : Беларуская навука, 2010. 443 с.
2. **Акулич П. В., Акулич А. В.** Конвективные сушильные установки: методы и примеры расчета. Минск : Вышэйшая школа, 2019. 376 с.
3. **Акулич П. В., Слижук Д. С.** Теплогазоперенос в неподвижном дисперсном слое растительных материалов при комбинированном энергоподводе // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93, № 4. С. 800–808.
4. **Нестеров А. В.** Промышленная сушка: монография. СПб. : Лань, 2021. 304 с.
5. **Акулич П. В., Слижук Д. С.** Тепломассоперенос в плотном слое при дегидратации коллоидных и сорбционных капиллярно-пористых материалов в условиях нестационарного радиационно-конвективного энергоподвода // Теоретические основы химической технологии. 2022. Т. 56, № 2. С. 148–157.
6. Математическое моделирование и оптимизация процесса непрерывной сушки термолабильных материалов / Н. Н. Сороковая, Ю. Ф. Снежкин, Р. А. Шапарь, Р. Я. Сороковой // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92, № 5. С. 2218–2228.
7. **Снежкин Ю. Ф., Боряк Л. А., Избасаров Д. С.** Энергосбережение и интенсификация процесса сушки импульсным ИК-облучением // Промышленная теплотехника. 2001. Т. 23, № 4-5. С. 90–94.
8. **Рудобашта С. П., Зуева Г. А., Зуев А. И.** Осциллирующая инфракрасная сушка и стимуляция семян // Тезисы докладов и сообщений XV Минского межд. форума по тепло- и массообмену 23–26 мая 2016. Минск, 2016. – Т. 3. С. 191–195.
9. **Zartha Sossa J. W, Orozco G. L, García Murillo L. M, Peña Osorio M. and Sánchez Suarez N.** // Infrared Drying Trends Applied to Fruit. Front. Sustain. Food Syst. 2021. 5:650690. doi: 10.3389/fsufs.2021.650690.
10. **Sakare P., Prasad N., Thombare N., Singh R. and Sharma S.C.** Infrared Drying of Food Materials: Recent advances // Food Engineering Reviews. 2020. V. 12. pp. 381–398. doi.org/10.1007/s12393-020-09237-w.
11. **Li K., Zhang M., Mujumdar A.S. and Chitrakar B.** Recent developments in physical field-based drying techniques for fruits and vegetables // Drying Technology. 2019. V. 37. Issue 15. pp. 1954–1973. doi: 10.1080/07373937.2018.1546733.

УДК 66.011

Анастасия Валериевна Фролкова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и технологии основного органического синтеза», frolkova_nastya@mail.ru

Михаил Михайлович Сибирцев, аспирант кафедры «Химия и технологии основного органического синтеза», sibirtsev.98@mail.ru

Алла Константиновна Фролкова, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия и технологии основного органического синтеза», frolkova@gmail.com

«Институт тонких химических технологий имени М. В. Ломоносова
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования МИРЭА – Российский технологический университет», Россия, Москва

Исследование зависимости энергопотребления схемы разделения смеси циклогексан – вода – циклогексанон от ее исходного состава

Аннотация. Целью настоящей работы является исследование зависимости энергозатрат схемы разделения, основанной на предварительном расслаивании, от состава исходной смеси циклогексан-вода-циклогексанон с использованием математического моделирования. Установлено влияние содержания воды в исходной смеси на величины материальных потоков и параметры работы аппаратов. Показано, что при разделении смеси разного состава энергозатраты схемы практически не зависят от значений флегмовых чисел, определяющий вклад вносят величины дистиллятных потоков.

Ключевые слова: фазовая диаграмма, схема разделения, расслаивание, ректификация, энергозатраты.

Anastasia V. Frolkova, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department Chemistry and Technologies of Basic Organic Synthesis, frolkova_nastya@mail.ru

Mikhail M. Sibirtsev, Postgraduate Student of the Department of Chemistry and Technologies of Basic Organic Synthesis, sibirtsev.98@mail.ru

Alla K. Frolkova, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor, Head of the Department Chemistry and Technologies of Basic Organic Synthesis, frolkova@gmail.com

Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

The study of the dependence of separation flowsheet energy consumption on the original composition for cyclohexane – water– cyclohexanone mixture

Abstract. The purpose of the work is to study the dependence of the separation flowsheet based on preliminary splitting energy consumption on the cyclohexane-water-cyclohexanone mixture original composition with the mathematical modeling use. The influence of the original mixture water content on the material flows values and the apparatus operation parameters is illustrated. It is shown that when separating mixtures with different compositions, the flowsheet energy consumption practically does not depend on the values of reflux ratios, the determining contribution is made by the distillate flows.

Keywords: phase diagram, separation flowsheet, splitting, distillation, energy consumption.

Ректификация широко используется для разделения жидких смесей химической и смежных отраслей промышленности. Данный процесс требует значительных энергозатрат и

поиск путей их снижения является актуальной задачей [1, с.227]. В зависимости от особенностей парожидкостного равновесия каждая из возможных схем разделения, как правило, характеризуется своей областью работоспособности на фазовой диаграмме. В рамках этой области энергозатраты на разделение смеси разного состава могут значительно отличаться.

Целью настоящей работы является исследование зависимости энергозатрат схемы разделения конкретной структуры от состава исходной смеси. В качестве объекта выбрана промышленная смесь циклогексан (ЦГ) – вода (В) – циклогексанон (ЦГОН) (производство циклогексанона [2, с.657]). Рассматривается схема полного разделения смеси на чистые компоненты, основанная на сочетании предварительного расслаивания и ректификации. Методом исследования является вычислительный эксперимент в программном комплексе AspenPlus V.10.0. Для расчета фазового равновесия и процесса ректификации выбрана модель локальных составов Non Random Two Liquid. Параметры бинарного взаимодействия, позволяющие воспроизводить равновесия жидкость-пар, жидкость-жидкость-пар, жидкость-жидкость с относительной ошибкой, не превышающей 3 %, выбраны из базы данных программного комплекса.

При давлении 101,3 кПа в системе присутствуют два гетероазетропа со следующими характеристиками (содержание воды, мол. доли; температура кипения, °C): В-ЦГ (0,699; 69,49) и В-ЦГОН (0,895; 97,2), которые порождают на диаграмме обширную область двухфазного расслаивания открытого типа. В силу этого составы смесей, различающиеся в зависимости от условий проведения реакции, могут принадлежать данной области, что позволяет на первом этапе разделения использовать предварительное фракционирование смеси за счет самопроизвольного расслаивания.

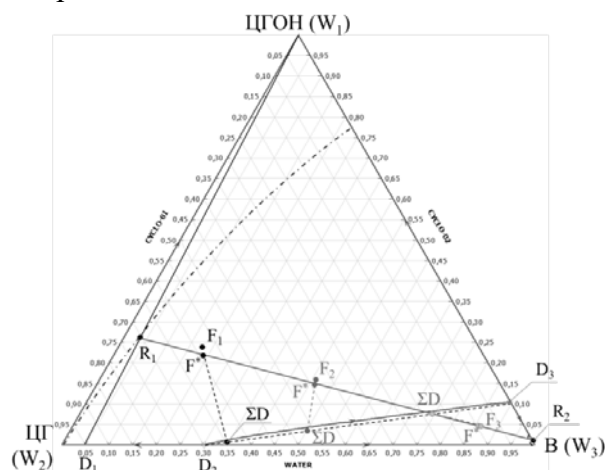


Рисунок 1 – Фазовая диаграмма системы циклогексан (ЦГ) – вода (В) – циклогексанон (ЦГОН) и расположение линий материальных балансов

Для решения поставленной задачи нами выбраны исходные составы (в мол. долях) смесей F_1 ($X_{\text{ЦГ}} = 0,585$; $X_{\text{ЦГОН}} = 0,243$), F_2 ($X_{\text{ЦГ}} = 0,381$; $X_{\text{ЦГОН}} = 0,159$) и F_3 ($X_{\text{ЦГ}} = 0,094$; $X_{\text{ЦГОН}} = 0,045$), расположенные в области расслаивания (рисунок 1, границы области выделены штрихпунктирной линией).

Рассматриваемая структура схемы разделения, содержащая сепаратор жидкость-жидкость и три ректификационные колонны, приведена на рисунке 2. Исходная смесь (F) после смешения с рецикловым потоком (смесь состава F^*) подается в сепаратор жидкость-жидкость (S). Органический слой направляется в колонну K1, в кубе которой выделяется ЦГОН, в дистилляте (D_1) – бинарная смесь ЦГ–В. В колонне K2 происходит выделение ЦГ в кубе, при этом состав дистиллята (D_2) близок к составу азеотропа ЦГ–В. Водный слой, содержащий следы ЦГ, из сепаратора S подается в колонну K3 для очистки воды; состав дистиллята (D_3) близок к азеотропу В–ЦГОН. Суммарный рецикл (ΣD) лежит на линии, соеди-

няющей точки D_2 и D_3 (рис. 1, пунктирная линия). Положение точки состава потока F^* можно определить пересечением двух балансовых линий:

$$F^* = R_1 + R_2 \quad (1)$$

$$F^* = F + \Sigma D \quad (2)$$

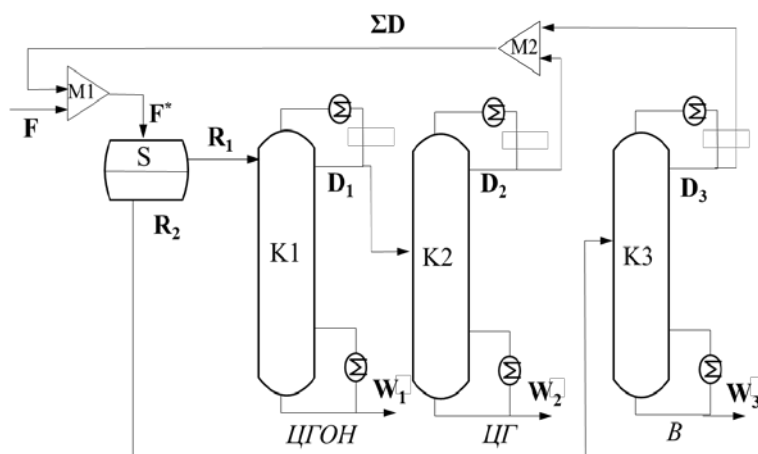


Рисунок 2 – Схема разделения смеси циклогексан (ЦГ) – вода (В) – циклогексанон (ЦГОН)

Следует ожидать, что минимальные энергозатраты в схеме будут наблюдаться для колонны K3, которая представляет собой отгонную колонну с близким к нулю значением флегмового числа (R). Основной вклад в энергозатраты схемы будет вносить колонна K1, что обуславливается большим значением величины потока дистиллята по сравнению с другими колоннами. Для выбранных исходных составов смеси (F_1 – F_3) точки F^* расположены на одной ноде жидкость-жидкость, что позволяет оценить влияние соотношения органического и водного слоев на величины дистиллятных потоков колонн и, как следствие, на энергозатраты схемы разделения. Чем больше воды в исходной смеси, тем меньше величина соотношения потоков R_1/R_2 , ниже величины потоков дистиллятов колонн K1 и K2, и следует ожидать меньшие энергозатраты схемы в целом. Последнее доказано при расчете процесса ректификации схемы разделения для трех исходных составов. Количество, составы материальных потоков, а также параметры работы колонн и суммарная нагрузка на кипятильники колонн приведены в таблице 1 (расчет проводится на 1 кмоль/ч исходной смеси). Определение эффективности колонн (число теоретических тарелок (ЧТТ)) осуществлялось по методу Джиллиленда. Критерием выбора параметров являются минимальные суммарные энергозатраты схемы разделения, при которых возможно получение всех компонентов чистотой 99,9% мол.

Таблица 1 – Количество и составы материальных потоков, параметры работы колонн и суммарная нагрузка на кипятильники колонн схемы разделения

Аппарат	ЧТТ	ТП	R	D (R_1), кмоль/ч	Состав D, мол. доли	W (R_2), кмоль/ч	Состав W, мол. доли	Q, кВт
Состав F_1; $R_1/R_2 = 5,06$; $\Sigma Q = 15,26$ кВт								
S	-	-	-	0,942	0,706 0,036 0,258	0,186	0,000 0,992 0,008	-
K1	14	10	0,6	0,699	0,951 0,049 0,000	0,243	0,000 0,001 0,999	12,68

Продолжение таблицы 1

K2	3	2	0,001	0,114	0,699 0,301 0,000	0,585	0,999 0,001 0,000	2,10
K3	5	2	0,001	0,014	0,000 0,895 0,105	0,172	0,000 0,999 0,001	0,48
Состав F₂; R₁/R₂ = 1,24; ΣQ = 10,89 кВт								
S	-	-	-	0,615	0,705 0,037 0,259	0,497	0,000 0,992 0,008	-
K1	15	11	0,5	0,456	0,951 0,049 0,000	0,159	0,000 0,001 0,999	8,27
K2	3	2	0,001	0,075	0,699 0,301 0,000	0,381	0,999 0,001 0,000	1,38
K3	5	2	0,001	0,037	0,000 0,895 0,105	0,460	0,000 0,999 0,001	1,24
Состав F₃; R₁/R₂ = 0,18; ΣQ = 2,93 кВт								
S	-	-	-	0,163	0,682 0,043 0,276	0,933	0,000 0,992 0,008	-
K1	18	13	0,4	0,118	0,941 0,059 0,000	0,045	0,000 0,001 0,999	1,61
K2	3	2	0,001	0,024	0,713 0,287 0,000	0,094	0,999 0,001 0,000	0,39
K3	5	2	0,001	0,072	0,000 0,895 0,105	0,861	0,000 0,999 0,001	0,93

Примечание: компоненты указаны в следующей последовательности: ЦГ, В, ЦГОН; ТП – тарелка питания

Снижение энергозатрат схем ректификационного разделения, содержащих сепараторы жидкость-жидкость и ректификационные колонны, возможно за счет оптимизации параметров и условий функционирования различных блоков технологической цепочки: блока химической реакции (варьирование условий реакции), блока разделения в целом (организация направленных рециклов) или отдельных аппаратов (например, изменение температуры в сепараторе, влияющее на составы равновесных жидких фаз). Полученные результаты свидетельствуют о перспективности организации в схеме направленных рециклов. В частности, добавление воды в исходную смесь приводит к значительному сокращению энергозатрат на разделение.

Работа выполнена при поддержке Гранта Госзадание РФ № F5FZ-2023-0003.

Библиографический список

1. Тимофеев В. С., Серафимов Л. А., Тимошенко А. В. Принципы технологии основного органического и нефтехимического синтеза. М. : Высшая школа, 2010. 408 с.
2. Frolkova A. K., Maevskii M. A., Oshanina I. V., Frolkova A. V. Cyclohexanone: The main methods of obtaining and extracting target products from a reaction mixture // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2018. V. 52. № 4. pp. 653–660.

УДК 544.723.23

Дмитрий Станиславович Дворецкий, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и оборудование пищевых и химических производств», dvoretsky@yahoo.com

Станислав Иванович Дворецкий, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и оборудование пищевых и химических производств», sdvoretsky@mail.tstu.ru

Евгений Игоревич Акулинин, доктор технических наук, доцент кафедры «Технология и оборудование пищевых и химических производств», akulinin-2006@yandex.ru

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

Владимир Борисович Усачев, директор протвинского филиала, npo@sialuch.ru

Владимир Андреевич Беляев, начальник отдела химических разработок, ведущий научный сотрудник, h2luch.pa@gmail.ru

АО «НИИ НПО» Луч, Россия, г. Протвино

Расчет кинетики процесса адсорбции при разделении газовых смесей

Аннотация. Представлена методика обработки кинетической кривой, полученной на специальном экспериментальном стенде путем измерения концентрации поглощаемого компонента на выходе из слоя адсорбента. Описан алгоритм расчета кинетического коэффициента динамики сорбции для описания циклических процессов адсорбционного разделения газовых смесей с лимитирующим сопротивлением во внутридиффузионной области.

Ключевые слова: адсорбция, газовая смесь, кинетика, экспериментальный стенд, кинетическая кривая, кинетический коэффициент, методика расчета.

Dmitry C. Dvoretsky, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor, Head of the Department Technology and equipment of food and Chemical industries, dvoretsky@yahoo.com

Stanislav I. Dvoretsky, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor, Department of Technology and Equipment of Food and Chemical Industries, sdvoretsky@mail.tstu.ru

Evgeny I. Akulinin, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Technology and Equipment of food and Chemical industries, akulinin-2006@yandex.ru

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, Tambov State Technical University, Russia, Tambov

Vladimir B. Usachev, Director of the Protva branch, npo@sialuch.ru

Vladimir A. Belyaev, Head of the Chemical Development Department, Leading Researcher, h2luch.pa@gmail.ru

JSC Research Institute of NPO Luch, Russia, Protvino

Kinetics calculation in the gas mixtures separation dsorption process

Abstract. The method of the kinetic curve processing obtained on a special experimental stand by measuring the concentration of the absorbed component at the outlet of the adsorbent layer is presented. An algorithm for calculating the kinetic coefficient of sorption dynamics of adsorption separation of gas mixtures for describing cyclic processes with limiting resistance in the intradiffusion region is described.

Keywords: *adsorption, gas mixture, kinetics, experimental stand, kinetic curve, kinetic coefficient, calculation method.*

Развитие технологий и наработка компетенций в области атомной энергетики, а также поиск новых экологически чистых энергоносителей для транспортировки энергии позволили сформулировать концепцию крупнотоннажной генерации водорода методом ядерного парового риформинга, где высокопотенциальная тепловая энергия высокотемпературного газоохлаждаемого реактора используется для обеспечения процесса паровой конверсии метана [1]. В разрабатываемой технологии одной из фундаментальных стадий процесса является очистка водорода от остаточных примесей метана и монооксида углерода. Наиболее распространенным, эффективным и практически значимым методом разделения газовых смесей на твердых адсорбентах является метод короткоциклового адсорбции (КЦА) [2–4].

Важнейшими факторами, влияющими на эффективность процесса адсорбционного разделения газов, являются условия равновесия компонентов газовой смеси в системе «адсорбтив-адсорбент» в слое адсорбента установки КЦА, а также скорость переноса адсорбтива из ядра потока движущейся газовой фазы в пористой среде адсорбента (с учетом заполнения пор гранул адсорбента), т.е. кинетика адсорбции.

Для корректного описания условий равновесия требуются экспериментальные изотермы адсорбтива (извлекаемых компонентов из газовой смеси), полученные в рабочих условиях осуществления процесса сорбции (заданных диапазонах изменения давления и температуры в слое адсорбента), а также зависимости для расчета их совместной (в т. ч. конкурентной) сорбции.

Сопrotивление массопереносу компонентов газовой фазы в пористой среде адсорбента может определяться процессами внешней массоотдачи или/и внутренней диффузии в пористой среде гранул адсорбента; при этом коэффициент диффузии в движущейся газовой среде при наличии конвективного переноса вещества не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на массоперенос [5] и может быть (с высокой точностью) рассчитан по формулам Чапмена-Энскога [3] или Фуллера-Шлеттера-Гиддингса [6].

Наибольшую сложность при расчете кинетики и динамики сорбции представляет определение лимитирующей стадии процесса массопереноса в пористой среде адсорбента, поскольку в ходе циклического процесса «адсорбция-десорбция» с большой долей вероятности происходит ее изменение (от внешнего или смешанно-диффузионного массопереноса до массопроводности в гранулах элементарного слоя адсорбента). При исследовании кинетики сорбции при разделении многокомпонентных смесей задача расчета кинетики и динамики сорбции может осложняться наличием конкурентной сорбции компонентов газовой смеси, что требует разработки методики коррекции кинетических коэффициентов уравнений сорбции [7].

Определение лимитирующей стадии может быть осуществлено с использованием специального экспериментального стенда, позволяющего проводить изучение кинетики циклических процессов «адсорбция-десорбция» как чистых компонентов на инертном носителе (гелии) [8], так и газовых смесей путем непрерывного измерения условий осуществления процесса сорбции (расхода газовой смеси, давления, температуры и концентраций адсорбтива в рабочих диапазонах на входе и выходе из адсорбера (слоя адсорбента)).

Для расчета кинетики циклического процесса адсорбционного разделения многокомпонентных газовых смесей необходимы данные по коэффициентам массоотдачи и массопроводности.

Для описания кинетики сорбции наиболее широко применяется уравнение, описывающее циклические процессы адсорбционного разделения газовых смесей во внутридиффузионной области линейным дифференциальным уравнением [3]:

$$d\bar{a}_i/dt = k_i(a_i^* - \bar{a}_i), \quad (1)$$

где k_i – кинетический коэффициент (эффективная константа) скорости диффузии, 1/с; \bar{a}_i – средняя величина адсорбции i -го компонента в элементарном слое гранул адсорбента, моль/кг; a_i^* – равновесная величина адсорбции i -го компонента в элементарном слое адсорбента, моль/кг

Кинетический коэффициент k_i по совокупности учитывает внешнюю и внутреннюю диффузию (при интрамицеллярной сорбции), так что $\frac{1}{k_i} = \frac{1}{\beta_i'} + \frac{1}{\beta_i''}$, где β_i' – константа скорости внешней массоотдачи; β_i'' – константа скорости внутренней диффузии.

При проведении экспериментальных исследований кинетики с использованием специализированного стенда необходимо поддерживать постоянные значения объемного расхода G газовой смеси, давления P , температуры T , концентраций компонентов c_i^{in} на входе в слой адсорбента. Кроме того, необходимо обеспечивать приемлемое значение изменения Δa_i^* по высоте слоя, обусловленное изменением температуры ΔT в результате теплового эффекта адсорбции/десорбции и перепадом давления ΔP в слое. Поэтому предварительно необходимо установить диапазоны ΔT , ΔP , при которых $\Delta a_i^* \leq \delta$, где δ – допустимая величина изменения Δa^* .

Получение экспериментальной кинетической кривой $\bar{a}_i = f(\tau)$ для элементарного слоя адсорбента крайне затруднено (поскольку требует прямого измерения количества адсорбированного компонента) и на практике осуществляется расчетным путем на основании выходной кривой изменения концентрации соответствующего компонента на выходе из адсорбера $c_i^{out} = f(\tau)$ (рисунок 1). По изотерме адсорбции (для выбранного адсорбента) определяются $a_i^*(T, P, c_i)$, а по кривой $c_i^{out} = f(\tau)$ определяются τ_K – время начала проскока газовой смеси в слое адсорбента и τ_H – время насыщения слоя адсорбента.

Для разграничения первого и второго периодов сорбции определим точку K_i на кинетической кривой $\bar{a}_i = f(\tau)$ (рис. 1б), построенной по экспериментальной выходной кривой $c_i^{out} = f(\tau)$ (рисунок 1а) [9].

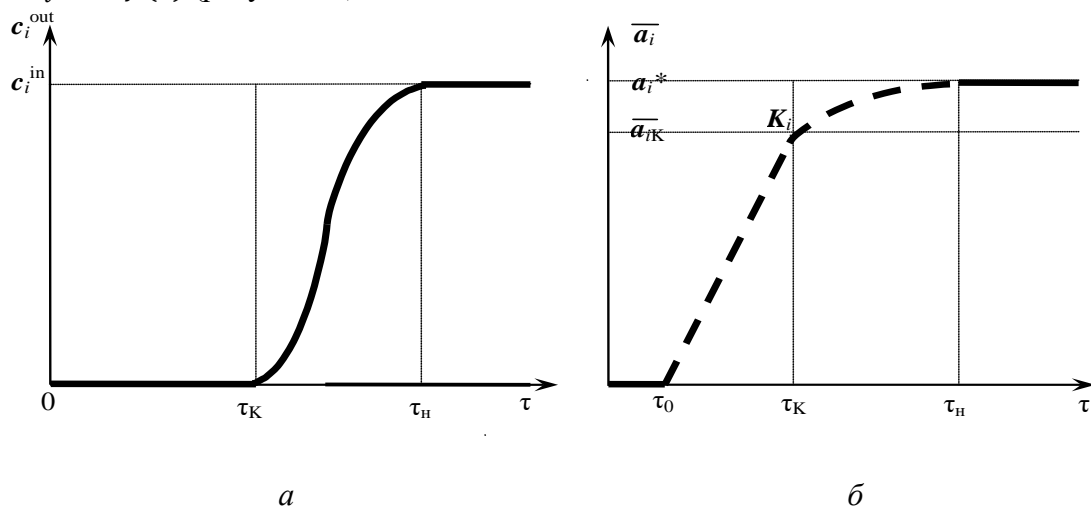


Рисунок 1 – Кинетическая и выходная кривые сорбции:

a – экспериментальная выходная кривая $c_i^{out} = f(\tau)$;

b – расчетная кинетическая кривая $\bar{a}_i = f(\tau)$

Точка K_i на оси τ соответствует времени начала проскока нецелевого компонента τ_K , т.к. в этот момент его концентрация c_i^{out} на выходе из слоя адсорбента становится отличной от нуля. В момент времени τ_K еще по-прежнему поглощается поступающий в слой адсорбента нецелевой компонент в количестве $G^{in}(c_i^{in} - c_i^{out})$, где G^{in} – объемная скорость поступающего в слой адсорбента потока, м³/с, c_i^{in} , c_i^{out} – концентрации i -го компонента на

входе и выходе адсорбера, соответственно, об %. С учетом того, что $c_i^{\text{out}} = 0$, поток нецелевого компонента в слое адсорбента в момент времени τ_k составляет величину $c_i^{\text{in}} G^{\text{in}}$. К моменту времени $\tau = \tau_n$ слой адсорбента полностью насыщается и устанавливается равновесное значение a_i^* адсорбции, $c_i^{\text{in}} = c_i^{\text{out}}$, $G^{\text{in}}(c_i^{\text{in}} - c_i^{\text{out}}) = 0$, процесс сорбции нецелевого компонента прекращается. В этом случае количество адсорбированного нецелевого компонента $\Delta \bar{a}_i$ за промежуток времени $[\tau_k, \tau_n]$, моль/кг, составит:

$$\Delta \bar{a}_i = (103/22,4) \cdot (G^{\text{in}} c_i^{\text{in}} - G^{\text{in}} \int_{\tau_k}^{\tau_n} c_i^{\text{out}}) (\tau_n - \tau_k) / m, \quad (2)$$

где m – масса адсорбента, кг.

Соответственно, величина адсорбции в точке K_i рассчитывается как:

$$\bar{a}_{iK} = a_i^* - \Delta \bar{a}_i. \quad (3)$$

Для построения линейного участка кинетической кривой необходимо определить время τ_0 начала адсорбции – время, необходимое для вытеснения инертного газа (гелия), заполняющего адсорбер. Его значение можно найти, зная объем пространства, незанятого адсорбентом ($\varepsilon \cdot V_A$), суммарный объем V прочих трубопроводов V , объемный расход газовой смеси G^{in} , м³/с. Далее точка K и точка τ_0 на оси τ соединяются прямой линией.

Изучение кинетики адсорбции целесообразно организовывать при такой скорости газowego потока, чтобы внешняя массоотдача процесса незначительно (на 5-10%) превышала внутреннюю диффузию (массопроводность) адсорбтива в гранулах адсорбента. Для таких условий воспользуемся методом, позволяющим проследить переход от внешнелдиффузионной или смешанно-диффузионной задачи к внутридиффузионной [9]. В этом методе предполагается использование экспериментальных кривых кинетики процесса адсорбции газа в пористой среде адсорбента. Визуально на кривой кинетики $\bar{a}_i = f(t)$ определяется граничная точка K_i , $i = 1, 2, 3$, которая отделяет первый и второй периоды кинетики адсорбции компонентов газовой смеси. В первом периоде (до точки K_i на кривой кинетики) процесс адсорбции лимитируется внешней массоотдачей, во втором периоде (после точки K_i на кривой кинетики) внутридиффузионное сопротивление пористой среды адсорбента оказывает лимитирующее влияние на кинетику процесса адсорбции.

Для первого периода уравнение массоотдачи записывается в виде:

$$i_f = (10^3 \beta_i / M_i) \cdot (c_i - c_i^*) / c_i, \quad (4)$$

где c_i – текущая концентрация i -го компонента в потоке газовой смеси, моль/кг; c_i^* – концентрация i -го компонента на поверхности раздела фаз, равновесная текущей величине адсорбции a_i , моль/кг; β_i – коэффициент массоотдачи, кг/(м²·с); M_i – молярная масса адсорбтива, кг/кмоль.

Согласно [9] плотность потока i_f , моль/(м²·с) адсорбтива у поверхности гранулы адсорбента связана со скоростью процесса $d\bar{a}_i/d\tau$ соотношением:

$$i_f = d\bar{a}_i/d\tau R_v \rho_0, \quad (5)$$

где \bar{a}_i – среднееобъемное содержание адсорбата гранулой в момент времени τ , моль/кг, R_v – отношение объема слоя к его внешней поверхности, м³/м², ρ_0 – истинная плотность адсорбента, кг/м³

В первом периоде кинетики скорость процесса $d\bar{a}_i/d\tau$ постоянна. В точке K_i начинается второй период кинетики, для которого уравнение массоотдачи (4), с учетом линейной функции концентрационного фазового равновесия, преобразуется к виду:

$$i_f = (10^3 \beta_i / M_i) \cdot (c_i - c_i^*) / c_i = (10^3 k_i / M_i) \cdot (a_i^* - \bar{a}_i) / \bar{a}_i. \quad (6)$$

Для точки K_i из уравнений (4) и (5) можно записать:

$$(10^3 k_i / M_i) \cdot (a_i^* - \bar{a}_i) / \bar{a}_i = d\bar{a}_i/d\tau R_v \rho_0, \text{ откуда:}$$

$$k_i = (d\bar{a}_i/d\tau) \cdot (\bar{a}_i/(a_i^* - \bar{a}_i)) \cdot ((R_v \cdot \rho_0 \cdot M_i)/10^3). \quad (7)$$

Рассчитанный по формуле (7) кинетический коэффициент k_i , кг/(м²с) должен быть приведен к единицам измерения, используемым в уравнении (1):

$$k_i = (d\bar{a}_i/d\tau) \cdot (1/(a_i^* - \bar{a}_i)) \cdot R_v \cdot S_{sp}.$$

Учитывая, что отношение объема гранул к их поверхности $R_v = d_{gr}/6$, м³/м², удельная поверхность $S_{sp} = 6(1-\varepsilon) \cdot \Phi/d_{gr}$, м²/м³ [10], d_{gr} – диаметр гранулы адсорбента, м, Φ – фактор формы, для шарообразных частиц $\Phi = 1$, получим:

$$k_i = d\bar{a}_i/d\tau \cdot (1-\varepsilon)/(a_i^* - \bar{a}_i). \quad (8)$$

В формуле (8) постоянная скорость процесса адсорбции, моль/(кг·с) определяется как: $d\bar{a}_i/d\tau = \bar{a}_{iK}/(\tau_K - \tau_0)$.

Предложенный подход к расчету кинетического (эффективного) коэффициента модели кинетики процесса массопереноса в пористой среде адсорбента можно использовать при обработке кинетических кривых, полученных в рабочем диапазоне давлений, температур и объемных расходов исходной газовой смеси осуществления процесса КЦА газоразделения.

Библиографический список

1. Пономарёв-Степной Н. Н. Атомно-водородная энергетика // Вестник РАН. 2021. Т. 91, № 5. С. 484–498.
2. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники. М. : Химия, 1976. 512 с.
3. Ruthven D. M., Farooq S., Knaebel K. S. Pressure swing adsorption. New York: 1993. 189 p.
4. Шумяцкий Ю. И. Промышленные адсорбционные процессы. М. : КолосС, 2009. 183 с.
5. To the problem of forming the equation system for pressure swing adsorption mathematical model / O. O. Golubyatnikov, E. I. Akulinin, S. I. Dvoretzky, D. S. Dvoretzky // Chemical Product and Process Modeling. 2021.
6. Chapman S., Cowling T. G. The mathematical theory of nonuniform gases. New York : Cambridge University Press, 1939. 431 с.
7. Yang R. T. Adsorbents: Fundamentals and Applications. Hoboken : Wiley, 2003. 425 p.
8. Multicomponent adsorption of H₂, CH₄, CO and CO₂ in zeolites NaX, CaX and MgX. Evaluation of performance in PSA cycles for hydrogen purification / P. Brea, J. A. Delgado, V. I. Águeda et al. // Microporous and Mesoporous Materials. 2019. Vol. 286. pp. 187–198.
9. Рудобашта С. П., Кошелева М. К. Определение коэффициентов массоотдачи и массопроводности из кривых кинетики // Технология текстильной промышленности. 2015. Т. 6, № 360. С. 175–180.
10. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / 9-е изд., испр. М. : Химия, 1973. 752 с.

УДК 542.47

Станислав Павлович Рудобашта, доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, *srudobashta@rgau-msha.ru*
Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Россия, г. Москва

Галина Альбертовна Зуева, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой «Высшая и прикладная математика», *galina@isuct.ru*
Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, г. Иваново

Герман Владимирович Хандогин, аспирант кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, *khandogingerman@yandex.ru*
Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Россия, г. Москва

Иван Михайлович Курнаев, аспирант кафедры «Высшая и прикладная математика», *iv0350@yandex.ru*
Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, г. Иваново

Влияние формы тела на тепломассообмен при осциллирующей инфракрасной сушке семян

Аннотация. Целью работы являлось изучить влияние формы тела (неограниченная пластина, бесконечный цилиндр, шар) на тепломассообмен при сушке в условиях осциллирующего инфракрасного энергоподвода при одних и тех же: характерном размере тела, излучателе, плотности потока излучения, температуре внешней среды, с которой контактирует тело. Исследование выполнялось путем расчетов по полученным ранее аналитическим решениям задач для тел указанной формы. Результат представлены в виде графических зависимостей динамики температурного поля применительно к процессу осциллирующей инфракрасной сушке семян овощных культур, сравнения которых показало, что форма тела существенно влияет на динамику нагрева тела, поэтому ее надо учитывать в инженерных расчетах. При осциллирующей инфракрасной сушке тел разной формы (пластина, цилиндр, шар) прочих равных условиях продолжительность цикла и продолжительность стадии нагрева в нем наибольшие у пластины и наименьшие у цилиндра.

Ключевые слова: инфракрасная сушка, осциллирующий нагрев, математическое моделирование, форма тела.

Influence of body shape on heat and mass transfer at oscillating infrared seed drying

Stanislav P. Rudobashta, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor of the Department of Heat Engineering, Hydraulics and Energy Supply, *srudobashta@rgau-msha.ru*

Russian Timiryazev State Agrarian University, Russia, Moscow

Galina A. Zueva, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor, the Head of the Department of Higher and Applied Mathematics, *galina@isuct.ru*
Ivanovo State University of Chemical Technology, Russia, Ivanovo

German V. Khandogin, Graduate Student of the Department of Heat Engineering, Hydraulics and Energy Supply of Enterprises, *khandogingerman@yandex.ru*
Russian Timiryazev State Agrarian University, Russia, Moscow

Ivan M. Kurnaev, Graduate Student of the Department of Higher and Applied Mathematics, *iv0350@yandex.ru*
Ivanovo State University of Chemical Technology, Russia, Ivanovo

Abstract. The aim of the work has been to study the effect of the body shape (unlimited plate, infinite cylinder, ball) on heat and mass transfer when drying under conditions of an oscillating infrared energy supply for the same: characteristic body size, emitter, radiation flux density, temperature of the environment with which the body is in contact. The study was carried out by calculations using the previously obtained analytical solutions of problems for bodies of the specified shape. The result is presented in the form of graphical dependences of the dynamics of the temperature field in relation to the process of oscillating infrared drying of vegetable seeds, the comparison of which showed that the shape of the body significantly affects the dynamics of body heating, so it must be taken into account in engineering calculations. With oscillating infrared drying of bodies of various shapes (plate, cylinder, ball), other things being equal, the cycle duration and the duration of the heating stage in it are the largest for the plate and the smallest for the cylinder.

Keywords: infrared drying, oscillating heating, mathematical modeling, body shape.

Введение

В последнее время в мире большое внимание уделяется электромагнитной (в том числе инфракрасной) сушке, которая осуществляется как самостоятельно, так и в комбинации с конвективной сушкой [1–7]. Для термолабильных материалов для сохранения их качества электромагнитный энергоподвод осуществляется в прерывистом (осциллирующем) режиме [1–7], который позволяет не перегревать материал. Для математического моделирования этого процесса применяют как численные [1, 4–7], так и аналитические [3–9] методы, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Достоинством аналитических методов является их прозрачность для анализа и то, что решение не надо прогонять через весь временной интервал, чтобы увидеть конечный результат. Численные же методы позволяют получить решения для многих нелинейных задач тепломассопереноса, для которых аналитические решения отсутствуют.

Цель работы состояла в изучении влияния формы тела (неограниченная пластина, бесконечный цилиндр, шар) на тепломассообмен при сушке в условиях осциллирующего инфракрасного энергоподвода при одних и тех же условиях проведения процесса.

Материалы и методы. Анализ проводился путем сравнительных расчетов по аналитическим решениям, приведенным в [3, с.645; 8, с.723; 9, с.232]. Эти решения применительно к среднеобъемной температуре тела имеют вид:

- для пластины [3, с. 645]:

$$\begin{aligned} \overline{W}(Fo) = & 2N_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + Bi^2) A_n(0) \sin \mu_n}{\mu_n (\mu_n^2 + Bi^2 + Bi)} e^{-\mu_n^2 Fo} + \\ & + 2\theta_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + Bi^2) A_n(\mu_0^*) \cdot \psi_n(Fo) \sin \mu_n}{\mu_n^3 (\mu_n^2 + Bi^2 + Bi)} + \\ & + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + Bi^2) A_n(0) D_n \sin \mu_n}{\mu_n^4 (\mu_n^2 + Bi^2 + Bi)} e^{-\mu_n^2 Fo} \end{aligned} \quad (1)$$

где μ_n – положительные корни характеристического уравнения

$$\operatorname{ctg} \mu = \frac{\mu}{Bi}. \quad (2)$$

Здесь $\overline{W}(Fo)$ средняя температура тела:

$$\overline{W}(Fo) = \int_0^1 W(\xi, Fo) d\xi;$$

$$W(\xi, Fo) = \frac{t_1(x, \tau) - t_c}{t_h - t_c} = \frac{[t(x, \tau) - t_c] + \varphi(\tau)}{t_h - t_c} = \frac{[t(x, \tau) - t_c] + (r^* / \alpha) i(\tau)}{t_h - t_c};$$

$$Fo = \frac{a\tau}{R^2};$$

$$\theta_0 = \frac{W_0 R^2}{a(t_h - t_c)} = \frac{\mu^* q_0 A R^2}{c \rho a(t_h - t_c)} = \frac{\mu^* q_0 A R^2}{\lambda(t_h - t_c)}, \quad t_h - \text{масштабная начальная величина};$$

$$\mu_0^* = \mu^* R;$$

$$f_0(\xi) = \frac{(t_h - t_c) + (r^* / \alpha) i(0)}{t_h - t_c} = N_0;$$

$$D_n = N_1 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\beta_k^2 B_k^*}{\mu_n^2 - \beta_k^2 \text{Lu}} (e^{(\mu_n^2 - \beta_k^2 \text{Lu}) Fo} - 1);$$

β_k – корни характеристического уравнения ($\beta_k > 0$)

$$\text{ctg} \beta = \frac{\beta}{\text{Bi}_m},$$

$$B_k = \frac{2\text{Bi}_m^2}{\beta_k^2 (\text{Bi}_m^2 + \beta_k^2 + \text{Bi}_m)};$$

$$\text{Lu} = \frac{k}{a};$$

$$A_n(\mu_0^*) = \int_0^1 \exp(-\mu_0^*(1-\xi)) \cos \mu_n \xi d\xi,$$

$$A_n(0) = A_n(\mu_0^*)|_{\mu_0^*=0}.$$

• для сферы [8, с. 723]:

$$\overline{W}(F) = \overline{W}_1(F) + \overline{W}_2(F) + \overline{W}_3(F),$$

$$\overline{W}_1(Fo) = \frac{6\text{Bi}^2 N_0}{(\text{Bi}-1)^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + (\text{Bi}-1)^2) \cos^2(\mu_n)}{\mu_n^2 (\mu_n^2 + \text{Bi}(\text{Bi}-1))} \exp(-\mu_n^2 Fo); \quad (4)$$

$$\overline{W}_2(Fo) = -\frac{6\theta_0 \text{Bi}}{(\text{Bi}-1)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + (\text{Bi}-1)^2) \cos(\mu_n) A_n(\mu^*) \psi_n(Fo)}{\mu_n (\mu_n^2 + \text{Bi}(\text{Bi}-1))}, \quad (5)$$

$$\overline{W}_3(Fo) = -\frac{6\text{Bi}}{(\text{Bi}-1)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + (\text{Bi}-1)^2) \cos(\mu_n) A_n(0) D_n}{\mu_n (\mu_n^2 + \text{Bi}(\text{Bi}-1))} \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (6)$$

$$D_n = N_1 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\beta_k^2 B_k^*}{\mu_n^2 - \beta_k^2 \text{Lu}} (e^{(\mu_n^2 - \beta_k^2 \text{Lu}) Fo} - 1), \quad (7)$$

где \overline{W} – среднеобъемная относительная температура шара; μ_n – положительные корни характеристического уравнения (2);

• для цилиндра [9, с.232]:

$$\overline{W}(Fo) = 2^2 f_0^* \text{Bi}^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-\mu_n^2 Fo)}{\mu_n^2 (\mu_n^2 + \text{Bi}^2)} + 2^2 \theta_0 \text{Bi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\psi(\mu_n, \mu_0^*)}{(\mu_n^2 + \text{Bi}^2) J_0(\mu_n)}$$

$$\int_0^{Fo} \exp(-\mu_n^2 (Fo - \tau')) f_1^*(\tau') d\tau' + 2^2 \text{Bi}^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2 (\mu_n^2 + \text{Bi}^2)} \int_0^{Fo} \exp(-\mu_n^2 (Fo - \tau')) \phi^*(\tau') d\tau'. \quad (8)$$

$$f_0(r) = \frac{(t_n - t_c) + (r^*/\alpha) i(0)}{t_0 - t_c} = f_0^* = \text{const.}$$

Обозначения: a – коэффициент температуропроводности тела, $\text{м}^2/\text{с}$; c – массовая теплоемкость тела, $\text{Дж}/(\text{кг}\times\text{К})$; i – интенсивность сушки тела, $\text{кг}/(\text{м}^2\times\text{с})$; k – коэффициент массопроводности (коэффициент диффузии влаги в материале), $\text{м}^2/\text{с}$; q_0 – плотность потока лучистой энергии, падающего на поверхность тела, $\text{Вт}/\text{м}^2$; r – радиальная координата, м ; R – радиус шара или цилиндра, половина толщины пластины, м ; r^* – теплота парообразования, включая теплоту десорбции влаги, $\text{Дж}/\text{кг}$; t – температура, $^\circ\text{C}$; u , \bar{u} – локальное и среднее по объему тела влагосодержание соответственно, $\text{кг}/(\text{кг} \text{ сухого материала})$; α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\times\text{К})$; β_c – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности концентраций C_c , $\text{м}/\text{с}$; λ – коэффициент теплопроводности материала, $\text{Вт}/(\text{м}\times\text{К})$; μ^* – коэффициент экстинкции, м^{-1} ; ρ , ρ_0 – плотность влажного и абсолютно сухого материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; τ – время, с ; $Bi = \alpha R/\lambda$ – число Био тепловое, безразмерное; $Fo = \alpha \tau/R^2$ – число Фурье тепловое, безразмерное; $Fo_m = k\tau/R^2$ – число Фурье массообменное, безразмерное; $Lu = k/\alpha$ – число Лыкова.

Индексы: n – начальный; $наг$ – нагрев; p – равновесный; c – сушильный агент; π – цикл; m – массообменный; max – максимальное значение; min – минимальное значение.

Анализ влияния формы тела на динамику его нагрева при осциллирующей инфракрасной сушке

В [10, с.88] было показано, что применение осциллирующей инфракрасной сушки семян овощных культур в условиях, когда температура семян колеблется в интервале $t_{min} = 34^\circ\text{C}$, $t_{max} = 40^\circ\text{C}$, вызывает их стимуляцию, что проявляется в увеличении их энергии прорастания и всхожести. Поэтому проанализируем процесс осциллирующего инфракрасного нагрева семян именно в этом температурном режиме. Примем для семян [8]: $R = 1,115 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $\rho_0 = 1120 \text{ кг}/\text{м}^3$; $k = 5,15 \times 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda = 0,33 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$, $a = 0,21 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (следовательно, объемная теплоемкость семени равна $c\rho = \lambda/a = 1,57 \times 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \times \text{К})$). Согласно [8, с.726] при этих параметрах и $\tau_{\pi} = 23 \text{ с}$; $t_n = 18^\circ\text{C}$; $q_0 = 2000 \text{ Вт}/\text{м}^2$; $\alpha = 109 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$; $\beta_c = 0,105 \text{ м}/\text{с}$; $t_c = 33^\circ\text{C}$; $u_p = 0,0824 \text{ (кг влаги)}/(\text{кг сухого материала})$ проведение процесса осциллирующей инфракрасной сушки сферических семян в псевдооживленном слое дает динамику нагрева, приведенную на рис. 1, которая полностью соответствует условию: $t_{min} = 34^\circ\text{C}$, $t_{max} = 40^\circ\text{C}$. Отметим, что поиск именно этого температурного интервала в цикле являлся целью вариантных расчетов. При данных параметрах $Bi = 0,368$ и реализуется внутридиффузионный массообменный режим (число $Bi_m > 100$).

Проверим далее, какая будет динамика нагрева частиц иной формы (пластины и цилиндр) при тех же условиях тепломассообмена с тем, чтобы проследить влияние на нее формы тела. Результаты соответствующих расчетов, выполненных по уравнениям (1) и (8), приведены на рисунках 2 и 3. На рисунке 2 показана динамика нагрева семени в форме цилиндра – по результатам расчета, выполненного по уравнению (8). Эти расчеты показали, что искомый режим нагрева, соответствующий условию $t_{min} = 34^\circ\text{C}$, $t_{max} = 40^\circ\text{C}$, достигается при длительности цикла $\tau_{\pi} = 16 \text{ с}$ и продолжительности стадии нагрева в цикле $\tau_{наг} = 7 \text{ с}$. Только это отличает данный режим от режима нагрева, реализованного для сферы. Остальные параметры нагрева цилиндра сохранены теми же, что и для сферы.

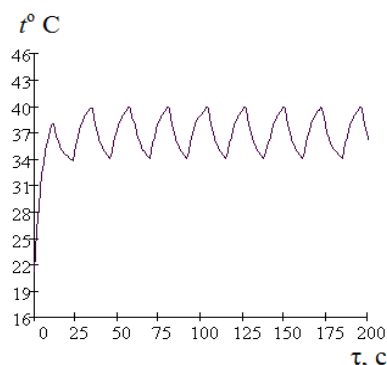


Рисунок 1 – Динамика нагрева семени в форме сферы (расчет по уравнению (2)):

$$\tau_{\text{ц}} = 23 \text{ с}; \tau_{\text{наг}} = 11 \text{ с}; t_{\text{н}} = 18^{\circ}\text{C}; \\ q_0 = 2000 \text{ Вт/м}^2; \alpha = 109 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}; \\ \beta_c = 0,105 \text{ м/с}; t_c = 33^{\circ}\text{C}, t^{\circ}\text{C } \tau, \text{ с}$$

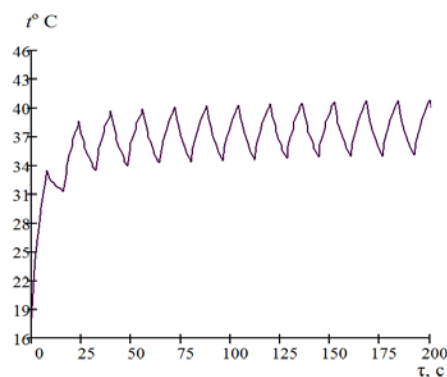


Рисунок 2 – Динамика нагрева семени в форме цилиндра (расчет по уравнению (8)):

$$\tau_{\text{ц}} = 16 \text{ с}; \tau_{\text{наг}} = 7 \text{ с}; t_{\text{н}} = 18^{\circ}\text{C}; \\ q_0 = 2000 \text{ Вт/м}^2; \alpha = 109 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}; \\ \beta_c = 0,105 \text{ м/с}; t_c = 33^{\circ}\text{C}$$

На рисунке 3 показаны результаты аналогичного расчета для пластины, выполненного по уравнению (1). Как видно из этого рисунка, для поддержания требуемого температурного интервала требуется, чтобы продолжительность цикла составляла 50 с, а продолжительность стадии нагрева в нем – 15 с.

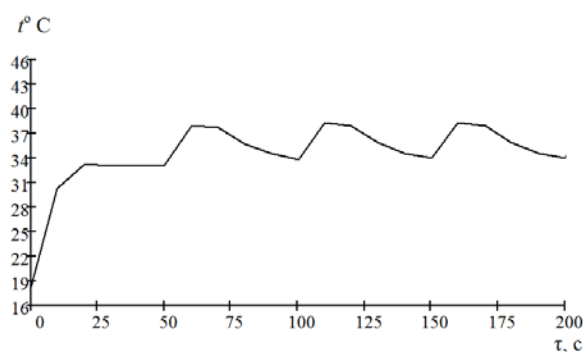


Рисунок 3 – Динамика нагрева семени в форме пластины (расчет по уравнению (1)):

$$\tau_{\text{ц}} = 50 \text{ с}; \tau_{\text{наг}} = 15 \text{ с}; t_{\text{н}} = 18^{\circ}\text{C}; q_0 = 2000 \text{ Вт/м}^2; \alpha = 109 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}; \beta_c = 0,105 \text{ м/с}; t_c = 33^{\circ}\text{C}$$

В таблице 1 приведены сводные данные по динамике нагрева тел исследованной формы в процессе осциллирующей инфракрасной сушки семян овощных культур. Как видно из таблицы, форма тела закономерно влияет на динамику нагрева: максимальные значения $\tau_{\text{ц}}$ и $\tau_{\text{наг}}$ наблюдаются у пластины, а минимальные – у цилиндра, при изменении формы тела в одну и ту же сторону (уменьшение или увеличение) изменяются как продолжительность цикла, так и продолжительность стадии нагрева в нем.

Таблица 1 – Значения продолжительности цикла и продолжительности стадии нагрева в нем при осциллирующей инфракрасной сушке семян овощных культур, обеспечивающей колебания температуры в циклах от $t_{\text{min}} = 34^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{max}} = 40^{\circ}\text{C}$

Форма тела	$\tau_{\text{ц}}, \text{ с}$	$\tau_{\text{наг}}, \text{ с}$
пластина	50	15
шар	23	11
цилиндр	16	7

Выводы по работе

1. Форма тела оказывает значительное влияние на динамику нагрева материала при осциллирующей инфракрасной сушке, поэтому ее необходимо учитывать в расчетах.
2. При осциллирующей инфракрасной сушке тел разной формы (пластина, цилиндр, шар) при прочих равных условиях продолжительность цикла и продолжительность стадии нагрева в нем наибольшие у пластины и наименьшие у цилиндра.

Библиографический список

1. **Vaquiرو H. A., Clemente G., Garcia-Perez J. V., Mulet A., Bonb J.** Enthalpy-driven Optimization of Intermittent Drying of *Mangifera Indica* L. *Chemical Engineering Research and Design*. 2009. V. 87. pp. 885–898.
2. **Рудобашта С. П., Григорьев И. В.** Импульсная инфракрасная сушка семян // *Промышленная теплотехника*. 2011. Т. 33, № 8. С. 85–90.
3. **Рудобашта С. П., Карташов Э. М., Зуев Н. А.** Тепломассоперенос при сушке в осциллирующем электромагнитном поле // *Теоретические основы химической технологии*. 2011. Т. 45, № 6. С. 641–647.
4. **Esturk O.** Intermittent and continuous microwave-convective air-drying characteristics of sage (*Salvia officinalis*) leaves. *Food and Bioprocess Technology*. 2012. V. 5, Issue 5. pp. 1664–1673.
5. **Zhao D., An K., Ding S., Liu L., Xu Z., Wang Z.** Two-stage intermittent microwave coupled with hot-air drying of carrot slices: Drying kinetics and physical quality // *Food and Bioprocess Technology*. 2014. V. 7, Issue 8. pp. 2308–2318.
6. **Kumar C., Karim M.A., Joardder M.U.H.** Intermittent drying of food products: A critical review // *Journal of Food Engineering*. 2014. V.121. pp. 48–57.
7. **Kumar C., Joardder M.U.H., Farrel, T.W., Millar G.J., Karim M.A.** Mathematical model for intermittent microwave convective drying of food materials // *Drying Technology*. 2016. Vol. 34, № 8. pp. 962–973.
8. Моделирование неизотермического тепло- и влагопереноса в капиллярнопористых средах при периодическом микроволновом нагреве / Н. Н. Гринчик, П. В. Акулич, А. Л. Адамович, П. С. Куц, С. П. Кундас // *Инженерно-физический журнал*. 2007. Т. 80, № 1. С. 3–12.
9. **Rudobashta S. P., Zueva G. A., Kartashov E. M.** Heat and mass transfer when drying a spherical particle in an oscillating electromagnetic field // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2016. V. 50. Issue 5. pp. 718.
10. **Rudobashta S. P., Zueva G. A., Kartashov E. M.** Heat and mass transfer in the drying of a cylindrical body in an oscillating electromagnetic field // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2018. V. 91. No 1. January. p. 227.
11. **Рудобашта С. П., Григорьев И. В.** Импульсная инфракрасная сушка семян // *Промышленная теплотехника*. 2011. Т. 33, № 8. С. 85–90.

УДК 66.047.3.085.1:66.011

Андрей Александрович Липин, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Процессы и аппараты химической технологии», lipin.a@mail.ru

Александр Геннадьевич Липин, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Процессы и аппараты химической технологии», 157lipin@mail.ru
Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, г. Иваново

Моделирование процесса сушки карбоната лития в терморadiационной сушилке

Аннотация. В статье представлена математическая модель процесса радиационной сушки пасты карбоната лития в терморadiационной ленточной сушилке с газовым обогревом. Модель позволяет прогнозировать изменение влагосодержания материала и газа в сушильной камере, изменение температур материала, газа, излучающей панели и топочных газов. С использованием разработанной математической модели установлены значения технологических параметров, а также габаритных размеров сушилки, обеспечивающие сушку до заданного влагосодержания и отсутствие перегрева материала.

Ключевые слова: карбонат лития, ленточная сушилка, математическая модель, радиационная сушка.

Andrey A. Lipin, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Processes and Devices of Chemical Technology, lipin.a@mail.ru

Alexander G. Lipin, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor, Head of the Department Processes and Devices of Chemical Technology, 157lipin@mail.ru
Ivanovo State University of Chemical Technology, Russia, Ivanovo

Modelling lithium carbonate drying in the infrared dryer

Abstract. The article presents a mathematical model of lithium carbonate infrared drying in infrared belt dryer with gas heating. The model allows predicting changes in the moisture content of the material and gas in the drying chamber, changes in the temperature of material, gas, radiant panel and flue gases. Using the developed mathematical model the values of technological parameters as well as the dryer sizes, providing drying to the required moisture content and the material does not overheat, were determined.

Keywords: lithium carbonate, belt dryer, mathematical model, infrared drying.

Карбонат лития применяется в пиротехнике, чёрной металлургии, производстве стекол и пластмасс, электроизоляционного фарфора, ситаллов, химических источников тока, а также в сельском хозяйстве в качестве удобрения и кормовой добавки. Из материалов, содержащих карбонат лития, или технического карбоната получают моногидрат гидроксида лития высокой степени чистоты. Самое широкое применение карбонат лития нашёл в металлургии для десульфации стали. Крупным потребителем карбоната лития является стекольная промышленность [1, 2].

При получении товарного карбоната лития из природного гидроминерального сырья [2] на конечной технологической стадии получают суспензию чернового карбоната лития, которую отмывают и отжимают на центрифуге. После центрифуги продукт представляет собой пластичную массу белого цвета (пасту) влажностью 35...45 %. Для дальнейшего применения необходим порошок с остаточной влажностью 0,4 %.

Поскольку карбонат лития является дорогим материалом, важно при сушке минимизировать потери, связанные с уносом порошка. Поэтому применение конвективных сушилок в этом случае исключено. Кроме того, к конечному продукту предъявляются жесткие требования по чистоте, количество примесей должно быть минимальным. С учетом вышеизложенного наиболее подходящим типом сушилки для карбоната лития является терморadiационная сушилка, а в качестве сушилок целесообразно использовать ленточные терморadiационные сушилки, где в качестве излучателей используются панели с газовым обогревом.

В процессе инфракрасной сушики материал подвергается воздействию ИК-излучения высокой плотности, что может привести к его перегреву и деструкции. Поэтому прогнозирование профиля температуры материала по длине сушилки является актуальной задачей. Для подбора рациональных режимно-технологических параметров сушики пасты карбоната лития нами разработана математическая модель этого процесса.

На рисунке 1 представлена расчетная схема ленточной терморadiационной сушилки с газовым обогревом.

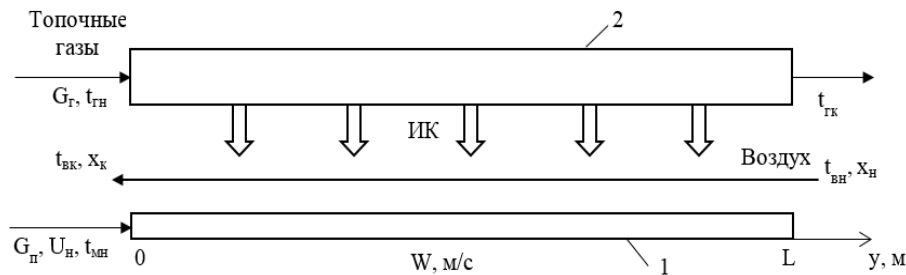


Рисунок 1 – Расчетная схема сушилки:
1 – слой материала; 2 – излучающая панель

При газовом обогреве температура излучателя изменяется по длине сушилки. Расчет изменения температуры излучающей панели T_n , температуры топочных газов t_r , влагосодержания U и температуры t_m высушиваемого материала, температуры t_c и влагосодержания воздуха x по длине y сушильной камеры осуществляется путем решения системы уравнений (1–7).

$$\alpha_r(T_r - T_n) = c_{12}[(T_n/100)^4 - (T_m/100)^4], \quad (1)$$

$$dt_r/dy = -\alpha_r B(t_r - t_n)/(G_r c_r), \quad (2)$$

$$dt_m/dy = \{c_{12}[(T_n/100)^4 - (T_m/100)^4] + B + r^* \frac{dU}{dy} G_m + \alpha_c(t_c - t_m)B\} / [G_m(c_m + c_b U)], \quad (3)$$

$$dU/dy = \beta_p B(p_m - p_c)/G_m, \quad (4)$$

$$dt_c/dy = [\alpha_c(t_c - t_n) + \alpha_c(t_c - t_p)] \cdot B / (G_c c_c), \quad (5)$$

$$dx/dy = \beta_p(p_m - p_c) \cdot B / G_c \quad (6)$$

$$p_m = p_{\text{нас}}(t_m) \psi(U). \quad (7)$$

В этих уравнениях: α_r , α_c – коэффициенты теплоотдачи от топочных газов к излучающей панели и от материала к воздуху в сушильной камере; c_{12} – коэффициент взаимноизлучения; B – ширина ленты; c_r , c_b , c_m – теплоемкости, соответственно, топочных газов, воды и сухого материала; r^* – теплота парообразования; G_m – массовый расход материала; G_r – расход топочных газов; t_c – температура воздуха в сушильной камере; p_m , p_c – парциальное давление паров воды над поверхностью слоя материала и в воздухе; β_p – коэффициент массоотдачи; $p_{\text{нас}}$ – давление насыщенных паров воды; $\psi(U)$ – эмпирический коэффициент, учитывающий снижение парциального давления водяных паров при уменьшении влагосодержания.

Краевые условия для уравнений (1–7): при $y = 0$ $t_r = t_{rn}$, $t_m = t_{mn}$, $U = U_n$; при $y = L$ $t_c = t_{cn}$, $X = X_n$.

Движущая сила процесса сушки здесь, выражена как разность парциальных давлений водяных паров над материалом и в окружающем воздухе. Парциальное давление водяных паров над материалом можно рассчитать по формуле (7). Давление насыщенных паров воды определяется по формуле, приведенной в работе [3]. Зависимость эмпирического коэффициента $\psi(U)$ от влагосодержания материала получена в результате обработки экспериментальных данных по сушке пасты карбоната лития и аппроксимирована следующим образом:

$$\begin{aligned}\psi &= 1 + 0,7U / (U_n - 0,7) - 0,7U_n / (U_n - 0,7), \quad 0,7 \leq U \leq U_n \\ \psi &= 0,3, \quad 0,1 \leq U \leq 0,7 \\ \psi &= 3U, \quad U \leq 0,1\end{aligned}\quad (8)$$

Решение системы уравнений математического описания процесса сушки осуществлялось численным методом. На рисунках 2, 3 приведены результаты расчета процесса сушки пасты карбоната лития с начальной влажностью 0,818 кг влаги/кг сухого вещества (относительная влажность 45 %), толщина слоя материала 2 мм, ширина 0,9 м. Длина зоны сушки 9,6 м, что соответствует 4 секциям по 2,4 м. Расход природного газа 13 м³/ч. Производительность сушилки по сухому карбонату лития 100 кг/час. Производительность вытяжного вентилятора 0,8 м³/с. Прогнозируемая влажность материала на выходе из сушилки 0,4 %. Температура материала на выходе из сушилки 122 °С, влагосодержание отходящего воздуха 0,033 кг влаги/кг сухого воздуха.

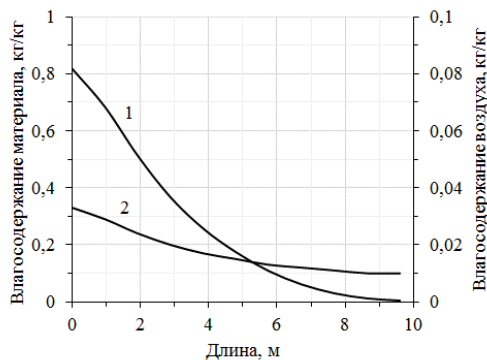


Рисунок 2 – Изменение влагосодержания материала 1 (кг влаги/кг сухого вещества) и воздуха 2 (кг влаги/кг сухого воздуха) по длине зоны сушки

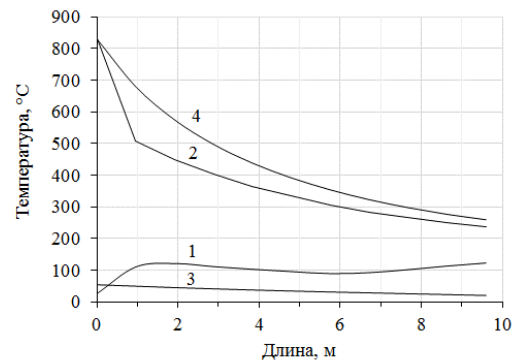


Рисунок 3 – Изменение температуры материала (1), излучающей панели (2), воздуха (3) и топочных газов (4) по длине зоны сушки

Графики рисунка 2 иллюстрируют изменение влагосодержания материала и воздуха по длине зоны сушки, а графики рисунка 3 показывают изменение температуры материала t_m , температуры воздуха t_c , температуры излучающей панели t_n и дымовых газов t_r по длине сушилки.

При тех же начальных параметрах влажного материала были выполнены расчёты сушилки на другую производительность по сухому продукту: 130 и 250 кг/ч. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета сушилки

Размеры ленты		Расход природного газа, м ³ /ч	Производительность вытяжного вентилятора, м ³ /с	Производительность по сухому продукту, кг/ч
Ширина, м	Длина, м			
0,9	9,6	13	0,8	100
1,2	9,6	16,8	0,8	130
1,2	16,8	32,4	0,8	250

Таким образом, представленная математическая модель позволяет прогнозировать изменение влагосодержания и температуры карбоната лития, температуры воздуха и топочных газов, а также выбирать параметры, обеспечивающие сушку в требуемых температурных диапазонах. Кроме того, с помощью модели можно рассчитать конструктивные размеры сушилки: длину и ширину ленты.

Библиографический список

1. Кулифеев В. К., Миклушевский В. В., Ватулин И. И. Литий. М. : МИСиС, 2006. С. 8–12.
2. Рамазанов А. Ш., Атаев Д. Р., Каспарова М. А. Получение карбоната лития высокого качества из литийсодержащих природных рассолов // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2021. Т. 64, № 4. С. 52–58.
3. Липин А. А., Липин А. Г., Кириллов Д. В. Прогнозирование рациональных режимно-технологических параметров процесса сушки гранулированного поликапроамида // Вестник СГТУ. 2011. № 4(62). Вып. 4. С. 106–109.

УДК 66.011

Сергей Петрович Бобков, доктор технических наук, профессор кафедры
«Информационные технологии и цифровая экономика», bsp@isuct.ru

Ирина Александровна Астраханцева, доктор экономических наук, заведующий кафедрой
«Информационные технологии и цифровая экономика», i.astrakhantseva@mail.ru

Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, г. Иваново

Исследование процессов нелинейной диффузии с использованием систем клеточных автоматов

Аннотация. Использование классических моделей в виде дифференциальных уравнений различного вида при исследовании нелинейных явлений и процессов в неоднородных средах является затруднительным. В данной работе рассмотрена возможность использования дискретных подходов для моделирования нелинейных процессов переноса массы в условиях неоднородности материала. Для имитационного моделирования указанных процессов предложено использовать системы клеточных автоматов. Данный подход позволяет рассматривать сплошную среду, как совокупность взаимодействующих элементов (клеток), поведение которых полностью описывается локальными зависимостями. При этом законы функционирования клеток рассматриваются как детерминированные и соответствуют фундаментальным положениям теории диффузии. Приведены примеры использования систем клеточных автоматов для имитационного моделирования процесса диффузии в неоднородных средах. Показано, что рассмотренный подход дискретное является хорошей альтернативой классическим континуальным методам.

Ключевые слова: имитационное моделирование, клеточные автоматы, нелинейная диффузия.

Sergei P. Bobkov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor
of the Department of Information Technologies and Digital Economy, bsp@isuct.ru

Irina A. Astrakhantseva, Advanced Doctor in Economic Sciences, Head of the Department
of Information Technologies and Digital Economy, i.astrakhantseva@mail.ru

Ivanovo State University of Chemical Technology, Russia, Ivanovo

Investigation of nonlinear diffusion processes with using of cellular automata systems

Abstract. The use of classical models in the form of differential equations of various types in the study of nonlinear phenomena and processes in inhomogeneous media is difficult. In this paper, we consider the possibility of using discrete approaches for modeling nonlinear mass transfer processes under conditions of material inhomogeneity. For simulation modeling of these processes, it is proposed to use cellular automata systems. This approach allows us to consider a continuous medium as a set of interacting elements (cells), whose behavior is completely described by local dependencies. At the same time, the laws of cell functioning are considered as deterministic and correspond to the fundamental provisions of the diffusion theory. Examples of the use of systems of cellular automata for simulation modeling of the diffusion process in inhomogeneous media are given. It is shown that the discussed discrete approach is a good alternative to classical continuum methods.

Keywords: simulation modeling, cellular automata, nonlinear diffusion.

Диффузионные явления исследуются давно и к настоящему времени, в целом, достаточно изучены. Так предложены и проверены механизмы диффузии, развит математический аппарат, измерены и успешно используются параметры и физические характеристики процесса. Тем не менее, существует ряд частных вопросов, которые остаются открытыми. В частности, серьезной проблемой оказывается процедура решения уравнений для диффузии в неоднородных средах, для тел сложной формы, при фазовых переходах и т. п. [1, с.23].

Указанные трудности в значительной степени связаны с тем, что классические подходы к математическому описанию диффузии предполагают использование уравнений математической физики. Они обычно записываются в виде дифференциальных уравнений с частными производными и относятся к классу непрерывных (континуальных) моделей. Будучи формализацией фундаментальных законов сохранения, уравнения диффузии получены с использованием гипотез о градиентной связи потенциалов переноса с потоками вещества. Последнее привело к тому, что основной кинетический параметр процесса – коэффициент диффузии в классической постановке представляется константой. Попытки решения нелинейных задач диффузии в рамках классического подхода достаточно сложны и существенно ограничивают применение классических континуальных подходов при современных исследованиях [4, с.5]. Одним из направлений в моделировании процессов нелинейной и нестационарной диффузии является использование дискретных динамических моделей и, в частности, систем клеточных автоматов [2, с.69].

В основе данного подхода лежит рассмотрение функционально идентичных пространственных элементов (клеток). Размеры и форма клеток не играют принципиальной роли, однако важно, чтобы обеспечивалась возможность считать протекающие внутри них процессы не зависящими от пространственных координат. Все клетки системы могут изменять свое состояние одновременно по шагам дискретного времени. Правила, по которым происходят изменения состояний, описываются в рамках локальных взаимодействий. Последнее позволяет рассматривать каждую клетку, как абстрактный автомат, который меняет свое состояние под действием сигналов, которыми клетки-автоматы обмениваются с ближайшими соседями [1, с.25].

Таким образом, целый ряд макроскопических явлений можно свести к точно определенным локальным процессам, что представляет не только большой методологический интерес, но и делает исследуемое явление физически ясным.

В качестве иллюстрации рассмотрим моделирование процесса молекулярной диффузии в двухмерной постановке.

Разобьем плоскую пластину на клетки размером $h \times h$. Таким образом, будет получен массив M , число клеток которого $M = N_x \times N_y$, где N_x и N_y – количество клеток вдоль соответствующих осей координат. Положение каждой клетки определяется двумя пространственными индексами. Укажем также, что каждая клетка имеет четырех соседей, с которыми она контактирует.

Динамика функционирования массива M реализуется последовательностью итераций [3, с.644]:

$$M(t+1) = F[M(t)], \quad (1)$$

где t – номер итерации, представляющий собой дискретное время; F – функция, согласно которой клетки-автоматы меняют свое состояние (функция переходов).

Исходной точкой является начальное состояние массива $M(0)$, которое затем меняется в соответствии с отображением последования (1), определяя распределение состояний клеток в каждый момент времени – $M(t)$.

В качестве параметра состояния клеток возьмем величину концентрации вещества. Согласно физическим законам, в неравновесных условиях разница концентраций в соседних

клетках вызовет соответствующий поток вещества между ними. Величины этих потоков можно рассматривать, как сигналы, которыми обмениваются клетки-автоматы и которые вызывают смену их состояний.

Укажем явный вид функций переходов клеток-автоматов, т.е. уравнений связи между состояниями клеток и входными сигналами. Используем дискретную форму записи первого закона Фика для потоков вещества, отнесенных к единице объема:

$$\frac{C_i(t_{k+1}) - C_i(t_k)}{\Delta t} = \frac{1}{h^2} \sum_j \left[D_i (C_i(t_k) - C_j(t_k)) \right], \quad (2)$$

где $C_i(t_k)$ – концентрация вещества в i -й клетке на k -м шаге по времени; $C_i(t_{k+1})$ – то же на $k+1$ -м шаге по времени; $C_j(t_k)$ – концентрация в j -й соседней клетке на k -м шаге по времени; D_i – коэффициент диффузии материала i -й клетки; Δt – интервал квантования времени; h – шаг по пространственным координатам; j – клетки-соседи рассматриваемой точки.

Разности концентраций, находящиеся под знаком суммы в правой части уравнения (2) можно выразить через потоки вещества:

$$C_i(t_{k+1}) = C_i(t_k) + \frac{\Delta t}{h^2} \cdot \sum_j D_i g_{i,j}(t_k), \quad (3)$$

где $g_{i,j}$ – поток вещества от соседних клеток.

Выражение (3) позволяет вычислять новое состояние любой клетки системы на каждом шаге дискретного времени. Можно заметить, что применение локальной зависимости (3) позволяет анализировать процессы в объектах с неоднородными физическими свойствами, поскольку коэффициент диффузии не предполагается одинаковым для всех клеток.

Уравнение (3) справедливо для клеток, имеющих разное количество соседей – т.е. и для клеток, расположенных внутри области, и для экземпляров, находящиеся на краях рассматриваемой области. Кроме того, если исследуемая область содержит источники или стоки вещества, их влияние на процесс можно учесть, добавив в уравнение (3) дополнительное слагаемое, учитывающее изменение состояния этих особых клеток во времени.

Рассмотрим пример анализа задачи нелинейной диффузии, когда коэффициент диффузии является функцией координаты.

Объектом была прямоугольная пластина, на одной из границ которой был локализован источник массы. Пластина была разбита на (21×31) клеток с шагом 1 мм. Начальная концентрация вещества в пластине была равна 0 условных единиц, начальная концентрация источника принималась 1 условной единице. Величина шага моделирование по времени соответствовала 0,2 с. Коэффициент диффузии линейно убывал вдоль оси x от $1,0 \cdot 10^{-5}$ до $0,1 \cdot 10^{-5}$ м²/с. В модели предполагалось, что массообмен с окружающей средой отсутствует. Результаты представлены на рисунке 1. В правом верхнем углу на данном и последующем рисунках проставлено время.

Рисунок 1 иллюстрирует неравномерность поля концентраций в пластине, которая более ярко выражена в начальные моменты времени.

Второй пример содержит результаты исследования процесса диффузии в неоднородном объекте. Здесь модельная пластина содержала линейный участок с нулевым коэффициентом диффузии – не пропускающий вещество. Коэффициент диффузии остальной области пластины был взят $0,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Линейный источник массы на границе пластины поддерживал постоянную концентрацию вещества. Остальные параметры процесса соответствовали условиям предыдущего примера. Результаты моделирования представлены на рисунке 2. Там же условно показано положение препятствия.

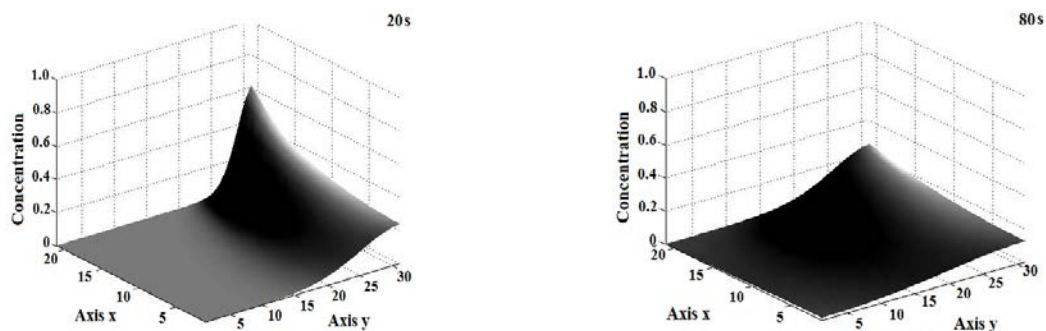


Рисунок 1 – Результаты исследования нелинейной диффузии

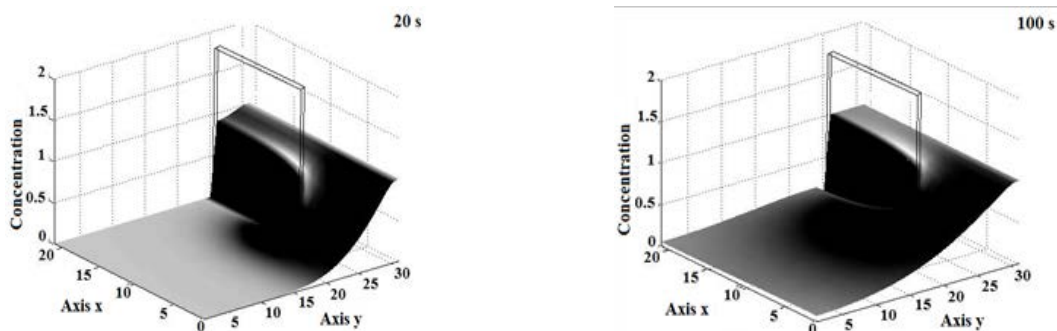


Рисунок 2 – Результаты моделирования процесса диффузии в пластине с препятствием

Следует отметить, что представленные результаты соответствуют принятым представлениям о природе рассмотренных процессов.

Представленные результаты иллюстрируют возможности использования систем клеточных автоматов для моделирования явлений нелинейной диффузии. Описанный подход представляется физически более ясным по сравнению с применением дифференциальных уравнений с частными производными, а также достаточно простым в реализации с точки зрения практического использования.

Моделирование с применением систем клеточных автоматов позволяет рассматривать большую и сложную систему, как множество взаимодействующих элементов. То есть, первоначальная общая задача разбивается на несколько несложных дискретных задач. При этом действия локальных элементов формируют поведение системы в целом. С этих позиций набор клеток, обладающих конкретными свойствами, можно рассматривать, как некий вычислительный инструмент, позволяющий имитировать реальные явления. Последнее особенно важно при создании эффективных имитационных моделей для изучения пространственно распределенных процессов и систем.

Библиографический список

1. **Бобков С. П.** Использование дискретных подходов для моделирования основных процессов химической технологии // Российский химический журнал. 2019. т. LXIII, вып 3-4, С. 22–30.
2. **Бобков С. П., Астраханцева И. А., Галиаскаров Э. Г.** Применение системного подхода при разработке математических моделей // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2021. № 1(65). С. 66–71.
3. **Бобков С. П., Галиаскаров Э. Г.** Моделирование процесса теплопроводности с использованием систем клеточных автоматов // Программные продукты и системы. 2020. № 4. С. 641–650.
4. **Bobkov S., Galiaskarov E., Astrakhantseva I.** The use of cellular automata systems for simulation of transfer processes in a non-uniform area // CEUR Workshop Proceedings, Moscow, 20 января 2021 года. Moscow, 2021.

УДК 621.311.22

Владимир Павлович Жуков, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Прикладная математика», zhukov-home@yandex.ru

Илья Андреевич Кокулин, аспирант, ilyakokulin@gmail.com

Владимир Николаевич Виноградов, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Химия и химические технологии в энергетике», office@ivensser.com
Ивановского государственного энергетического университета, Россия г. Иваново

Матричное моделирование испарительных установок с учетом капельного уноса влаги

Аннотация. Испарительные установки широко используются в промышленных технологиях для получения очищенной воды или концентрата, растворенных в ней веществ. Многоступенчатые испарительные установки мгновенного вскипания по тепловой эффективности относятся к одному из наиболее перспективных видов испарительного оборудования. Целью предлагаемых исследований является совершенствование технологии очистки воды в многоступенчатых испарительных установках мгновенного вскипания, выполненное на базе математической модели, учитывающей капельный унос влаги при испарении. Для постановки и решения задач проектирования используются комбинаторные [1] и матричные [2] подходы к моделированию тепломассообменных процессов, построенные на уравнениях тепловых и материальных балансов. В рамках проведенных исследований предложена комбинаторная модель распределения капель по размерам при испарении, разработана модель сепаратора капель, предназначенного для предотвращения капельного уноса влаги и попадания примесей в дистиллят. Выполнена оценка влияния капельного уноса в многоступенчатых испарительных установках на качество целевого продукта. Предложен подход к проектированию многоступенчатых испарительных установок, позволяющий обеспечить заданные технологические показатели при различных режимах работы оборудования.

Ключевые слова: испарительные установки, капельный унос, тепломассообмен, матричная модель, сепарация влаги.

Vladimir P. Zhukov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor,
Head of the Department of Applied Mathematics, zhukov-home@yandex.ru

Ilya A. Kokoulin, Postgraduate Student, ilyakokulin@gmail.com

Vladimir N. Vinogradov, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the
Department of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering, office@ivensser.com
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia

Matrix modeling of evaporators with regard to dripping of moisture

Abstract. Evaporation plants are widely used in industrial technologies to obtain purified water or concentrate, substances dissolved in it. In terms of thermal efficiency, multistage evaporative flash units are one of the most promising types of evaporative equipment. The purpose of the proposed research is to improve the technology of water purification in multistage evaporative flash plants, based on a mathematical model that takes into account the droplet carryover of moisture during evaporation. To set and solve design problems, combinatorial [1] and matrix [2] approaches to modeling heat and mass transfer processes based on the equations of heat and material balances are used. As part of the research, a combinatorial model of droplet size distribution during evaporation was proposed, and a model of a droplet separator designed to prevent droplet entrainment of moisture and the ingress of impurities into the distillate was developed. The effect of droplet entrainment in

multistage evaporation plants on the quality of the target product has been evaluated. An approach to the design of multi-stage evaporator plants is proposed, which makes it possible to provide the specified technological indicators for various operating modes of the equipment.

Keywords: *evaporation plants, droplet entrainment, heat and mass transfer, matrix model, moisture separation.*

Многоступенчатая испарительная установка мгновенного вскипания (МИУ МВ) выгодно отличается от других типов испарительных установок высокими показателями тепловой эффективности процесса тепломассообмена [3]. Затраты тепловой энергии на испарение воды в ступени частично компенсируются использованием этой энергии для нагрева очищаемой воды при конденсации полученного пара. Суммарные затраты энергии, безвозвратно теряемые при такой организации процесса, по оценкам специалистов существенно меньше по сравнению с испарительными установками других конструкций. Дополнительную экономию тепловой энергии можно получить при эффективном включении испарителей в тепловые схемы электрических станций [3]. Следует отметить, что существующие модели и методы расчета испарительных установок [2, 3] не учитывают влияние капельного уноса влаги на качество готового продукта, что существенным образом снижает прогностическую ценность моделей. Широкое использование многоступенчатых испарительных систем в энергетике и смежных отраслях промышленности делают актуальными исследования, направленные на совершенствование эксплуатации и проектирования данных установок.

Каждая ступень испарительной установки включает чистый и грязный отсеки. Попадание перегретой воды в грязный отсек ступени с пониженным давлением приводит к ее мгновенному вскипанию, которое сопровождается интенсивным парообразованием. Вместе с паром в чистый отсек ступени может уноситься влага в виде капель. При этом капельный унос влаги сопровождается переходом примесей, содержащихся в каплях, из грязного отсека в чистый, что приводит к загрязнению и снижению качества дистиллята.

Разработка модели МИУ МВ с учетом уноса капель при испарении выполняется в несколько этапов. На первом этапе в рамках комбинаторного подхода определяется распределение капель по размерам в зоне испарения грязного отсека. На втором этапе в рамках известного подхода к расчету сепараторов с использованием вероятностей выноса капель в чистый отсек предлагается модель сепаратора [1, 4], которая позволяет определить долю улавливаемых в нем капель. Эффективность улавливания капель и содержащихся в них примесей, в свою очередь, позволяет определить содержание примесей в чистом отсеке. На третьем этапе из решения уравнений тепломассопереноса находятся потоки дистиллята и перегретой воды для каждой ступени многоступенчатой испарительной установки, затем вычисляется содержание примесей в этих потоках.

Анализ полученных результатов показывает, что разработанная комбинаторная модель распределения капель по размерам при испарении перегретой воды при ее попадании в зону пониженного давления позволяет прогнозировать капельный унос и концентрацию минеральных примесей в очищенной воде при различных условиях эксплуатации испарительных установок.

Библиографический список

1. Mizonov V. E., Zhukov V. P. Simulation of Grinding: new Approaches. Ivanovo, 1997. 108 с.
2. Жуков В. П., Кокулин И. А., Виноградов В. Н. Моделирование и расчет процесса тепломассообмена в многоступенчатых многопоточных испарителях мгновенного вскипания // Вестник ИГЭУ. 2023. вып. 1. С. 71–78.
3. Мошкарин А. В., Бускунов Р. Ш. Испарительные установки тепловых электростанций. М. : Энергоатомиздат. 1994. 272 с.
4. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М. : Высшая школа, 1997. 479 с.

УДК 536.7

Сергей Владимирович Вендин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и электротехнологии в АПК», elapk@mail.ru Белгородского государственного аграрного университета имени В. Я. Горина, Россия, г. Белгород

К расчету мощности дополнительных источников теплоты для подогрева продукта в биореакторах цилиндрической и шаровой форм на основе решения уравнения теплопроводности Фурье

***Аннотация.** В статье приведены результаты теоретических исследований по оценке величины мощности дополнительных источников теплоты для подогрева сырья в биогазовом реакторе. В основу анализа положены решения уравнения теплопроводности Фурье в слоистых средах. Представлены расчетные формулы по оценке мощности дополнительных источников теплоты для биореакторов цилиндрической и шаровой форм. Приведенные соотношения получены с учетом граничных условий 3-го рода на внешней поверхности реактора и граничных условий 4-го рода на границе между внутренним объемом и внутренней поверхностью стенки реактора.*

***Ключевые слова:** биогаз, биореактор, источники теплоты, мощность.*

Sergey V. Vendin, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Equipment and Electrical Technologies in the Agroindustrial Complex, elapk@mail.ru Belgorod State Agrarian University named after V. Ya. Gorin, Russia, Belgorod

On the calculation of the power of additional sources of heat for product heating in cylindrical and ball shaped bioreactors on the basis of solution of the Fourier heat conductivity equation

***Abstract.** The article presents the results of theoretical studies to assess the power of additional heat sources for heating raw materials in a biogas reactor. The analysis is based on solutions of the Fourier heat equation in layered media. Calculation formulas for estimating the power of additional heat sources for cylindrical and spherical bioreactors are presented. The above relations were obtained taking into account the boundary conditions of the 3rd kind on the outer surface of the reactor and the boundary conditions of the 4th kind at the boundary between the internal volume and the inner surface of the reactor wall.*

***Keywords:** biogas, bioreactor, heat sources, power.*

С учетом возрастающего энергопотребления вопросы разработки и эффективного использования альтернативных и возобновляемых источников энергии являются своевременными и актуальными. При этом возможно использование энергии ветра, солнца, производство биогаза из органических отходов и др. [1–3]. Кроме того, утилизация и переработка органических отходов весьма актуальны для современного сельского хозяйства. Поэтому применение эффективных технологий сбраживания органических отходов с получением биогаза и органических удобрений весьма важно не только с экономических позиций, но и с позиций экологии и охраны окружающей среды. На эффективность переработки органического сырья в биогаз влияет множество факторов, среди которых можно выделить следующие: состав сырья; технологические режимы перемешивания сырья; температурные режимы при сбраживании. Температурные режимы сбраживания определяются составом сырья и видом используемых бактерий. Последние, в свою очередь, подразделяются на несколько

типов: и термофильные (свыше 40 °С); мезофильные (25...40 °С); психрофильные (20...25 °С). При этом нельзя допускать слишком большой перепад температур внутри объема биореактора. Согласно существующим требованиям диапазон температур внутри реактора желательно обеспечивать в следующих пределах: ± 2 °С/ч (при психрофильном режиме); $\pm 0,5$ °С/ч (при термофильном режиме) [2, 3].

Как показывает практика для поддержания оптимальных температур внутри реактора теплоты выделяющейся во время химической реакции брожения недостаточно. Поэтому используют дополнительный теплоподвод, или дополнительные источники теплоты [4]. Обычно это теплота подводимая с применением теплоносителей в теплообменных аппаратах, или электронагревательные устройства размещаемые во внутреннем объеме биореактора (электрические нагреватели – ТЭНы). Этот вопрос изучен недостаточно, так как нет достаточно удобных методик и рабочих формул для оценки величины мощности дополнительных источников теплоты с учетом размеров биореактора, свойств сырья и условий окружающей среды. Стандартные методики, учитывающие площадь поверхности, среднегодовые температуры, материал конструкций и др. в данном случае не применимы и дают большую погрешность. Нами предлагается проводить оценку величины мощности дополнительных источников теплоты на основе решения уравнения теплопроводности Фурье в слоистых средах [5–7].

Такой подход был рассмотрен ранее и представлен в работе [5]. Однако физическая модель представляла наиболее простой случай для биореактора цилиндрической формы. Для упрощения исследовалось решение для осесимметричной задачи при равномерном распределении источников теплоты во внутреннем объеме биореактора.

Более общий случай для реактора цилиндрической формы можно представить в виде физической модели, когда биореактор представляется в виде сплошного цилиндра с внутренним радиусом R_1 (рабочий объем реактора) и высотой H , окруженного цилиндрической оболочкой радиусом R_2 и со стенкой толщиной Δ . Для основных размеров выполняется условие: $R_2 = R_1 + \Delta$.

Если технологический диапазон изменения температуры при сбраживании определять, как разницу значений температурного поля между центром биореактора $T_1(0)$ и у внутренней стенкой биореактора $T_1(R)$:

$$\Delta T_1 = T_1(0) - T_1(R), \quad (1)$$

то для расчета тепловой мощности дополнительных источников теплоты P (Вт) можно использовать выражение [8]:

$$P = 4\pi\lambda_1 H \Delta T_1, \quad (2)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности среды во внутреннем объеме (Вт/м·К); H – высота реактора, м

Более общий случай для реактора шаровой формы можно представить в виде физической модели, когда биореактор представляется в виде сплошного шара с внутренним радиусом R_1 (рабочий объем реактора), окруженного сферической оболочкой радиусом R_2 и со стенкой толщиной Δ . Для основных размеров выполняется условие: $R_2 = R_1 + \Delta$.

Расчеты показывают, что в этом случае для выполнения условия (1) оценку тепловой мощности дополнительных источников теплоты P (Вт) можно проводить согласно выражения:

$$P = 8\pi\lambda_1 R_1 \Delta T_1, \quad (3)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности среды во внутреннем объеме (Вт/м·К); R_1 – внутренний радиус реактора, м

Необходимо отметить, что условие (1) и выражения (2) и (3) формально не учитывают стенку реактора и условия теплообмена. Для этого необходимо исходить из обеспечения

рекомендуемой и нормируемой (критической) внутри реактора температуры на оси реактора $T_{кр} = T_1(0)$. Тогда, с учетом теплоотдачи в окружающую среду, необходимо выполнение условия по разнице температур вида:

$$\Delta \bar{T} = T_1(0) - T_c, \quad (4)$$

где T_c – температура окружающей среды снаружи реактора, °C

Согласно проведенному теоретическому анализу расчет мощности для реактора цилиндрической формы можно проводить по формуле:

$$P = 4\pi\lambda_1 H \Delta \bar{T} F_{ц}(R_1, \Delta, \lambda_1, \lambda_2, \alpha), \quad (5)$$

а для реактора шаровой формы использовать выражение вида:

$$P = 8\pi\lambda_1 R_1 \Delta \bar{T} F_{ш}(R_1, \Delta, \lambda_1, \lambda_2, \alpha), \quad (6)$$

где $F_{ц}(R_1, \Delta, \lambda_1, \lambda_2, \alpha)$, $F_{ш}(R_1, \Delta, \lambda_1, \lambda_2, \alpha)$ – безразмерные функции учитывающие свойства стенки и условий теплообмена; α – коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности; λ_1 – коэффициент теплопроводности биогазовой среды; λ_2 – коэффициент теплопроводности стенки реактора.

Функции $F_{ц}(R_1, \Delta, \lambda_1, \lambda_2, \alpha)$ и $F_{ш}(R_1, \Delta, \lambda_1, \lambda_2, \alpha)$, с учетом граничных условий 3-го рода на внешней поверхности реактора и граничных условий 4-го рода на границе между внутренним объемом и внутренней поверхностью стенки реактора, однозначно определяются выражениями вида:

$$F_{ц}(R_1, \Delta, \lambda_1, \lambda_2, \alpha) = 1/[1 + 2(\lambda_1/(\lambda_2))(\ln(R_2/R_1) + 2(\lambda_1/\alpha)(1/R_2)], \quad (7)$$

$$F_{ш}(R_1, \Delta, \lambda_1, \lambda_2, \alpha) = 1/[1 + 2(\lambda_1/(\lambda_2))[(1 - (R_1/R_2)) + 2(R_1/R_2)(\lambda_1/\alpha)(1/R_2)]. \quad (8)$$

Библиографический список

1. Шопинский С. Н., Вендин С. В. Проблемы и перспективы использования ветро-электрических установок в зонах со слабыми ветрами // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2016. № 1(9). С. 16–20.
2. Евстафьев Д. П. Повышение эффективности технологии анаэробной переработки биоотходов применением электротехнического устройства контроля pH: Автореф. ... дис. кандидата технических наук : 05.20.02 /Евстафьев Денис Петрович. Саратов, 2015. 16 с.
3. Садчиков А. В., Кокарев Н. Ф. Оптимизация теплового режима в биогазовых установках // Фундаментальные исследования. 2016. № 2-1. С. 90–93.
4. Вендин С. В., Мамонтов А. Ю. Автоматизация механических и тепловых процессов в многокамерном биогазовом реакторе непрерывной загрузки сырья // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина. 2016. №4 (74). С. 55–60.
5. Вендин С. В., Мамонтов А. Ю. Расчет мощности дополнительных источников теплоты для подогрева биомассы в биогазовом реакторе // Вестник Белгородского государственного технологического университета им.В.Г. Шухова. 2017. № 7. С. 97–99.
6. Vendin S. On the solution of problems of transient heat conduction in layered media // International Journal of Environmental and Science Education. 2016. Т.11. № 18. С. 12253 –12258.
7. Vendin S.V. Calculation of nonstationary heat conduction in multilayer objects with boundary conditions of the third kind // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 1993. Т. 65. № 2. С. 823–825.
8. Вендин С. В., Мамонтов А. Ю., Ульянов Ю. Н. К выбору теплоизоляции для корпуса биогазового реактора с учетом дополнительного подогрева сырья // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2020. № 2(26). С. 16–26.

УДК 621.365

Ольга Роальдовна Дорняк, доктор технических наук, профессор,
 зав. кафедрой «Электротехника, теплотехника и гидравлика», ordornyak@mail.ru
 Воронежский государственный Лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова,
 Россия, г. Воронеж
Александр Борисович Недоносков, старший преподаватель, alexandr63339@yandex.ru
 Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина,
 Россия, г. Воронеж

Моделирование теплообмена в жестких аэродромных покрытиях при СВЧ-нагреве двухслойного деформационного шва

Аннотация. Представлены результаты математического и физического моделирования процесса термической обработки деформационного шва жесткого аэродромного покрытия с помощью специальной СВЧ-установки. Цель нагрева связана с реализацией способа увеличения периода эксплуатации покрытия. Физическая модель имитирует фрагмент такого покрытия. Математическая модель включает уравнения для описания распространения электромагнитной волны и уравнение теплопроводности, записанное с учетом неоднородного распределения мощности тепловых источников, определяемого из решения задачи электродинамики. Сравнение результатов численного и натурного эксперимента позволяет сделать вывод о возможности использования предложенной математической модели для выбора эффективных режимов термообработки деформационных швов аэродромных покрытий.

Ключевые слова: температура, СВЧ-нагрев, деформационный шов, математическое моделирование, электромагнитное поле.

Olga R. Dorniyak, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Engineering, Heat Engineering and Hydraulics, ordornyak@mail.ru
 Voronezh State University Forestry Engineering University named after G.F. Morozov,
 Russia, Voronezh
Alexander B. Nedonoskov, Senior Lecturer, alexandr63339@yandex.ru
 The Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin,
 Russia, Voronezh

Simulation of heat exchange in rigid aerodrome coatings at microwave heating of two-layer deformation joint

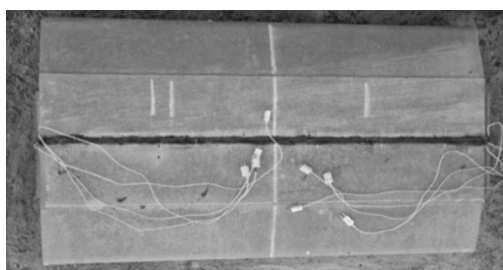
Abstract. The results of mathematical and physical modeling of the process of heat treatment of the deformation seam of a rigid airfield coating using a special microwave installation are presented. The purpose of heating is related to the implementation of a method to increase the period of operation of the coating. The physical model simulates a fragment of such a coating. The mathematical model includes equations for describing the propagation of an electromagnetic wave and a thermal conductivity equation written taking into account the inhomogeneous power distribution of heat sources. Comparison of the results of numerical and full-scale experiments allows us to conclude that the proposed mathematical model can be used to select effective heat treatment modes for deformation seams of airfield coatings.

Keywords: temperature, microwave heating, deformation joint, mathematical modeling, electromagnetic field.

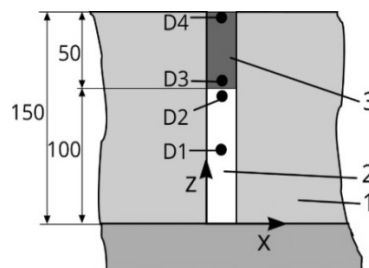
Нарушение герметичности деформационных швов ведет к снижению качества жесткого аэродромного покрытия. Известные способы восстановления деформационных швов, как правило, связаны с полной заменой старого заполнителя на новый, что является трудоемкой операцией, выполнение которой требует остановки эксплуатации взлетно-посадочных полос.

В настоящее время в строительной индустрии значимы технологии, использующие электромагнитный нагрев в различных диапазонах частот [1, с.1]. В [2] предложена методика увеличения сроков службы деформационных швов за счет ликвидации в слое герметика мелких трещин, сколов и прочих небольших дефектов путем интенсивного теплового воздействия. Диэлектрический нагрев до текучего состояния герметизирующего материала осуществляет СВЧ-установка, перемещающаяся вдоль шва.

Для определения режимных параметров предложенной технологической операции необходимо изучение процессов теплопередачи. В данной работе проведено экспериментальное и теоретическое исследование теплового воздействия электромагнитного поля СВЧ-диапазона на объект, моделирующий фрагмент жесткого аэродромного покрытия (рисунок 1а). При этом деформационный шов является двухслойным (рисунок 1б).



а



б

Рисунок 1 – Общий вид модели жесткого аэродромного покрытия:

а – схема заполненного деформационного шва; б – 1 – цементобетонная плита;
2 – пескоцементная смесь; 3 – герметизирующий материал (БПГ-25)

Подробное описание экспериментальной установки для СВЧ-нагрева зоны деформационного шва (рисунок 2), материалов опытного объекта и методов измерений температуры дано в [3–4]. В данной работе представлена математическая модель диэлектрического нагрева элемента аэродромного покрытия и выполнена ее верификация.



Рисунок 2 – Общий вид экспериментальной СВЧ-установки:

1 – блок питания с магнетроном; 2 – волновод; 3 – рупорная антенна;
4 – экранирующий пояс; 5 – передвижная опорная рама; 6 – охлаждающий вентилятор

Математическая модель включает уравнения для описания распространения электромагнитной волны и уравнение теплопроводности, записанное с учетом неоднородного распределения мощности тепловых источников, определяемого из решения задачи электродинамики. Предполагается, что все материалы являются изотропными, а их физические свойства не зависят от температуры.

Принято, что электромагнитная волна является монохроматической. В этом случае для рассматриваемых сред, имеющих свойства диэлектриков, вектор напряженности электрического поля удовлетворяет уравнению Гельмгольца [5]:

$$\Delta \tilde{E}(r) + \gamma^2 \tilde{E}(r) = 0, \quad \gamma = \omega \sqrt{\tilde{\epsilon}_a \tilde{\mu}_a} = \beta - i\alpha, \quad (1)$$

$$\tilde{\epsilon}_a = \epsilon_a (1 - i \cdot \operatorname{tg} \delta), \quad \tilde{\mu}_a = \mu_a \cos \delta_M - i \mu_a \sin \delta_M,$$

где \tilde{E} – комплексная амплитуда вектора напряженности электрического поля, В/м; r – радиус вектор точки пространства, м; Δ – дифференциальный оператор Лапласа; γ – комплексный коэффициент распространения; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды; $\epsilon_a = \epsilon_0$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость; μ – относительная магнитная проницаемость среды; $\mu_a = \mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость; β – волновое число, рад/м; α – коэффициент затухания м⁻¹; ω – круговая частота, с⁻¹; величина $i = \sqrt{-1}$, $\epsilon_0 = 10^{-9}/(36\pi)$, ф/м; – диэлектрическая проницаемость вакуума, ф/м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м; σ – удельная проводимость см/м; δ_M – угол магнитных потерь; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

Уравнение теплопроводности записано в виде:

$$\rho c_p \frac{\delta T}{\delta t} = \nabla(\lambda \nabla T) + I_{mw} \quad (2)$$

где T – температура, К; t – время, с; ρ – плотность материала, кг/м³; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); I_{mw} – удельная поглощенная мощность СВЧ-излучения, Вт/м³.

Плотность внутренних источников тепла в материалах слоев деформационного шва за счет воздействия СВЧ определяется, как известно, следующим образом [5]:

$$I_{mw} = 0,5 \omega \epsilon_0 \epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2.$$

При проведении модельных расчетов источник СВЧ излучения занимал фиксированное положение, как в опыте.

Решение электродинамической задачи выполняется при следующих граничных условиях. На боковых стенках волновода и внешнем ограждении тонкой воздушной прослойки (между плоскостью раскрытия рупора и поверхностью элемента покрытия) тангенциальная компонента вектора напряженности электрического поля равна нулю (условие идеальной проводимости). На входе в волновод известна мощность и частота излучения, что позволяет вычислить граничное значение амплитуда волны (волна типа H₁₀) [5]. На внешних поверхностях облучаемого фрагмента покрытия принято условие полного поглощения электромагнитной волны. На всех внутренних границах предполагается непрерывность тангенциальной проекции вектора напряженности электрического поля.

Решение нестационарной задачи теплопроводности осуществлено для однородных начальных условий. Граничные условия на внешних границах составного объекта учитывают конвективную теплоотдачу по закону Ньютона-Рихмана с различными коэффициентами теплоотдачи. На внутренних границах принято условие идеального теплового контакта.

Математическая модель сложна для аналитической формы исследования, которая, безусловно, имеет важные преимущества [1]. Поэтому модель реализована численно в 3D постановке на платформе COMSOL Multiphysics.

Тепло- и электрофизические параметры материалов герметика, пескоцементной смеси и бетона представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Тепловые и диэлектрические параметры материалов

Параметр	Бетон	Пескоцементная смесь	Герметик на основе битума
Плотность, ρ , кг/м ³	2200	1212	1048
Удельная теплоемкость при постоянном давлении, c_p , Дж/(кг·К)	837	1080	1613
Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/(м·К)	1,51	1	0,61
Относительная диэлектрическая проницаемость, ϵ'	6	5	2,6
Тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg}\delta$	0,031	0,045	0,006

В опыте мощность магнетрона с частотой излучения $f = 2450$ МГц составила $P_{\text{in}} = 1$ кВт. Нижнее прямоугольное сечение волновода имеет размеры 50×300 мм, верхнее – 50×95 мм. Высота воздушной прослойки между поверхностью шва и плоскостью раскрыва антенны – 10 мм. Высота пирамидальной части волновода – 200 мм, призматической – 97 мм.

В условиях эксперимента начальная температура фрагмента покрытия составила 295 К, температура окружающей среды – 300 К, температура основания 295 К. Коэффициенты теплоотдачи на всех внешних поверхностях покрытия равны $12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а под волноводом это значение оценено как $2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

На рисунке 3 представлены результаты верификации математической модели. Положение датчиков D1-D4 показано на схеме рисунка 1. Координата z их расположения (рисунок 1б) равна для D1 0,05 м, D2 – 0,098 м, D3 – 0,102 м, D4 – 0,149 м.

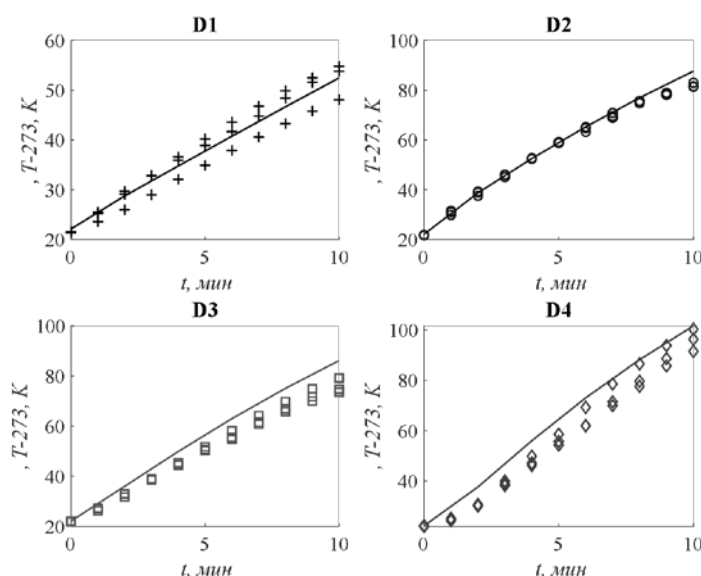


Рисунок 3 – Зависимость от времени значения температуры, измеренного в натурном эксперименте и рассчитанного по математической модели:

маркеры – экспериментальные значения, полученные с помощью датчиков D1-D4 при трех повторения, непрерывные кривые – расчет

Из графиков на рисунке 3 следует вывод об удовлетворительном совпадении расчетных и экспериментальных значений температуры в обоих слоях заполнителя деформационного шва.

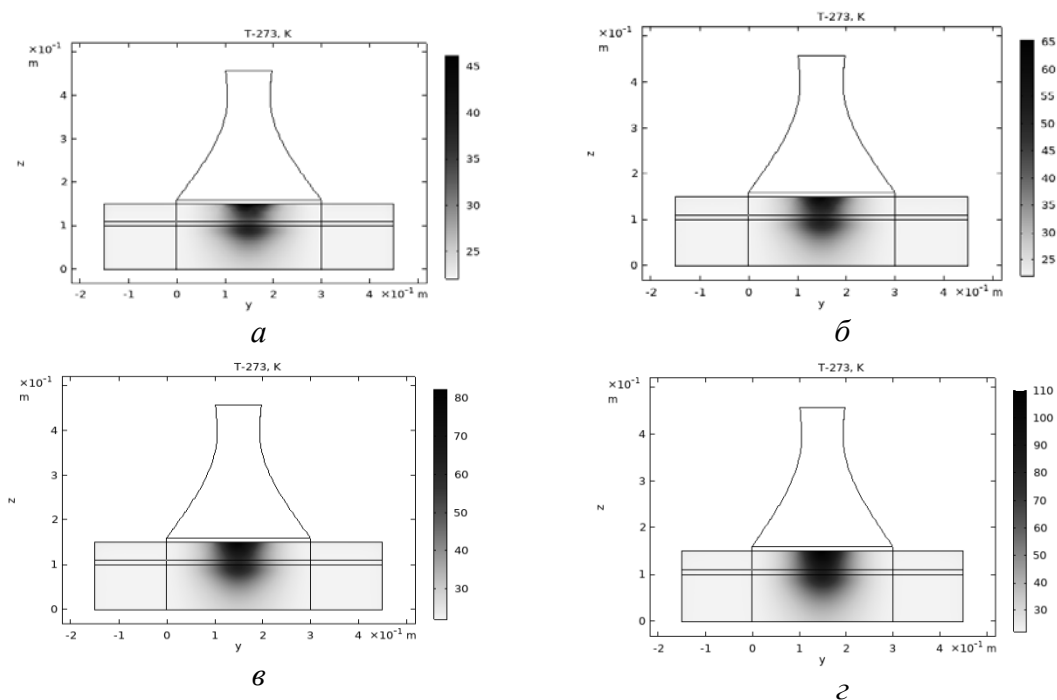


Рисунок 4 – Температурное поле в двухслойном деформационном шве: деформационном шве при $t = 2$ мин – а, 4 мин – б, 6 мин – в, 10 мин – г

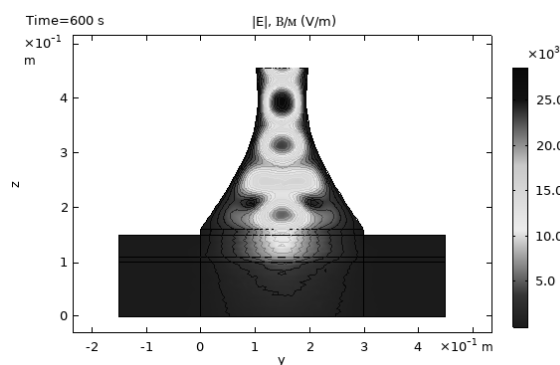


Рисунок 5 – Распределение модуля вектора напряженности электрического поля $|E|$, В/м в плоскости симметрии шва

Рисунок 4 иллюстрирует развитие температурного поля в двухслойном деформационном шве. В начале процесса при $t = 2$ мин наблюдаются две отдельные области с максимальной температурой ~ 45 °С в герметике и пескоцементной смеси, что обеспечено распределение вектора напряженности электрического поля (рисунок 4а) и особенностями диэлектрических свойств материалов. Затем эти области расширяются. В конце расчетного периода указанные области сливаются (рисунок 4г), что обусловлено теплопередачей от более нагретых зон к менее нагретым. При этом в слое герметика температура достигает ~ 100 °С и он переходит в текучее состояние. Следует заметить, что нагрев герметика для данной конструкции волновода эффективен только в центральной зоне проекции раскрытия рупора.

Вывод

Построенная математическая модель СВЧ-нагрева двухслойного деформационного шва жесткого аэродромного покрытия адекватно описывает результаты натурного эксперимента и может быть использована для проектирования технологических режимов интенсивной термообработки швов для увеличения периода их эксплуатации.

Библиографический список

1. **Рудобашта С. П.** Математическое моделирование процессов электромагнитного нагрева строительных материалов // Умные композиты в строительстве. 2021. Т. 2. № 3. С. 46–57. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021. DOI: 10.52957/27821919_2021_3_46.
2. Патент РФ № 2783131 от 09.11.22 Способ обработки и восстановления рабочих свойств швов жестких аэродромных и дорожных покрытий / Недоносков А. Б., Внуков А. Н., Дорняк О. Р., Санникова С. М., Макогон В.К. . Оpubл. 09.11.22 ; Бюл. № 31.
3. **Недоносков А. Б., Дорняк О. Р.** СВЧ-установка для термообработки деформационных швов жестких аэродромных покрытий // Промышленные процессы и технологии. – 2022. Т. 2, № 2. С. 100–107. DOI 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-100-107.
4. **Дорняк О. Р., Недоносков А. Б.** Экспериментальное исследование температурных параметров цементобетонного покрытия при СВЧ-нагреве деформационного шва // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2023. № 1(50). С. 22–29. DOI 10.24412/2227-1384-2023-150-22-29.
5. **Баскаков С. И.** Электродинамика и распространение радиоволн. М. : Высшая школа. 1992. 416 с.

УДК 532 + 536

Надежда Вадимовна Шумова, преподаватель «Кафедры процессов и аппаратов химических технологий имени Гельперина Н. И.», donatra@yandex.ru

Андрей Валентинович Вязьмин, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий «Кафедры процессов и аппаратов химических технологий имени Гельперина Н. И.», av1958@list.ru

Егор Константинович Королев, магистр «Кафедры процессов и аппаратов химических технологий имени Гельперина Н. И.», koroleveg24@gmail.com

МИРЭА – Российский технологический университет, Россия, г. Москва

Моделирование массообменных процессов при объемном инкубировании клеток в гелях с искусственными микроканалами

Аннотация. В технологии 3D-биопечати из гидрогелей изготавливают каркасы для нанесения клеточного материала, однако собственных массопроводных свойств гидрогелей недостаточно для обеспечения клеток необходимыми веществами и кислородом на постпечатном этапе. Для решения этой задачи был разработан реактор, в котором осуществим эффективный подвод кислорода в объем гидрогеля, содержащего живые клетки и одновременный отвод из него их конечного метаболита – углекислого газа. Предложена математическая модель, позволяющая качественно оценить динамику роста клеток в зависимости от плотности сети микроканалов для подачи кислорода.

Ключевые слова: сеть микроканалов, гидрогели с клетками, массообмен, 3D-биопечать.

Nadezhda V. Shumova, Lecturer at Department of Chemical Engineering Named After Gelperin N. I., donatra@yandex.ru

Andrey V. Vyazmin, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Associate Professor, Head at Department of Chemical Engineering Named After Gelperin N. I., av1958@list.ru

Egor K. Korolev, Master's Degree at department of Chemical Engineering Named After Gelperin N. I., koroleveg24@gmail.com

Master MIREA – Russian Technological University, Moscow

Modeling of mass transfer processes during volumetric incubation of cells in gels with artificial microchannels

Abstract. In 3D-bioprinting technology, hydrogels are used to make frameworks for applying cellular material, but their own mass-conducting properties of hydrogels are not enough to provide cells with the necessary substances and oxygen at the post-printing stage. To solve this problem, a reactor has been developed in which an efficient supply of oxygen to the volume of a hydrogel containing living cells and simultaneous removal of their final metabolite, carbon dioxide, from it is feasible. A mathematical model is proposed that allows us to qualitatively assess the dynamics of cell growth depending on the density of the network of microchannels for oxygen supply.

Keywords: microchannel network, hydrogels with cells, mass transfer, 3D-bioprinting.

Технология 3D-биопечати, является одним из направлений регенеративной медицины, которую относят к периоду четвертой технологической революции [1]. Технология 3D-биопечати, позволяет создавать трехмерные модели органов и тканей при

последовательном нанесении инкапсулированных в гидрогели агломератов стволовых или донорских клеток, на специальную гидрогелевую подложку [2]. Гидрогель в данной технологии выполняет роль внеклеточного матрикса, предохраняет клетки от механических повреждений, в нем клетки делятся и дифференцируются, через него к клеткам подводятся питательные вещества и кислород [3].

Однако, при печати медицински-значимых биоконструкций имеющих сложную геометрическую форму собственных массопроводных свойств гидрогелей недостаточно для обеспечения подвода к клеткам, необходимых веществ и кислорода [4]. Для решения этой проблемы были разработаны методики интенсификации массообменных процессов в объеме геля при создании разветвленной сети микроканалов [5, 6]. Экспериментально были подтверждены их стабильность и возможность их использования для осуществления конвективно-диффузионного подвода питательных веществ и кислорода в объем гидрогелиевых матриц [7].

В представленном на рис. 1 реакторе в сети разветвленных микроканалов расположен фитиль, по которому за счет капиллярных сил можно непрерывно осуществлять подвод кислорода к микроорганизмам и отводить из гидрогелиевой матрицы углекислый газ, образованный в результате их жизнедеятельности.

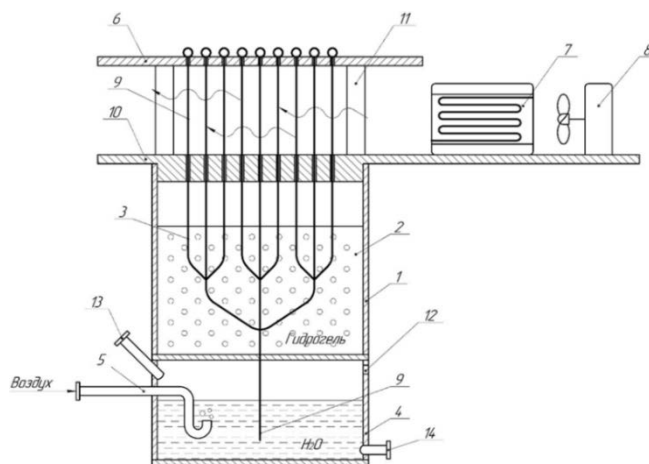


Рисунок 1 – Схема реактора:

1 – корпус аппарата, 2 – гидрогель с клетками, 3 – ветвящиеся микроканалы, 4 – емкость с водой, 5 – барботёр, 6 – держатель для закрепления фитиля, 7 – калорифер, 8 – вентилятор, 9 – ветвящийся фитиль, 10 – крышка, 11 – стойка для держателя, 12 – отверстие для отвода воздуха, 13 и 14 – штуцера для залива и слива, соответственно

Для возможности прогнозирования роста микроорганизмов при подаче кислорода через сеть искусственных, разветвленных каналов была разработана математическая модель, основанная на двух обыкновенных нелинейных, дифференциальных уравнениях.

При формулировке математической модели было принято, что клетки и микроканалы в гидрогеле равномерно распределены по всему объему. Интенсивность массопереноса кислорода из сети каналов в объем геля определяется коэффициентом массопередачи α и объемной площадью самих микроканалов, выражаемой через их удельную поверхность S . Схема такого биореактора представлена на рисунке 2.

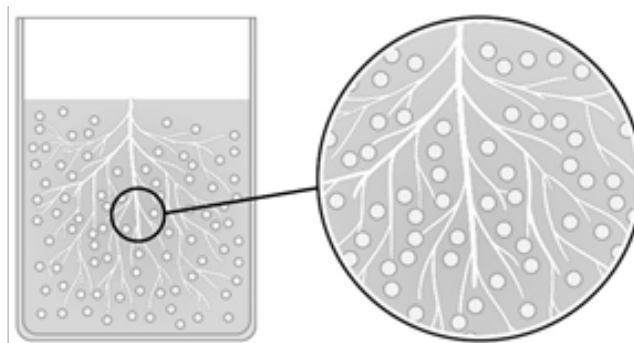


Рисунок 2 – Биореактор с аэробной культурой клеток и сетью разветвленных микроканалов равномерно распределённых в объеме геля

Баланс механизмов выделения и поглощения кислорода и изменения концентрации клеток в гелевом матриксе со временем t описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}\frac{dC}{dt} &= \alpha S (C_{\infty} - C) - KCY \\ \frac{dY}{dt} &= K_1 CY (Y_{\infty} - Y) - K_2 Y,\end{aligned}\quad (1)$$

где C_{∞} – концентрация кислорода в жидкости, протекающей по микроканалам, Y_{∞} – максимально достижимая концентрация клеток, ограниченная наличием свободного объема в гидрогеле, K – коэффициент интенсивности поглощения кислорода клетками определенного штамма с учетом их физиологической нормы его потребления, K_1 и K_2 – соответственно, коэффициенты, характеризующие интенсивности увеличения числа клеток в результате их деления и уменьшения, вследствие гибели по различным причинам. Здесь важно отметить, что динамика с учетом нелинейности данной системы уравнений может иметь не единственное решение. Для проведения качественного анализа рассмотрим стационарное состояние системы. Тогда из первого уравнения системы (1) получим выражение, описывающее изменение концентрации кислорода, и, подставив его во второе уравнение, получим выражение (2), описывающее изменение концентрации клеток

$$Y = \frac{\alpha S (K_1 C_{\infty} Y_{\infty} - K_2)}{KK_2 + \alpha SK_1 C_{\infty}}. \quad (2)$$

При бесконечно малых значениях комплекса $\alpha S \ll 1$ из выражения (2) следует, что концентрация клеток возрастает линейно комплексу αS .

При очень больших значениях комплекса $\alpha S \gg 1$ как следует из выражения (2) концентрация клеток от значения технологического комплекса αS будет описана зависимостью

$$Y = Y_{\infty} - \frac{K_2}{K_1 C_{\infty}}. \quad (3)$$

Зависимость, описывающая динамику роста клеток при их культивировании в объеме геля от технологического комплекса αS , с учетом изложенного выше анализа, представлена на рисунке 3.

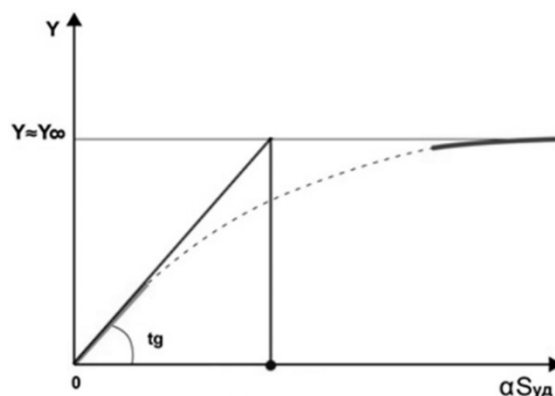


Рисунок 3 – Зависимость максимальной концентрации клеток, достижимой в объеме гидрогеля от технологического комплекса αS

Предложенный реактор для обеспечения жизнеспособности аэробных клеток может быть использован для организации постпечатного этапа аддитивной технологий 3D-биопечати. Математическая модель актуальна для качественного анализа динамики роста клеточной популяции в условиях лимитированной подачи кислорода через сеть искусственных микроканалов для его подачи. Показано, что достижение максимальной концентрации клеток в таких системах определяется технологическим комплексом, зависящим от удельной поверхности каналов, и концентрации кислорода в них.

Список литературы

1. Schwab K., Davis N. Shaping the Fourth Industrial Revolution. Switzerland: World Economic Forum, 2018. 287 p.
2. Bioink properties before, during and after 3D bioprinting / K. Holzl, S. Lin, L. Tytgat, S.V. Vlierberghe, L. Gu, A. Ovsianikov // Biofabrication. 2016. V. 8. pp. 1–19.
3. Wang S., Lee J. M., Yeong W. Y. Smart hydrogels for 3D bioprinting // International Journal of Bioprinting. 2015. V. 1(1). pp. 3–14.
4. Microorganisms growth in gel volume: process dynamics in limiting mass transfer conditions / B. G. Pokusaev, A. V. Vyazmin, D. A. Nekrasov, N. S. Zakharov, D. P. Khrantsov, N. V. Shumova, D. A. Belova // Chemical Engineering Transactions. 2020. V. 79. pp. 13–18.
5. Approaches to mass transfer modeling in micro-channels inside gel / B. G. Pokusaev, A. V. Vyazmin, D. A. Nekrasov, N. S. Zakharov, D. P. Khrantsov, N. V. Shumova // Bulgarian Chemical Communications. 2020. V. 52. pp. 68–73.
6. Шумова Н. В., Волкова Е. Д. Исследование процесса гелеобразования, адгезии слоев и интенсификации массообмена с помощью микроканалов в объеме гелей // Бутлеровские сообщения. 2022. № 9. С. 47–56.
7. Нестационарный массоперенос питательных веществ в гелях с каналами различной пространственной структуры / Б. Г. Покусаев, А. В. Вязьмин, Н. С. Захаров, Д. П. Храмцов, Д. А. Некрасов // Теоретические основы химической технологии. 2020. Т. 54. № 2. С. 163–175.

СЕКЦИЯ 2.

ТЕХНОЛОГИЯ И АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ СУШКИ, ТЕПЛОВЫХ И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ, ХИМИЧЕСКОЙ, ТЕКСТИЛЬНОЙ, ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ, МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ, МЕДИЦИНСКОЙ, ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 536.37:53856

Михаил Арсеньевич Брич, кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник, mabritch@hmti.ac.by

Николай Михайлович Горбачев, главный конструктор проекта, gor@hmti.ac.by

Иван Алексеевич Козначеев, кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник, ivkozn@hmti.ac.by

Дмитрий Сергеевич Макаренко, научный сотрудник, ivkozn@hmti.ac.by

Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальная академия наук Беларуси,
Белоруссия, г. Минск

Исследование торрефикации торфа в смеси с нефтяным коксом при микроволновом нагреве

Аннотация. Ввиду относительно низких затрат энергии микроволновой нагрев является перспективным методом для торрефикации торфа. Сухой торф характеризуется низким уровнем поглощения микроволнового излучения. Чтобы улучшить поглощение, используется смесь торфа с нефтяным коксом. В работе представлены результаты численного моделирования смеси торф – кокс, подверженной нагреву под влиянием микроволнового излучения. Был рассмотрен циклический режим микроволнового нагрева для различного относительного содержания кокса. Полученные результаты демонстрируют эффективность метода.

Ключевые слова: торрефикация, микроволновой нагрев.

Investigation of a peat mixed with petroleum coke torrefaction under microwave heating

Mikhail A. Brich, Ph. D. of Physico-mathematical Sciences, Senior Research Officer,
mabritch@hmti.ac.b

Nikolay M. Gorbachev, Chief Designer Of The Project, gor@hmti.ac.by

Ivan A. Kaznacheev, Ph. D. of Physico-mathematical Sciences, Senior Research Officer,
ivkozn@hmti.ac.by

Dmitry S. Makarenko, Researcher, ivkozn@hmti.ac.by

Institute of Heat and Mass Transfer named after A. V. Lykov National Academy of Sciences
of Belarus, Belarus, Minsk

Abstract. Microwave heating is a perspective method for a peat torrefaction due to relatively low energy costs. Meanwhile, dry peat is characterized by low level of radiation absorption. To improve the absorption, a mixture of the peat with a petroleum coke is used. Here, we present the results of the numerical simulation of the peat – coke mixture subjected to microwave radiation heating. The cyclic mode of radiation for various relative content of the coke has been considered. The results demonstrate the effectiveness of the method.

Keywords: torrefaction, microwave radiation heating.

Торрефицированный, подвергнутый мягкому пиролизу торф, по своим теплотехническим свойствам близок к углю и так же как уголь может быть использован в смеси с нефтяным коксом для улучшения энерго-экологических свойств последнего. Учитывая низкие энергетические затраты на торрефикацию сухих топлив, представляет практический интерес использование для этих целей микроволнового нагрева. Однако сухой торф с влажностью не более 16 % (торфяная сушенка), который используется при торрефикации, относится к материалам, слабо поглощающим микроволновую энергию, процесс микроволнового нагрева таких материалов характеризуется т.н. перегретой неустойчивостью, не позволяющей организовать управляемый технологический процесс. Для инициирования микроволнового нагрева таких материалов целесообразно использование дополнительных поглотителей микроволновой энергии [1]. Нефтяной кокс состоит в основном из углерода и может быть использован в качестве такого поглотителя. Поэтому актуальной задачей является исследование совместной микроволновой обработки смеси торфяной сушенки и кокса для получения смеси кокса и торрефицированного торфа. Контроль режимных параметров смеси торфяной сушенки и кокса при микроволновой обработке затруднён, поэтому важной задачей является численное моделирование этих процессов.

Задачей настоящей работы является изучение режимов тепловой обработки с использованием микроволнового нагрева дисперсных материалов с различными диэлектрическими свойствами на примере смеси торфа с нефтяным коксом. Исследование проводилось путём численного моделирования.

Известно, что торфяная композиция представляет собой твёрдообразный гетерогенный комплекс, в котором роль непрерывной фазы пористой матрицы играет торф, а наполнителем, вводимой дополнительной компонентой, являются дисперсные частицы [2]. Поэтому в расчетной модели для торфа принято приближение эффективной среды, а кокс рассматривается как дисперсная фаза, распределённая в этой среде.

Моделируется нагрев цилиндрического образца (диаметр 40 мм, длина 120 мм) двухкомпонентной смеси торфа (непрерывный компонент) и кокса (в виде дискретных включений) за счет поглощения энергии микроволнового излучения. Смесь находится в цилиндрической камере.

При расчете задавались технически достижимые значения удельной мощности W – 0,5...2,5 кВт/кг. Принято допущение, что в исследуемом диапазоне температур теплофизические и диэлектрические свойства от температуры не зависят. Для определения теплообмена между коксом и торфом использовалась модель теплообмена между частицами твердого мелкозернистого теплоносителя в засыпке [3]. Не учитывались затраты энергии на деструкцию материала торфа. Известно, что удельное потребление энергии при торрефикации биомассы в основном зависит от теплофизических свойств обрабатываемого материала [4]. Исследовался нагрев в динамическом и циклическом режимах при содержании кокса в смеси 0...80 % при условии необходимой длительности обработки в заданном температурном диапазоне.

Состояние каждого компонента характеризуется своей температурой T , являющейся функцией времени t и радиальной координаты r (неоднородность в осевом направлении не учитывается).

Динамика системы описывается уравнениями

$$\frac{\partial e_T}{\partial t} = W_T + Q - \text{div}(q) \quad (1)$$

$$\frac{\partial e_K}{\partial t} = W_K - Q \quad (2)$$

где индексы T и K относятся, соответственно, к торфу и коксу; e – плотность внутренней энергии, кДж/кг; ρ – плотность материала, кг/м³.

$$\rho_K = \beta \cdot \rho_{OK}, \rho_T = (1 - \beta) \cdot \rho_{OT} \quad (3)$$

где β – относительное содержание (объемная доля) кокса в смеси; ρ_0 – истинная плотность, кг/м³; c – удельная теплоёмкость, кДж/кг.

Удельная мощность, передаваемая материалу от излучения, кВт/кг

$$W = \omega \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2 \quad (4)$$

где $\omega = 2\pi f$, f – частота излучения, Гц; ε – диэлектрическая проницаемость соответствующего материала; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; E – эффективное значение напряженности электрического поля излучения.

Количество тепла, передаваемого от кокса торфу в единице объема в единицу времени,

$$Q = S \lambda_v (T_K - T_T) / \delta \quad (5)$$

где δ – эффективное значение ширины воздушного зазора между частицами кокса и торфом, м; λ_v – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); $S = N \pi d^2$ – удельная площадь межкомпонентной границы, м²; d – размер частиц кокса, м; $N = 1/(\pi d^3/6)$ – число частиц кокса в единице объема смеси; $q = -\lambda \nabla T$ – плотность теплового потока, Вт/м²; λ – коэффициент теплопроводности торфа, Вт/(м·К).

На боковой поверхности образца (при $r = R$)

$$q = \alpha \Delta T \quad (6)$$

где α – коэффициент теплообмена, Вт/м²·К; ΔT – разность между температурой торфа на поверхности образца и температурой окружающей среды, К.

При моделировании использовался метод численного решения Патанкара [5].

Размеры образца: $R = 20$ мм, $L = 120$ мм; размер частиц кокса $d = 1$ мм; частота излучения $f = 2,45$ ГГц; эффективное значение напряженности электрического поля $E = 250$ В/см; коэффициент теплообмена с окружающей средой $\alpha = 10$ Вт/м²·К.

Таблица 1 – Значения параметров материалов

Материал (вещество)	ρ_0 (кг/м ³)	c (Дж/кг·К) [6]	λ (Вт/м·К), [6]	ε (Ф/м), [7]	$\operatorname{tg} \delta$, [7]
Торф	500	1970	0,2	3,2	$7,1 \cdot 10^{-3}$
Кокс	500	720	0,2	4,8	$20 \cdot 10^{-3}$

На рисунках 1–3 приведены результаты расчетов нагрева образца торфа микроволновым излучением (циклический режим). Расчеты проводились для случая, когда режим организован следующим образом: источник излучения включается, если температура торфа в центре образца меньше T_{\min} , и выключается, если температура превышает T_{\max} . Варьируемые параметры: T_{\min} , T_{\max} ; относительное содержание кокса β ; ширина воздушного зазора между частицами кокса и торфом δ .

Анализ результатов численного моделирования показывает возможность быстрого разогрева смеси торфа и нефтяного кокса при содержании кокса в смеси более 40 % до температуры 250...270 °С, в течение менее 10 мин и возможность длительной обработки в этом диапазоне температур в условиях циклического нагрева. Экспериментальная проверка, проведенная с образцом, параметры которого соответствовали расчётной схеме, подтвердила возможность быстрого микроволнового разогрева и устойчивой тепловой обработки – торрефикации торфа в смеси с нефтяным коксом (рисунок 4).

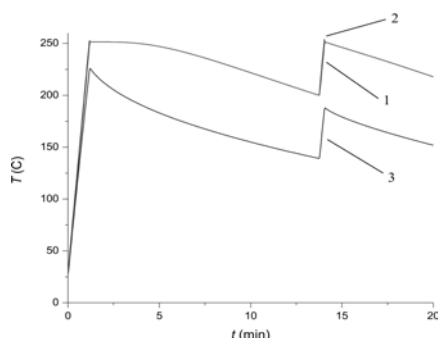


Рисунок 1 – Зависимость от времени температуры торфа (линия 1) и кокса (линия 2) в центре образца при $\beta = 40\%$, $\delta = 0,04$ мм, $T_{\min} = 200^\circ\text{C}$, $T_{\max} = 250^\circ\text{C}$ (линия 3 – температура торфа на поверхности)

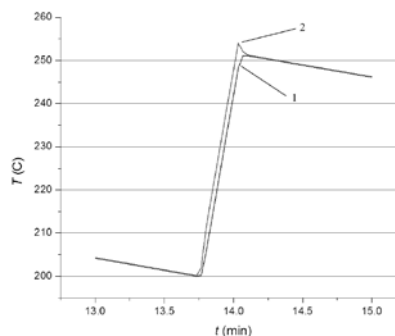


Рисунок 2 – Фрагмент рисунка 1 в увеличенном масштабе

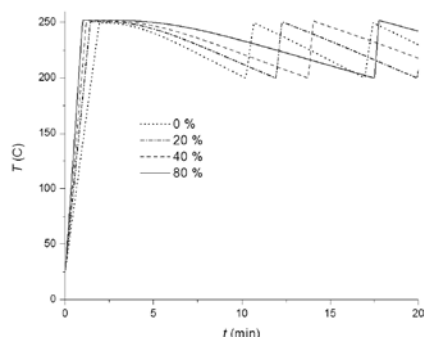


Рисунок 3 – Зависимость от времени температуры торфа в центре образца при $\delta = 0,04$ мм, $T_{\min} = 200^\circ\text{C}$, $T_{\max} = 250^\circ\text{C}$ при различном содержании кокса β

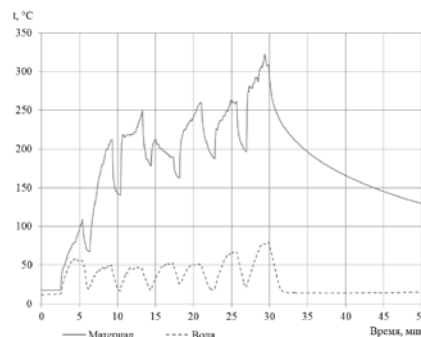


Рисунок 4 – Зависимость температур материала в центре образца и балластной воды от времени при термической обработке смеси торфа и нефтяного кокса в условиях микроволнового воздействия: Массовое соотношение: 70 % – торф, 30 % – нефтяной кокс; мощность включения магнетрона – 700 Вт; расход балластной проточной воды – 0,12 л/мин

Библиографический список

1. Ellison C., McKeon M. S. Boldor Biochar mixture at microwave frequencies // Energies. 2017. 10.p. 502.
2. Гревцев Н.А. и др. Энерготехнологические способы управления показателями торфяных композиционных материалов. Екатеринбург, 2012. 112 с.
3. Баскаков А.П. Изучение теплообмена между частицами мелкозернистого теплоносителя в засыпке // Тепло- и массоперенос. Общие вопросы теплообмена. Минск, 1963. Т.3
4. Директор Л. Б., Зайченко В. М. Сравнение эффективности реакторов низкотемпературного пиролиза биомассы // Теплоэнергетика. 2020. Т. 67, № 5. С. 60.
5. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М. : Энергоатомиздат, 1984. 152с.
6. Агроскин А. А., Глейбман В. Б. Теплофизика твердого топлива. М. : Недра, 1980. 256 с.
7. Бензарь В. К. Техника СВЧ-влажнометрии. Минск : Высшая школа, 1974. 349 с.

УДК 66.011

Анастасия Валериевна Фролкова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и технология основного органического синтеза», frolkova_nastya@mail.ru
Иван Сергеевич Гаганов, аспирант кафедры «Химия и технология основного органического синтеза», ivan.gaganov@yandex.ru
Алла Константиновна Фролкова, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Химия и технология основного органического синтеза», frolkova@gmail.com
МИРЭА – Российского технологического университета
(Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Россия, г. Москва

Совершенствование технологии разделения смеси метанол – вода – метилметакрилат

Аннотация. Предложена технология разделения смеси метанол – вода – метилметакрилат, основанная на использовании процесса автоэкстрактивной ректификации с водой. В присутствии воды повышается летучесть метилметакрилата по отношению к метанолу. Схема разделения содержит три ректификационные колонны и сепаратор жидкость-жидкость. В вычислительном эксперименте определены параметры работы аппаратов и энергозатраты схемы.

Ключевые слова: азеотроп, автоэкстрактивная ректификация, схема разделения, расслаивание, энергозатраты.

Anastasia V. Frolkova, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Technology of Basic Organic Synthesis, frolkova_nastya@mail.ru
Ivan S. Gaganov, Postgraduate Student of the Department of Chemistry and Technology of Basic Organic Synthesis, ivan.gaganov@yandex.ru
Alla K. Frolkova, doctor Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemistry and Technology of Basic Organic Synthesis, frolkova@gmail.com
MIREA – Russian Technological University (Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Russia, Moscow

Improvement of the technology of methanol – water – methyl methacrylate mixture separation

Abstract. The technology of methanol – water – methyl methacrylate mixture separation based on the use of the process of auto-extractive distillation with water is proposed. The volatility of methyl methacrylate in relation to methanol increases in the presence of water. The separation flowsheet contains three distillation columns and a liquid-liquid separator. The apparatus operation parameters and the flowsheet energy consumption are determined in a computational experiment.

Keywords: azeotrope, auto-extractive distillation, separation flowsheet, splitting, energy consumption.

Метилметакрилат (ММА) является полупродуктом в синтезе полимерных материалов. Около 80 % ММА производят из циангидрида ацетона. Недостаткам данной технологии относят необходимость утилизации отходов биосульфата. Перспективным методом получения ММА является процесс этерификации метакриловой кислоты метанолом [2, с.7703] (экологически чистый способ получения продукта). Одним из актуальных вопросов остается выделение ММА из реакционной смеси, содержащей также метанол (М) и воду (В). В литературе описано несколько вариантов разделения смеси, основанных на сочетании различных

процессов: ректификация и расслаивание, ректификация и экстракция [4, с.2;5,с.4596]. Данные схемы, как правило, ориентированы на получение ММА чистотой не менее 99,9 % мол., воды – 99,5 % мол. Метанол выделяется в составе близком к азеотропному М-ММА (концентрация ММА составляет 93 % мол.).

Целью настоящего исследования является разработка альтернативной технологии разделения смеси, направленной на выделение всех компонентов в чистом виде и повышение выхода ММА. В качестве метода исследования выбрано математическое моделирование в программе AspenPlus V.10.0. Расчет равновесий жидкость-пар, жидкость-жидкость-пар, жидкость-жидкость проводится с использованием модели локальных составов NRTL, параметры бинарного взаимодействия которой доступны в базе данных программного комплекса. Заявленные ошибки описания фазового равновесия не превышают 3...4 %. В таблице 1 приведено сравнение экспериментальных и расчетных составов и температур кипения азеотропов.

Таблица 1 – Сравнение экспериментальных [3, с.616; 6, с.355] и расчетных значений составов и температур кипения азеотропов при давлении 101,3 кПа

Экспериментальные данные		Расчетные данные		Относительные ошибки	
X_M^{Az} , мол. доли	T^{Az} , °C	X_M^{Az} , мол. доли	T^{Az} , °C	ΔX_1^{Az} , %	ΔT^{Az} , %
азеотроп метанол – метилметакрилат					
0,9591	64,34	0,9454	64,41	1,43	0,11
азеотроп вода – метилметакрилат					
0,5250	83,25	0,5062	82,06	3,58	1,42

Компоненты вода и ММА характеризуются ограниченной взаимной растворимостью, концентрация воды в водном слое составляет 0,9976 мол. долей, ММА в органическом 0,9478 мол. долей (при 20 °C и 101,3 кПа). Приведенные расчетные показатели отличаются от экспериментальных [1, с.191] не более чем на 1,5 %. Диаграмма фазового равновесия приведена на рисунке 1. Она содержит две области дистилляции и область двухфазного расслаивания закрытого типа.

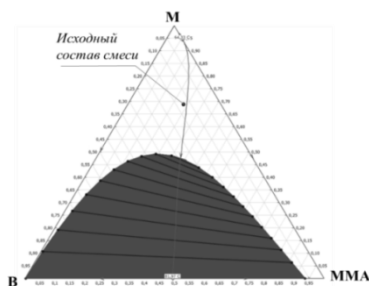


Рисунок 1 – Диаграмма фазового равновесия системы метанол (М) – вода (В) – метилметакрилат (ММА)

Для разделения тройной смеси (исходный состав в мол. долях: метанола 0,6979, воды 0,125, ММА 0,1771) предлагается использование на первом этапе процесса автоэкстрактивной ректификации с водой. Для оценки ее селективности проведен расчет фазового равновесия и определены значения относительной летучести пары ММА-М (таблица 2).

Таблица 2 – Зависимость относительной летучести пары ММА-М от количества экстрактивного агента

Количество воды, кмоль/ч	0	100	200	300
Относительная летучесть	0,79	2,26	2,98	3,67

Предварительные расчеты процесса автоэкстрактивной ректификации показали, что выделение в дистилляте чистого ММА невозможно, в потоке присутствует также вода. Таким образом, на первом этапе разделения возможно фракционирование тройной смеси на ММА-В (в дистилляте) и М-В (в кубе). Смесь ММА-В направляется в сепаратор жидкость-жидкость, органический слой которого поступает во вторую колонну для выделения целевого продукта. Дистиллят потока азеотропного состава ММА+В рециклом возвращается в сепаратор. Водный слой сепаратора, содержащий воду с концентрацией 99,75 % мол., представляет собой продуктовый поток. Разделение бинарной зетропной смеси М+В предполагается в обычной ректификационной колонне. Итоговая схема разделения приведена на рисунке 2.

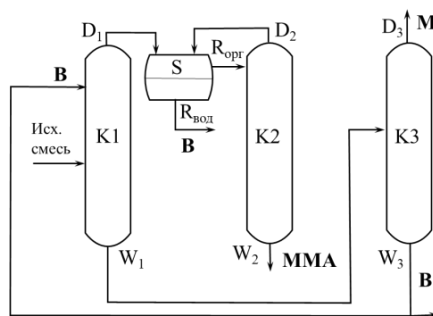


Рисунок 2 – Схема разделения смеси метанол (М) – вода (В) – метилметакрилат (ММА)

Работоспособность схемы подтверждена в вычислительном эксперименте. При подборе параметров работы колонн варьировались число теоретических тарелок (ЧТТ), тарелка питания (ТП) смеси (разделяющего агента), флегмовое число (R), расход агента. Для повышения выхода ММА (в кубе колонны K2) исследована зависимость содержания данного компонента в дистилляте колонны K1 при увеличении D1 (рисунок 3). Согласно полученным данным минимальное количество данного потока составляет 21,0 кмоль/ч.

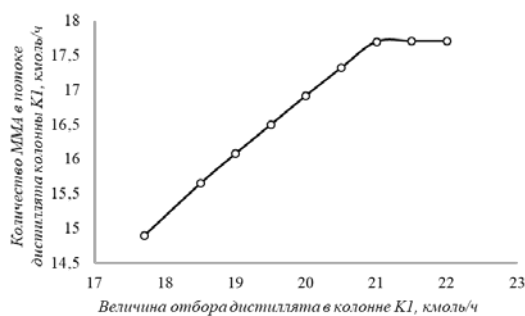
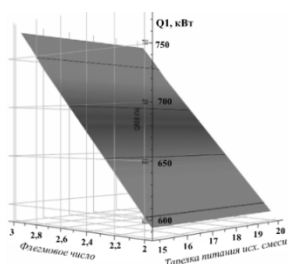
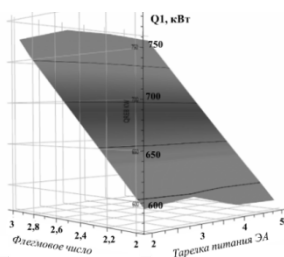


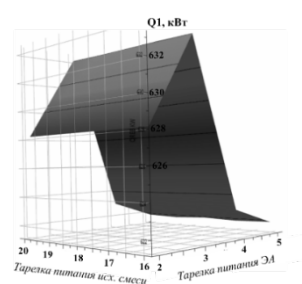
Рисунок 3 – Зависимость количества ММА в потоке D1 от величины отбора D1



a



б



в

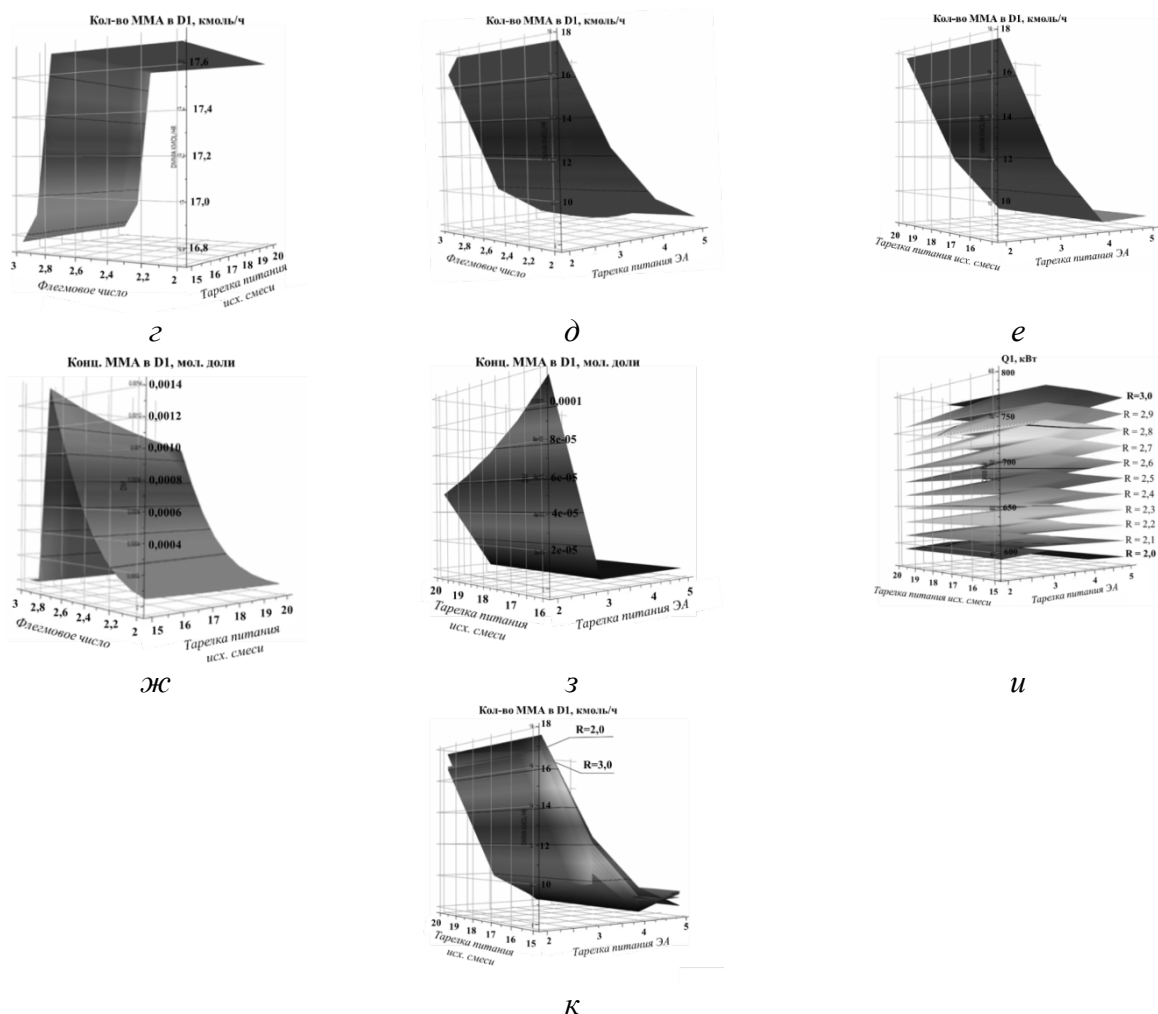


Рисунок 4 – Зависимость энергозатрат (содержания MMA в потоке D1 / концентрации метанола в D1) колонны K1 от параметров ее работы (тарелки питания исходной смеси (РА), флегмового числа)

Для определения параметров работы колонн, при которых возможно получение всех компонентов заданного качества (ММА – 99,9 % мол., М – 99,9 % мол., В – 99,7 % мол.) исследовано влияние параметров функционирования колонн (числа теоретических тарелок (ЧТТ), тарелки питания (ТП) исходной смеси (разделяющего агента), флегмового числа (R)) на энергозатраты колонн, выход MMA как целевого продукта. ЧТТ определяли по методу Джиллиленда (зависимость энергозатрат колонны от ЧТТ, ЧТТ = 29 т.т.). Наиболее интересна обсуждаемая зависимость для колонны автоэкстрактивной ректификации (как наиболее энергозатратной). На рисунке 4 а-в, г-е приведены фрагменты поверхностей, описывающих зависимость энергозатрат колонны K1 (Q1) (количества MMA в потоке D1) от R и ТП_{исх} (при ТП_{ЭА} = 2), R и ТП_{ЭА} (при ТП_{исх} = 18), ТП_{исх} и ТП_{ЭА} (при R = 2,2), а также зависимость величины примесей метанола в потоке D1 от R и ТП_{исх}, ТП_{исх} и ТП_{ЭА} (рисунок 4ж-з). Энергозатраты первой колонны в значительной степени зависят от R (практически линейная зависимость), в меньшей степени от ТП_{ЭА} (присутствует экстремум, отвечающий значению ТП_{ЭА} = 3), и практически не зависят от ТП_{исх}, при этом возможность достижения требуемого количества MMA в потоке D1 возможна при R < 2,8 (рисунок 4г).

С другой стороны, при R, превышающем 2,2, возрастает количество примесей спирта в потоке D1 (рисунок 4ж), что объясняется вымыванием воды в куб колонны. Расположение тарелки питания исходной смеси (величина экстрактивной части колонны) также влияет на концентрацию метанола в дистилляте колонны (чем больше экстрактивная часть, тем ниже примесь метанола) (рисунок 4з). Таким образом, РА должен подаваться на 2 теоретическую

тарелку, исходная смесь – на 18–20, диапазон изменения флегмового числа 2,0–2,2. Увеличение флегмового числа (рисунок 4и-к) сказывается негативно не только на энергозатратах, но и на выходе ММА. Выбранные параметры работы колонн (таблица 3) являются технологически приемлемыми. Все колонны работают при давлении 101,3 кПа. Суммарные энергозатраты (ΣQ) составили 2806,0 кВт (на 100 кмоль/ч исходной смеси).

Преимуществом предлагаемого способа разделения по сравнению со схемами, приведенными в литературе [5, с.4597–4600], является возможность выделения всех компонентов в чистом виде и повышение выхода целевого продукта. Энергозатраты схемы на 27 % ниже по сравнению с трехколонной схемой разделения и выше на 10 % – со схемой «колонна + сепаратор». Если поток, содержащий смесь М-ММА азеотропного состава схемы из [5, с.4600], подвергать дальнейшему разделению с целью повышения чистоты спирта и снижению потерь ММА, полные энергозатраты возрастут и станут сопоставимы или будут превышать затраты предложенного в настоящем исследовании варианта разделения.

Таблица 3 – Количество и составы материальных потоков, параметры работы колонн и суммарная нагрузка на кипятильники колонн схемы разделения

Аппарат	ЧТТ	ТП _{исх.} (ТП _{ЭД})	R	D (R _{орг}), кмоль/ч	Состав D (R _{орг}), мол. доли	W (R _{вод}), кмоль/ч	Состав W (R _{вод}), мол. доли	Q, кВт
K1	29	18 (2)	2,2	21,0	следы 0,1566 0,8434	459,0	0,1520 0,8480 0,0000	628,2
S	–	–	–	19,73	следы 0,0521 0,9479	3,29	0,0001 0,9974 0,0025	–
K2	11	4	1,2	2,019	0,0008 0,5038 0,4954	17,71	0,0000 0,0005 0,9995	51,9
K3	25	18	1,9	69,79	0,9990 0,0010 0,0000	389,21	0,0003 0,9997 0,0000	2125,9

Примечание: компоненты указаны в следующей последовательности: метанол, вода, метилметакрилат; расход разделяющего агента 380 кмоль/ч

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00620П).

Библиографический список

1. **Chen J.-T., Lin Y.-M.** Liquid liquid equilibria of water + 1-butanol + methyl methacrylate or butyl methacrylate or isobutyl methacrylate at 288.15K and 318.15K // Fluid Phase Equilib. 2007. V. 259. 189–194.
2. **Darabi Mahboub M.J., Dubois J.-L., Cavani F., Rostamizadeh M., Patience G.S.** Catalysis for the synthesis of methacrylic acid and methyl methacrylate // Chem. Soc. Rev. 2018. V. 47. № 20. 7703.
3. **Pavlov S. Yu., Kirnos A. B., Pavlova S. P., Lazaryants V. E.** Liquid-vapor equilibrium in the system methanol – methyl methacrylate // Zh. Prikl. Khim. (Leningrad). 1972. V. 45. 614–617.
4. **Witczak T., Grzesik M., Skrzypek J., Witczak M.** Liquid-phase esterification of methacrylic acid with methanol catalyzed by heteropolyacid // Int. J. Chem. React. Eng. 2010. V. 8. pp. 1–15.
5. **Wu Y.C., Hsu C.S., Huang H.-P., Chien I.-L.** Design and Control of a Methyl Methacrylate Separation Process with a Middle Decanter // Eng. Chem. Res. 2011. V. 50. pp. 4595–4607.
6. **Zheng S., Xia M., Ying X., Hu Y.** Studies on the vapor-liquid equilibrium of the ternary water-methyl methacrylate-methacrylic acid system // Huadong Huagong Xueyuan Xuebao. 1987. V. 13. pp. 353–359.

УДК 536.2.08

Андрей Дмитриевич Ивлиев, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Физико-математические дисциплины», *ad_i48@mail.ru*
Российский государственный профессионально-педагогический университет,
Россия, г. Екатеринбург

Применение метода температурных волн для исследования теплофизических свойств шпонов

***Аннотация.** Метод температурных волн может быть применен для измерения теплофизических характеристик тонких пластинчатых материалов при температурах выше 320 К. Благодаря использованию новых приборов и устройств, возбуждение температурных волн и оценка колебаний температуры производятся бесконтактными способами. Эти обстоятельства обеспечивают высокую точность измерения температуропроводности и относительной теплоемкости шпонов и других пластинчатых материалов.*

***Ключевые слова:** температурные волны, температуропроводность, бесконтактные измерения, радиационный нагрев.*

Application of the temperature wave method to study the thermophysical properties of veneers

Andrei D. Ivliev, Advanced Doctor in Physico-mathematical Sciences,
Professor of the Department of Physical and Mathematical Disciplines, *ad_i48@mail.ru*
Russian State Vocational Pedagogical University, Russia, Yekaterinburg

***Abstract.** The method of temperature waves can be used to measure the thermophysical characteristics of thin plate materials at temperatures above 320 K. Thanks to the use of new devices, the excitation of temperature waves and the assessment of temperature fluctuations are made by non-contact methods. These circumstances ensure high accuracy in measuring the thermal diffusivity and relative heat capacity of veneers and other plate materials.*

***Keywords:** temperature waves, thermal diffusivity, non-contact measurements, radiation heating.*

Введение

Теплофизические свойства шпонов и других тонких листовых диэлектрических материалов представляют практический интерес, поскольку данные материалы широко используются в технике. Обычно, тепловые свойства исследуются стационарными методами, на основании закона Фурье [1, 2]. Стационарные методы требуют применения достаточно больших по размеру образцов, из-за чего практически не применимы для исследования свойств шпонов. Для исследования свойств тонких материалов (пластин) были разработаны нестационарные методы. Из них в настоящее время используются два: чисто нестационарный импульсный метод (метод Паркера) [3] и квазистационарный метод температурных волн. Последний чаще всего используется в варианте плоских температурных волн (метод Ангстрема) [4].

Метод Паркера основан на измерении параметров импульсного теплового сигнала, прошедшего через исследуемый образец. Как правило, для повышения точности измерения

используются тепловые импульсы большой энергии, из-за чего передняя поверхность образца-пластины перегревается на десятки кельвинов.

Метод Ангстрема связан с передачей через пластину периодического теплового сигнала в квазистационарном режиме, когда средние температуры исследуемого материала достигают установившихся значений. В квазистационарном режиме возможно обеспечить накопление энергии при обработке полезного сигнала, благодаря этому исследуемый образец подвергается меньшим тепловым нагрузкам, а амплитуда колебаний температуры передней стенки образца имеет значение в несколько кельвинов. Данное обстоятельство делает метод температурных волн перспективным для исследования тепловых свойств тонких древесных материалов (шпонов), а также и прочих листовых материалов. В настоящей статье рассматриваются вопросы применения метода Ангстрема для исследования тепловых свойств пластин при температурах выше 320 К.

Метод измерения

Современная теория метода плоских температурных волн базируется на работах Краева и Стельмах [5] и Филиппова [6, 7], обобщенных в обзоре [7]. Идея метода достаточно проста. На первую (переднюю) поверхность пластины (образца) толщины l воздействует тепловой поток, модулированный по амплитуде с частотой ω ($\omega = 2\pi\nu$, ν – частота, измеряемая в Гц). Данный поток возбуждает в образце температурную волну, которая распространяется ко второй граничной поверхности, вызывая колебания ее температуры.

Колебания температуры второй поверхности образца сдвинуты по фазе по отношению к колебаниям воздействующего теплового потока на угол φ , что обусловлено конечной величиной скорости распространения волны. По измеренному значению этого угла при известных l и ω можно рассчитать теплопроводность a пластины. Кроме того, по амплитуде колебаний температуры второй поверхности образца Θ_0 при известной амплитуде теплового потока, поглощенного образцом, и по величинам φ и ω можно рассчитать теплоемкость образца. Как правило, оценка абсолютной величины мощности теплового потока, поглощенного образцом, производится с большой погрешностью. Однако можно принять меры к ее стабилизации, что позволит рассчитать относительную теплоемкость исследуемого образца $C_{\text{отн}}$. Как правило, именно так и организуется эксперимент. Таким образом, для расчета значений теплофизических характеристик методом температурных волн, необходимо измерить толщину образца l и обеспечить оценку следующих параметров температурной волны: ω , φ и Θ_0 .

Конструкция экспериментальной установки

Применение контактных методов создания теплового потока и измерения температуры в случае тонких листовых материалов нецелесообразно, поскольку это приведет к значительному снижению точности измерения из-за потерь на контактных тепловых сопротивлениях. Поэтому необходимо использовать при создании установки только бесконтактные методы.

Из всех известных путей обеспечения бесконтактного нагрева наиболее удобными являются радиационные методы. При этом необходимо учитывать, что соответствующая тепловая задача [5–8] решена для случая, когда падающий тепловой поток целиком поглощается в поверхностном слое образца, и дальнейшая передача теплоты производится за счет кондуктивного механизма. Древесные материалы, в частности шпоны, обладают способностью пропускать электромагнитные волны в некоторых диапазонах частот. Опыт показывает, что коэффициент поглощения древесины возрастает по мере увеличения длины волны света. В частности, при длинах волн больших, чем 4,0 мкм происходит практически полное поглощение излучения [9]. Данное обстоятельство указывает на то, что источником радиационного нагрева следует выбрать либо инфракрасные оптические квантовые генераторы (лазеры), работающие в непрерывном режиме, либо мощные инфракрасные светодиоды.

Важным обстоятельством, влияющим на выбор источника излучения, является возможность осуществления амплитудной модуляции. Электронный механизм модуляции, в принципе, может быть использован в лазерах и светодиодах. Однако в лазерах он не позволяет осуществить 100-процентную модуляцию, из-за чего часть теплового потока будет создавать бесполезный нагрев образца. Поэтому, применение лазеров сопряжено с необходимостью создания механических модуляторов излучения. Лазеры с длиной волны излучения, равной 10,6 мкм и мощностью излучения в десятки ватт уже несколько десятилетий выпускаются во многих странах мира (рабочее вещество – CO_2). Разработаны и амплитудные модуляторы излучения.

Мощные светодиоды (инфракрасные прожекторы) требуемого диапазона длин волн в продаже еще отсутствуют, однако можно ожидать, что они появятся в ближайшем будущем. Амплитудная модуляция излучения обеспечивается в них электронным способом, что существенно упрощает конструкцию установки. Светодиоды и лазеры создают узкие потоки излучения, благодаря чему это излучение можно легко подвести к необходимой части исследуемого образца. Необходимо иметь в виду, что диаметр теплового потока, воздействующего на образец, должен в 6 или более раз превышать толщину образца-пластины (шпона) [8].

Следует отметить, что существуют тепловые источники инфракрасного излучения. Их недостатком является то, что тепловые потоки, создаваемые ими, распределены в широкой пространственной области, из-за чего осложняется процесс механической модуляции. Электронная модуляция в этих системах не может быть применена из-за инерционности источников. Поэтому в установках для измерения тепловых характеристик методом температурных волн они не применяются.

Частота температурной волны ν , при которой измерения теплофизических характеристик шпонов [10] могут быть проведены с высокой точностью, составляет десятки доли герца [5–8]. Данный диапазон частот модуляции (частот температурных волн) может быть обеспечен как электронным, так и механическим способом.

Таким образом, можно отметить, что в настоящее время существуют источники радиационного теплового нагрева и модуляторы, которые могут быть использованы в установках, основанных на методе температурных волн и предназначенных для исследования свойств шпонов.

Вторая важная проблема – бесконтактное измерение температуры второй поверхности образца. Диапазон температур образца в рассматриваемом случае составляет 320...360 К. К настоящему времени имеются различные типы преобразователей, которые могут быть использованы в составе установки. В частности, это фоторезисторы (например, ФР1-З 100 К и др.) и фотодиоды (например, ФД-9Э111А и др.). При необходимости могут быть использованы охлаждаемые гелием фотоэлектрические преобразователи, работающие при длинах волн 3...5 мкм и имеющие низкий уровень собственных шумов, а также тепловизоры. Основные требования к фотодатчику – достаточно высокая чувствительность в диапазоне длин волн в несколько микрон и достаточная безынерционность, чтобы запаздывание сигнала в датчике было существенно меньше, чем время распространения температурной волны в образце. Последнее условие означает, что собственная постоянная времени этих фотоэлектрических приборов не должна превышать 1 мс.

Еще одно требование к фотодатчику – спектральный диапазон принимаемых сигналов. Необходимо, чтобы фотодатчик не был чувствителен к излучению источника, создающего температурную волну (например, лазера). Необходимость этого обусловлена тем, что помеховый сигнал, возникающий, например, за счет переотражений излучения мощного лазера, может попасть в «поле зрения» измерителя температуры (фотодатчика). Данная помеха может быть более значительной по амплитуде, чем полезный сигнал. Отфильтровать помеху нельзя, потому что ее частота в точности совпадает с частотой полезного сигнала. В этих

условиях провести оценку параметров полезного сигнала, созданного излучением второй поверхности пластины, будет невозможно.

Третий элемент установки – измеритель параметров сигнала фотодатчика (это, обычно, компьютер), обеспечивающий последующий расчет теплофизических характеристик исследуемого образца. Процесс измерения параметров полезного сигнала целесообразно организовать по схеме квазиоптимальной фильтрации [8], в основе которой используется преобразование Фурье [11, 12]. Накопление сигнала в квазиоптимальном фильтре позволяет повысить чувствительность измерительной системы, благодаря чему уменьшается мощность источника температурной волны (например, лазера). Последнее обеспечивает меньший средний нагрев исследуемого образца (шпона).

Необходимость в осуществлении фильтрации связана еще и с тем, что сигнал, создаваемый фотопреобразователем, может содержать несколько гармоник основной частоты. Это обусловлено тем, что модуляция излучения лазера часто осуществляется механическим прерывателем, который создает импульсную модуляцию теплового потока. Кроме того, тепловой сигнал, проходя через образец, может обогатить свой спектр за счет нелинейных свойств среды. Модель, используемая для расчета теплофизических свойств, основана на линейном приближении [4–8]. Квазиоптимальный фильтр является узкополосным устройством, благодаря чему обеспечивается оценка параметров (фазы и амплитуды) только основной гармоники.

На основании результатов измерения параметров сигнала производится расчет теплофизических характеристик образца в соответствии с разработанной методикой [8].

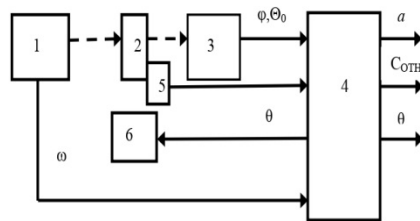


Рисунок 1 – Блок-схема установки для измерения свойств пластинчатых материалов:

- 1 – источник модулированного теплового потока; 2 – исследуемый образец;
3 – датчик, преобразующий тепловой сигнал в электрический; 4 – измерительное и вычислительное устройство; 5 – датчик средней температуры образца;
6 – нагреватель, изменяющий среднюю температуру образца

Средняя температура образца θ задается постоянной составляющей теплового потока, создающего температурную волну. Оценки показывают, что начальная температура образца при этом будет близка к 320 К. Имеется возможность повысить эту температуру и изучить теплофизические свойства исследуемого образца в диапазоне температур. Амплитуда колебаний температуры образца в квазистационарном режиме составляет единицы кельвинов. Поэтому изучение теплофизических характеристик образца можно производить с шагом 5 К. Для изменения средней температуры можно использовать дополнительный внешний нагреватель (обычно, печь сопротивления), либо регулировать мощность источника температурной волны (лазера). В последнем случае потеряется возможность изучения температурного хода относительной теплоемкости.

Измерение средней температуры образца можно производить различными путями, используя как традиционные термодары и термопреобразователи сопротивления [13], так и твердотельные полупроводниковые датчики [14].

Блок-схема установки для измерения свойств пластинчатых материалов методом температурных волн приобретает следующий вид (смотри рисунок. 1).

Погрешности измерения теплофизических характеристик методом температурных волн имеют несколько составляющих. В первую очередь, это методические ошибки, которые можно оценить в 1 % [8], а также аппаратные и шумовые погрешности (последние обусловлены действием помеховых сигналов). Величины аппаратных и шумовых погрешностей зависят от того, какие конкретные технические решения приняты при создании установки. Тем не менее, обычно эти ошибки не очень велики, вследствие чего общая погрешность измерения теплопроводности составляет 2 %, а относительной теплоемкости 4...5 % [8]. На основании полученных результатов при известной плотности может быть рассчитана теплопроводность исследуемого образца.

Выводы

В настоящее время имеется техническая возможность для создания экспериментальной установки для исследования теплофизических свойств шпонов и других листовых материалов в диапазоне температур 320...360 К методом температурных волн. Измерения методом температурных волн производятся со сравнительно высокой точностью, что делает применение данного метода перспективным.

Библиографический список

1. Теплофизические измерения / Е. С. Платунов, И. В. Баранов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин: учеб. пособие для вузов // Под общ. ред. Е. С. Платунова. СПб. : СПбГУНиПТ, 2010. 738 с.
2. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / Под ред. С. В. Пономарева. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. 408 с.
3. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal diffusivity / W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler, G. L. Abbott // Journal of Applied Physics, 1961. V. 32. № 9. pp. 1679–1684.
4. **Angström A. J. Ann. d. Phys.** 114, 513 (1861).
5. **Краев О. А., Стельмах А. А.** Теплопроводность и теплопроводность металлов при высоких температурах / В кн. : Исследования при высоких температурах. Новосибирск : Наука, 1966. С. 55–74.
6. **Филиппов Л. П.** Измерение тепловых свойств твердых и жидких металлов при высоких температурах. М. : Изд-во МГУ, 1967. 325 с.
7. **Филиппов Л. П.** Измерения теплофизических свойств веществ методом периодического нагрева. М. : Энергоатомиздат, 1984. 104 с.
8. **Ивлиев А. Д.** Метод температурных волн в теплофизических исследованиях // Теплофизика высоких температур, 2009. Т. 47. № 5. С. 771–792.
9. [Электронный ресурс]. URL: http://www.promwood.com/derevoobrabotka/sushenye/sushylnye_kamery/2188/page-2.html (дата обращения 24 марта 2023 г.).
10. **Чудновский А. Ф.** Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М. : Гос. изд-во физико-математической литературы, 1962. 456 с.
11. **Ван Трис Г.** Теория обнаружения, оценок и модуляции. М. : Советское радио, Т. 1, 1972. 744 с., Т. 2. 1975. 344 с.
12. **Сосулин Ю. Г.** Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. М. : Советское радио, 1978. 320 с.
13. Температурные измерения: Справочник / О. А. Геращенко, А. Н. Гордов, А. К. Еремина [и др.]; Отв. ред. Геращенко О. А.; Киев : Наук. думка, 1989. 704 с.
14. [Электронный ресурс]. URL: <https://mcucpu.ru/index.php/pdevices/datchiki/108poluprovodnikovye> (дата обращения 24 марта 2023 г.).

УДК 639.3.043, 631.363.5

Александр Николаевич Остриков, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств», ostrikov27@yandex.ru

Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия, г. Воронеж

Константин Владимирович А., инженер, mishinev.k@yandex.ru

Научно-производственный центр «ВНИИ комбикормовой промышленности», Россия, г. Воронеж

Технология вакуумного напыления экструдированных гранул белково-витамино-липидным комплексом

Аннотация. Цель – разработка кормовых добавок нового поколения с вакуумным напылением белково-витамино-липидного комплекса для производства высокоусвояемых комбикормов с заданными свойствами, обеспечивающие повышение усвояемости, поедаемости и их доброкачественности для сельскохозяйственных животных и птицы. Разработка технологии вакуумного напыления на экструдированные гранулы белково-витамино-липидного комплекса, позволит значительно повысить производство продукции животноводства, птицеводства и рыбоводства. Установлено значительное влияние температуры гранул и величины разряжения в вакуумном напылителе на коэффициент утечки масла из экструдированных гранул. Обоснован выбор рациональной величины разряжения в вакуумном напылителе для достижения эффективной и интенсивной диффузии жидких компонентов. Выявлено, что при величинах разряжения менее 0,035 МПа жидкие компоненты глубоко проникали внутрь пор экструдированных гранул.

Ключевые слова: технология, вакуум, напыление, экструдированные гранулы, белково-витамино-липидный комплекс.

Alexander N. Ostrikov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Technology of Fats, Processes and Devices of Chemical and Food Production
Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh

Konstantin V. Mishinev, Engineer

Research and Production Center Research Institute of Feed Industry, Voronezh, Russia

Technology of vacuum coating of extruded granules with protein-vitamin-lipid complex

Abstract. The goal is to develop a new generation of feed additives with vacuum spraying of a protein–vitamin–lipid complex for the production of highly digestible compound feeds with specified properties that increase digestibility, digestibility and their goodness for farm animals and poultry. The development of vacuum spraying technology on extruded granules of protein-vitamin-lipid complex will significantly increase the production of livestock, poultry and fish farming products. A significant influence of the temperature of the granules and the amount of vacuum discharge in the vacuum sprayer on the oil leakage coefficient from the extruded granules has been established. The choice of a rational amount of vacuum discharge in a vacuum filler to achieve effective and intensive diffusion of liquid components is justified. It was revealed that at discharge values of less than 0,035 MPa, the liquid components penetrated deeply into the pores of the extruded granules.

Keywords: technology, vacuum, spraying, extruded granules, protein-vitamin-lipid complex.

Разработка комплексной технологии кормовых добавок нового поколения с вакуумным напылением белково-витамино-липидного комплекса (БВЛК) для производства высокопитательных, легкоусвояемых комбикормов с заданными свойствами обеспечит эффективное вскармливание сельскохозяйственных животных, птицы и аквакультуры [1]. По данным Росстата общий объем производства комбикормов за последнее десятилетие ежегодно увеличивается на 7...11 %. Если в 2022 году в России было произведено свыше 32 млн. т комбикормов, то к 2025 году планируется довести производство комбикормов до 42 млн т. Обеспеченность высококачественными комбикормами во многом определяет уровень развития и экономику животноводства, так как в структуре себестоимости животноводческой продукции стоимость кормов достигает 65...70 %.

Целью является разработка технологии вакуумного напыления на экструдированные гранулы белково-витамино-липидного комплекса (БВЛК), в которой были реализованы:

- технология микродозирования рассыпных компонентов (БАД), БМВД и др.) для производства высокопитательных, легкоусвояемых комбикормов с использованием электронных весовых дозаторов, которые обеспечивает высокую точность дозирования ингредиентов, таких как витамины, аминокислоты, ферменты, добавки и микроэлементы в сухом и жидком виде в точном соответствии с рецептурой кормов;
- перспективная технология смешивания компонентов в квазиневесомом режиме, который способствует равномерному распределению исходных компонентов в смеси и препятствует образованию комков. Она позволит повысить однородность получаемой смеси, сократить энергозатраты вследствие снижения времени смешивания до 180...210 °С;
- технология вакуумного напыления белково-витамино-липидного комплекса, которая позволяет получить кормовые добавки нового поколения.

В ходе исследований на поверхность экструдированных гранул наносился белково-витамино-липидный комплекс, в состав которого входили растворы аминокислот (лизин сульфат, треонина, метионина, триптофана), растворы витаминов В2, Д3, Е, а в качестве жировых компонентов – нерафинированное подсолнечное масло (ГОСТ 1129-2013) и животный жир (ГОСТ 1304-76).

Технологические параметры изменялись в следующих диапазонах: частота вращения мешалок – 40...45 об/мин; величина вакуума в рабочей камере напылителя – 0,020...0,8 МПа; продолжительность различных этапов технологического процесса колебалась в пределах от 30 с до 140 с [2].

Важным параметром, характеризующим удержание жидких компонентов в порах гранул, является коэффициент утечки масла из гранул

$$\nu = (m_{\text{в.м}}/m_{\text{гр}}) \cdot 100\% \quad (1)$$

где $m_{\text{в.м}}$ – масса вытекшего масла, г; $m_{\text{гр}}$ – начальная масса гранул до вытекания масла, г

Установлено существенное влияние температуры продукта и величины разряжения в рабочей камере напылителя на величину коэффициента утечки масла ν (рисунок 1).

Выявлен интенсивный характер проникновения белково-витамино-липидного комплекса внутрь пор гранул при величинах разряжения менее 0,035 МПа. При этом коэффициент утечки масла в комбикормах снижался до 1,3 % при давлении 0,030 МПа и температуре 22 °С (рисунок 2).

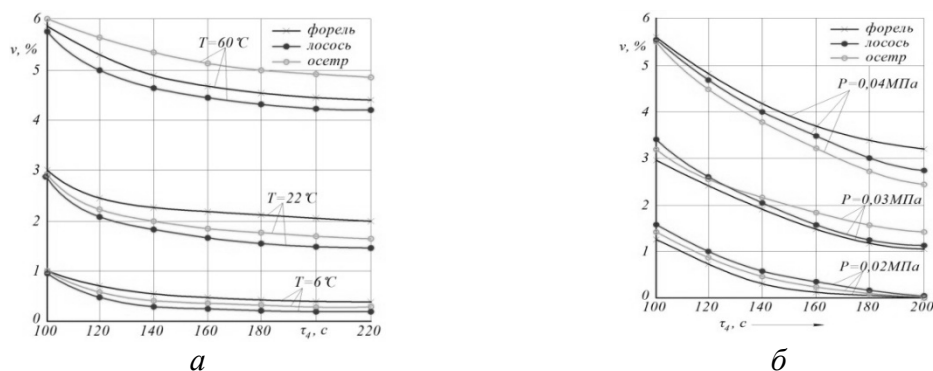


Рисунок 1 – Изменение коэффициента утечки масла из рыбных комбикормов от продолжительности вакуумной компенсации при различных температурах:

а) 1 – 60 °C; 2 – 22 °C; 3 – 6 °C при $P = 0,030$ МПа; и давлениях; б) 1 – 0,04 МПа; 2 – 0,03 МПа; 3 – 0,02 МПа, $T = 22$ °C

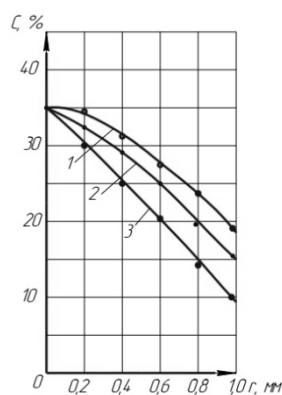


Рисунок 2 – Зависимость изменения содержания от глубины проникновения внутрь гранул при различных P , МПа:

1 – 0,02; 2 – 0,03; 3 – 0,04

Установленные кинетические закономерности легли в основу разработанной технологии вакуумного напыления на поверхность гранул белково-витамино-липидного комплекса.

Таким образом, применение вакуумного напыления белково-витамино-липидного комплекса и его последующее проникновение внутрь гранул повышает содержание БВЛК на 30...35 % и способствует равномерному его распределению внутри гранул.

Библиографический список

1. Технология и оборудование для производства комбикормов для ценных пород рыб / В. Афанасьев, И. Богомолов, А. Остриков, С. Старцева // Комбикорма. 2021. № 1. С. 24–28.
2. Остриков А. Н., Богомолов И. С. Филиппов П. В. Математическое моделирование процесса диффузии жидких добавок внутрь экструдированных гранул комбикорма для рыб ценных пород // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. № 82 (3). С. 19–23.

УДК 66.061.16

Альбина Валерьевна Сафина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделия из древесины», alb_saf@mail.ru

Ленар Юнусович Исмаилов, аспирант кафедры «Архитектура и дизайн изделия из древесины», lenar-2015@mail.ru

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, г. Казань

Предварительное замораживание неплодовых частей облепихи с целью интенсификации массообменных процессов при экстракции

Аннотация. Выбор оптимального способа экстракции обусловлен поиском методов, которые способны ускорить тепломассообменные процессы и увеличить скорость диффузионного извлечения целевых компонентов из растительных материалов. В работе отражены результаты экспериментальных исследований традиционной водной экстракции неплодовых частей облепихи, а именно листьев, коры, побегов и древесины, и результаты интенсификации экстракции с помощью предварительного замораживания исходного сырья. Проанализировано влияние скорости замораживания сырья на размер образующихся кристаллов льда. Установлено, что предварительное медленное замораживание сырья повышает выход водорастворимых веществ, за счет разрыва клеточной структуры образовавшимися кристаллами льда.

Ключевые слова: экстракция, облепиха, листья, кора, побеги, древесина, интенсификация, предварительное замораживание.

Albina V. Safina, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, alb_saf@mail.ru

Lenar Yu. Ismagilov, Postgraduate Student of the Department of Architecture and Design of Wood Products, lenar-2015@mail.ru

Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan

Preliminary freezing of non-fruit parts of sea-buckthorn to intensify mass transfer processes during extraction

Abstract. The choice of the optimal extraction method is due to the search for methods that can accelerate heat and mass transfer processes and increase the rate of diffusion extraction of target components from plant materials. The paper reflects the results of experimental studies of traditional aqueous extraction of non-fruit parts of sea buckthorn, namely leaves, bark, shoots and wood, and the results of intensification of extraction by preliminary freezing of the feedstock. The influence of the raw material freezing rate on the size of the formed ice crystals is analyzed. It has been established that the preliminary slow freezing of raw materials increases the yield of water-soluble substances, due to the rupture of the cellular structure by the formed ice crystals.

Keywords: extraction, sea buckthorn, leaves, bark, shoots, wood, intensification, pre-freeze.

Технологии обработки сырья растительного происхождения в широком интервале отрицательных температур широко известны и применяются в сельском хозяйстве. Одним из таких современных направлений является криоконсервация семян в жидком азоте с целью формирования криобанков, которые могут значительно облегчить работу селекционе-

ров, предоставив им возможность широко использовать пул генов сортов, в том числе старой селекции и диких видов, а также исчезающих видов растений [2, с.3].

Другим направлением является предварительное промораживание семенного материала или его хранение при минусовых температурах. В процессе промораживания происходит растрескивание оболочки семян, благодаря этому влаге и воздуху намного легче проникнуть к зародышу и сокращаются сроки стратификации [1, с.2]. Семенной материал, прошедший подобную подготовку, отличается высокой схожестью и ранним цветением.

В условиях холодного климата технологии замораживания используются для закаливания растений и повышения их морозоустойчивости. В основе способности растений сохранять воду в клетках в жидком состоянии при очень низких отрицательных температурах лежит механизм переохлаждения. Он чрезвычайно важен в обеспечении резистентности растений к замораживанию.

Облепиха является уникальным растением с богатыми химическим потенциалом и полезными для здоровья свойствами. Именно поэтому она представляет большой интерес для научных исследований и способствует созданию широкого спектра продуктов функционального назначения [5, с.748]. Однако переработке подвергаются только плоды и листья облепихи. При этом остается большое количество отходов в виде неплодовой части – ветки, кора, молодые побеги, которые являются потенциальным сырьем для получения экстрактов. [3, с.79]. Извлечение экстрактивных веществ из древесной части облепихи затруднительно по сравнению с ягодной частью в силу природного строения древесины. Ценные компоненты содержатся во внутренних полостях паренхимных клеток, в стенках волокон, на мембранах пор, что усложняет процесс их извлечения.

Проведенные на кафедре архитектуры и дизайна изделий из древесины ФГБОУ ВО «КНИТУ» исследования показали, что предварительное замораживание растительного сырья позволяет интенсифицировать массообменные процессы и увеличить выход биологически активных веществ в экстракционных технологиях.

Основным процессом, который имеет место при замораживании растительного сырья, является кристаллизация влаги в клетках и межклеточных пространствах. Скорость кристаллизации напрямую определяет изменения в структуре растительных клеток [6, с.775]. Как известно, чем медленнее происходит замораживание, тем больше повреждается клеточная структура. Анализ литературных источников показал, что для интенсификации процесса экстракции с помощью предварительного замораживания растительного сырья скорость замораживания должна составлять 0,1...1 см/ч [7, с.3]. В таком случае в растительном сырье будут образовываться крупные кристаллы льда в межклеточном пространстве, что вызовет серьезные механические повреждения оболочек и мембран клеток. Такое разрушение растительных клеток будет способствовать лучшему вымыванию биологически активных веществ из исследуемого сырья.

Были проведены исследования по влиянию предварительного замораживания неплодовых частей облепихи (коры, древесины, листьев и побегов) на максимальный выход водорастворимых веществ в процессе классической экстракции настаиванием при следующих параметрах: масса навески неплодовой части облепихи 5 ± 1 г; размер измельчения до 3,0 мм; экстрагент – дистиллированная вода; гидромодуль 1:10; температура экстрагента 60 °С; начальная температура сырья 23 °С; конечная температура замораживания –18 °С; время замораживания – 30 мин; время экстракции – 40 мин.

После проведения экстракции, полученные смеси последовательно фильтровали через марлевый фильтр и фильтр «белая лента». Получение порошкообразного водорастворимого экстракта происходило в сушильной камере. Для обеспечения надежности результатов исследований по определению концентрации водорастворимых веществ в материале эксперименты повторялись трижды.

Согласно полученным результатам предварительное замораживание неплодовых частей облепихи улучшает показатели по выходу экстрактивных веществ вне зависимости от продолжительности экстракции. Установлено, что выход водорастворимых веществ значительно увеличивается как в листьях облепихи (на 38,66 %), так и в коре облепихи (на 51,12 %), и в побегах (на 14,21 %) и в древесной части облепихи (на 69,29 %). Медленная скорость замораживания сырья (0,1...1 см/ч) способствует образованию крупных кристаллов льда, которые в свою очередь повреждают клеточные стенки материала. Такая предварительная подготовка растительного сырья благотворно влияет на процесс экстракции даже при традиционных методах экстрагирования.

Результаты исследований могут быть использованы в технологиях сборки урожая облепихи, где для облегчения процесса применяют предварительное замораживание плодовых веток [4, с.55]. Замороженные ягоды направляются для хранения или использования в технологических процессах пищевой промышленности. А неплодовая часть может быть направлена для экстрагирования из них ценных компонентов. Реализация данного способа повысит ресурсосберегающий потенциал предприятий по переработке плодов облепихи с получением дополнительных продуктов функционального назначения из неплодовых частей.

Библиографический список

1. **Воронкова Н. М., Холина А. Б.** Хранение семян: популяционная изменчивость ответной реакции семян на глубокое замораживание // Вестник КрасГАУ. 2008. № 3.
2. **Данилова Е. С., Письмерова А. И., Перова Д. И.** Криоконсервация растительных клеток // Сборник материалов XII всероссийской научной конференции студентов и аспирантов с международным участием. СПб. , 2022.
3. **Сафина А. В., Исмаилов Л. Ю.** Исследование эффективного коэффициента диффузии водорастворимых веществ из неплодовой части облепихи // Деревообрабатывающая промышленность. 2023. № 1. С. 78–86.
4. **Сафина А. В., Исмаилов Л. Ю.** Технология переработки плодоносящих веток облепихи с использованием теплового насоса // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 2. С. 54–60.
5. **Kukin T. P., Shcherbakov D. N., Gensh K. V., Tulysheva E. A., Salnikova O. I., Grazhdannikov A. E., Kolosova E. A.** (2017) Bioactive Components of Sea Buckthorn *Hippophae rhamnoides* L. Foliage. Russ. J. Bioorgan. Chem.; 43:747–751. doi: 10.1134/S1068162017070093.
6. **Lina Cheng, Da-Wen Sun, Zhiwei Zhu & Zi Zhang** (2017) Emerging techniques for assisting and accelerating food freezing processes: A review of recent research progresses, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 57:4, 769-781, DOI: 10.1080/10408398.2015.1004569.
7. **Safin R. R., Safina A. V., Ismailov L. Yu.** (2023) Intensification of water extraction of non-fruit parts of sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides*) // E3S Web Conf. Volume 371.

УДК 66.061

Альбина Валерьевна Сафина, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Архитектура и дизайн изделия из древесины», alb_saf@mail.ru

Валерий Владимирович Губернаторов, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Архитектура и дизайн изделия из древесины», valera_gub@mail.ru

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, г. Казань

Экономическая эффективность водно-вакуумного способа экстрагирования березового гриба чага

Аннотация. В работе представлены результаты оценки экономической эффективности способа водно-вакуумной экстракции березового гриба чага. Сравнительный анализ основывался на сопоставлении удельных энергетических затрат для получения одного килограмма сухого экстракта предлагаемым способом относительно классического водного настаивания. Исследования показали, что получение экстрактов водно-вакуумным способом позволяет снизить удельные энергетические затраты практически в 5 раз при увеличении выхода целевых компонентов. Полученные результаты могут быть использованы для повышения экономической эффективности фармпредприятий.

Ключевые слова: экономическая эффективность, ремацерация, водно-вакуумная экстракция, березовый гриб чага, энергозатраты.

Albina V. Safina, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor
of the Department of Architecture and Design of Wood Products, alb_saf@mail.ru

Valery V. Gubernatorov, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor
of the Department of Architecture and Design of Wood Products, valera_gub@mail.ru

Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan

Economic efficiency of the water-vacuum method of extraction of birch fungus chaga

Abstract. The paper presents the results of evaluating the economic efficiency of the method of water-vacuum extraction of birch fungus chaga. The comparative analysis was based on a comparison of the specific energy costs for obtaining one kilogram of dry extract by the proposed method relative to the classical water infusion. Studies have shown that the extraction of extracts by the water-vacuum method allows to reduce the specific energy costs by almost 5 times with an increase in the yield of the target components. The results obtained can be used to improve the economic efficiency of pharmaceutical enterprises.

Keywords: economic efficiency, remaceration, water-vacuum extraction, birch mushroom chaga, energy consumption.

Березовый гриб чага является источником полезных органических кислот, пищевых волокон, а также смол, минералов и витаминов. Востребованность экстрактов чаги определило разработку и применение различных методов извлечения биологически активных веществ из березового гриба [2, с.47–60].

В работе [5, с.835–842] предложен водно-вакуумный способ экстракции березового гриба чага, предполагающий внедрение в классическую схему настаивания чаги разреженной среды, как на стадии подготовки сырья, так и при проведении самого процесса экстрагирования. При извлечении целевых компонентов предполагается чередование стадий ваку-

умирования и создания атмосферного давления с целью интенсификации тепломассообмена. При таком способе экстрагирования повышается степень разрыхления материала, происходит лучшее проникновение экстрагента во внутреннюю структуру сырья и увеличивается выход экстрагируемых веществ [4, с.553-560].

Для оценки целесообразности предлагаемых решений был проведен сравнительный анализ энергетической эффективности процессов классической ремацерации и водно-вакуумного способа экстрагирования чаги, выражаемой в сопоставлении удельных энергетических затрат на получение единицы массы сухого экстракта [3, с.35-40].

Энергетические затраты процесса классической водной экстракции чаги определялись стоимостными показателями затрат тепла на нагревание смеси и поддержание заданной температуры процесса. Энергетические затраты на осуществление водно-вакуумной экстракции включали помимо стоимости тепловой энергии, стоимость электроэнергии на вакуумирование системы.

Величина затрат на тепло для проведения процессов экстракции рассчитывалась на основе количества затрачиваемого тепла с учетом потерь в окружающую среду и стоимости тепловой энергии.

$$Z_{\text{тепл}} = Q_{\text{тепл}} \cdot k_{\text{п}} \cdot S_{\text{тепл}} \quad (1)$$

где $Q_{\text{тепл}}^{\text{кл}}$ – количество затрачиваемой тепловой энергии, Гкал; $k_{\text{п}}$ – коэффициент потерь тепла (3...5 %); $S_{\text{тепл}}$ – стоимость 1 Гкал тепловой энергии в действующих ценах, руб.

Количество затрачиваемого тепла на проведение каждого процесса экстракции определялось согласно основному уравнению теплопередачи с учетом длительности процесса извлечения.

Затраты тепловой энергии на проведения исследуемых процессов экстракции классическим способом составили 613,50 руб., водно-вакуумным – 187,41 руб.

Продолжительность работы вакуумного насоса складывается из времени предварительной дегазации сырьевой чаги в течение 5 мин, осуществляемой однократно и времени работы насоса на «стадии вакуумирования» в течение 5 циклов по 10 мин. Таким образом, при мощности вакуумного насоса 5 кВт, стоимость затраченной электроэнергии на вакуумирование системы составило 60,38 руб.

Общая сумма энергетических затрат на проведение водно-вакуумной экстракции, составила 247,79 руб.

Масса получаемого экстракта при соответствующем выходе экстрактивных веществ для каждого из способов экстракции составила, соответственно, 0,539 кг при классическом способе и 1,13 кг при водно-вакуумном.

Удельные энергетические затраты на получение 1 кг условного экстракта:

$$Z_{\text{уд}}^{\text{кл}} = \frac{Z_{\text{тепл}}^{\text{кл}}}{m_{\text{БАВ}}^{\text{кл}}} = \frac{613,5}{0,539} = 1138,22 \text{ руб./кг} \quad (1)$$

$$Z_{\text{уд}}^{\text{в-в}} = \frac{Z_{\text{тепл}}^{\text{в-в}}}{m_{\text{БАВ}}^{\text{в-в}}} = \frac{247,79}{1,13} = 219,28 \text{ руб./кг} \quad (2)$$

Результаты проведенных расчетов занесены в таблицу 1.

Проведенные исследования показали, что при водно-вакуумном способе экстракции березового гриба чага удельные энергетические затраты на получение 1 кг экстракта снижаются практически в 5 раз. Полученные результаты свидетельствуют об экономической эффективности предлагаемого способа [1, с.123-129] и о целесообразности его внедрения на предприятиях, специализирующихся на производстве экстрактов из растительного сырья и функциональных продуктов для здоровья и красоты.

**Таблица 1 – Сравнительные технико-экономические показатели
исследуемых способов**

Показатели	Классическая ремацерация	Водно-вакуумная экстракция
Продолжительность процесса, с	36 000	11 880
Температура процесса, °С	70	60
Выход экстрактивных веществ, %	13,8	29
Количество затрачиваемого тепла, гкал	0,347	0,106
Стоимость тепловой энергии на проведение процесса, руб.	613,50	187,41
Стоимость электроэнергии на вакуумирование системы, руб.	-	60,38
Общая сумма затрат на проведение процесса экстракции, руб.	613,50	247,79
Удельные энергетические затраты на получение 1 кг экстракта, руб.	1138,22	219,28

Библиографический список

1. Орлова Е. А. Управление эффективностью предприятия // Проблемы теории и практики управления. 2016. № 1. С. 123–129
2. Сафина А. В., Губернаторов В. В., Хасаншин Р. Р. Обзор мирового опыта в области оптимизации процессов извлечения целевых компонентов из сырья растительного происхождения. Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 4. С. 47–60.
3. Повышение энергоэффективности процесса экстракции. Известия высших учебных заведений / А. В. Сафина, Н. Ф. Тимербаев, Г. Р. Арсланова, Д. Ф. Зиятдинова // Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 5-6. С. 35–40.
4. Расчет кинетики процессов экстрагирования из твердых материалов с различной структурой / Ю. А. Тепляков, С. П. Рудобашта, В. М. Нечаев, А. М. Климов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2009. Т. 15. № 3. С. 553–560.
5. Razumov E. Y., Safin R. R., Sysoeva M. A., Khabibrakhmanova V. R., Gubernatorov V. V. Intensification of water extraction process of chaga by means of recurrent pressure reduction of the media. В сб. : 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings. 2018. С. 835–842.

УДК 664.8.039.51

Алексей Алексеевич Завалий, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Общетехнические дисциплины», zavalym@mail.ru
Людмила Анатольевна Лаго, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Общетехнические дисциплины», luda_lago@mail.ru
Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского,
Институт «Агротехнологическая академия», Республика Крым, г. Симферополь

Исследование проницаемости высоковлажного сельскохозяйственного сырья для инфракрасного излучения динамическим методом

***Аннотация.** Определены значения проницаемости сельскохозяйственного сырья для интегрального потока инфракрасного излучения разработанным нами динамическим методом, основанным на использовании малоинерционного термоэлектрического измерительного преобразователя температуры. Выполнено сравнение полученных экспериментальных данных с данными других авторов. Установлено, что данные коррелируют между собой, а величины разброса данных позволяют принять решение о целесообразности применять динамический метод как недорогостоящий нетрудоёмкий и быстрый метод для определения проницаемости сырья для интегрального потока инфракрасного излучения.*

***Ключевые слова:** проницаемость, сельскохозяйственное сырьё, инфракрасное излучение.*

Alexey A. Zavaliiy, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor,
Head of the Department of General Technical Disciplines, zavalym@mail.ru
Ludmila A. Lago, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor
of the Department of General Technical Disciplines, zavalym@mail.ru
V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Institute Agrotechnological Academy,
Republic of Crimea, Simferopol

Research of the permeability of high-moisture agricultural raw materials for infrared radiation by the dynamic method

***Abstract.** The values of the permeability of agricultural raw materials for the integral flux of infrared radiation were determined by the dynamic method developed by us, based on the use of a fast-response thermoelectric temperature measuring transducer. The obtained experimental data are compared with the data of other authors. It has been established that the data correlate with each other, and the values of the data scatter make it possible to decide on the advisability of using the dynamic method as an inexpensive, not labor-intensive and fast method for determining the permeability of raw materials for the integral flux of infrared radiation.*

***Keywords:** permeability, agricultural raw materials, infrared radiation.*

Сведения о проницаемости высоковлажного сельскохозяйственного сырья для интегрального потока теплового излучения позволяют уточнить представления о процессах тепло- и массообмена в ходе инфракрасной сушки и организовать эффективный процесс импульсного подвода к сырью потока теплового излучения, обеспечивающий интенсификацию влагоудаления за счет создания в слое сырья отрицательного градиента температуры, соот-

ветственно, условий для роста термодиффузионного потока влаги из срединных слоев сырья к его поверхности.

Исследованию проницаемости сельскохозяйственного сырья посвящены работы И. А. Рогова, С. Г. Ильясова, В. В. Красникова и др. [1–9]. В таблице 1 приведены данные о проницаемости некоторых сельскохозяйственных продуктов, найденные нами в публикациях отечественных авторов.

Таблица 1 – Проницаемость сырья по данным различных авторов

Сырье	Толщина слоя, мм	$\lambda_{\text{тех, мм}}$	T, пропускательная способность тела, %	Автор
Картофель	6	1,0	1	Лебедев П. Д. [7]
Картофель	1,2	1,0	60,9	Ильясов С. Г. [9]
	1,8		48,4	
	3,05		33,5	
	5		19,8	
	10		6,2	
	20,6		0,5	
Картофель	0,1	1,04	25,8	Рогов И. А., Жуков Н. Н., Скрябин В. П. [9]
	0,5		22,4	
	1,0		17,6	
	2,1		10,8	
	4,0		7,3	
Морковь	1,5	0,88	1	Лыков А. В. [7]
Морковь	5	1,0...2,8	60	Алтухов И. В. [1], Худогов И. А. [8]
	10		43	
	15		32	
	20		23	
	25		17	
	30		14	
Морковь	1	1,0	58	Селюков С. Г. [9]
	3		37	
	10		5	
Морковь	0,1	1,04	44,3	Рогов И. А., Жуков Н. Н., Скрябин В. П. [9]
	0,5		32,3	
	1,0		21,3	
	2,1		10,4	
	4,0		3,0	
Свекла	5	1,0...2,8	61	Алтухов И. В. [1]
	10		39	
	15		28	
Свекла	1,7	1,0	32	Ильясов С. Г. [5]
	3,0		24	
Яблоко	1	0,6...1,3	58	Ильясов С. Г. [3]
	10		14,8	
Яблоко	0,5	1,0	75	Селюков Н. Г. [9]
	1		68	
	3		33	
	10		4	
Яблоко	0,1	1...2	50	Мелех Е. И. [7]
	0,2		43	
	0,3		27	
	0,5		8	
Томатная паста	0,5	1,075	55,8	Сегал Е. Р. [6]
	1		44,2	
	2		26,4	
Молоко (жир. 3,2 %)	1	1	54	Мелех Е. И. [7]
	5		12	
	10		6	

Нами для исследования проницаемости слоя высоковлажного сельскохозяйственного сырья разработан динамический метод, основанный на наблюдении за изменением реакции малоинерционного термоэлектрического измерительного преобразователя температуры, расположенного за слоем высоковлажного сельскохозяйственного сырья, на которое воздействует инфракрасное излучение [2].

В таблице 2 приведены экспериментальные данные о проницаемости высоковлажного сельскохозяйственного сырья, полученные динамическим методом. Каждый эксперимент проводили в 10-ти повторностях.

Таблица 2 – Данные о проницаемости сырья динамическим методом

Сырье	Толщина слоя, мм	$\lambda_{\text{тах}}$, мкм	T , пропускательная способность тела, %
Картофель	1	0,9...1,1	76,3
	3		46,1
	5		29,7
Морковь	1	0,9...1,1	50,0
	2		27,8
	5		11,6
Свекла	2	0,9...1,1	54,9
	3		38,1
	4		24,1
Томатная паста	0,8	0,9...1,1	70,9
	1,7		49,9
	2,5		37,9
	3,5		28,6
	4,5		23,0
	5,1		20,8
Молоко	1	0,9...1,1	80,4
	5		28,1

Для аппроксимации изменения проницаемости инфракрасного излучения по толщине слоя сырья использована зависимость вида:

$$I_{\text{п}} = I_0 \cdot e^{-k \cdot x} + B, \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность падающего теплового потока излучения; x – толщина образца, мм.; k – коэффициент ослабления лучистого теплового потока; B – коэффициент, величина горизонтальной асимптоты зависимости (1).

На рисунке 1 приведены экспериментальные данные проницаемости томатной пасты и аппроксимация зависимости пропускания инфракрасного излучения вида (1).

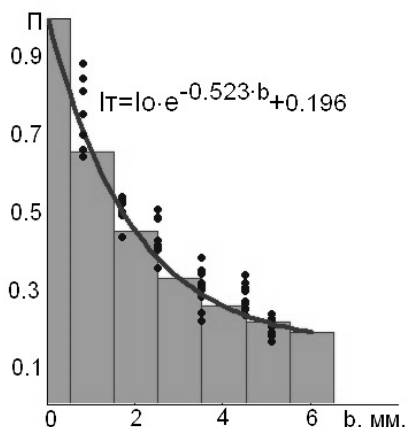


Рисунок 1 – Аппроксимация зависимости пропускания инфракрасного излучения для слоя томатной пасты

На рисунке 2 приведены полученные нами аппроксимирующие зависимости для данных, приведенных в таблице 2 и их сравнение с данными, приведенными в таблице 1.

В таблице 3 представлены значения разброса полученных нами данных и представленных на рисунке 2 данных других авторов.

Таблица 3 – Значения разброса данных о проницаемости сырья для инфракрасного излучения

Сырье	Толщина слоя, мм	Разброс с данными [5–7, 9], %	Среднее значение разброса, %
Картофель	1...5	5,2...29,7	17,5
Морковь	1...5	3,6...11,6	7,6
Свекла	2...4	1,8...24,1	13,0
Томатная паста	0,8...5,1	4,3...20,8	12,6
Молоко	1...5	3,9...28,1	16

Как следует из рисунка 2 и таблицы 3, данные о проницаемости пищевых продуктов, полученные динамическим методом коррелируют с данными других авторов, а средние значения величин разброса составляют от 7,6 до 17,5 %. Это позволяет сделать вывод о достоверности данных, полученных динамическим методом, и корректности его использования для определения проницаемости высоковолажного сельскохозяйственного сырья. Преимуществами динамического метода с использованием малоинерционного термоэлектрического преобразователя температуры являются простота его реализации, низкая стоимость оборудования, быстрота выполнения эксперимента.

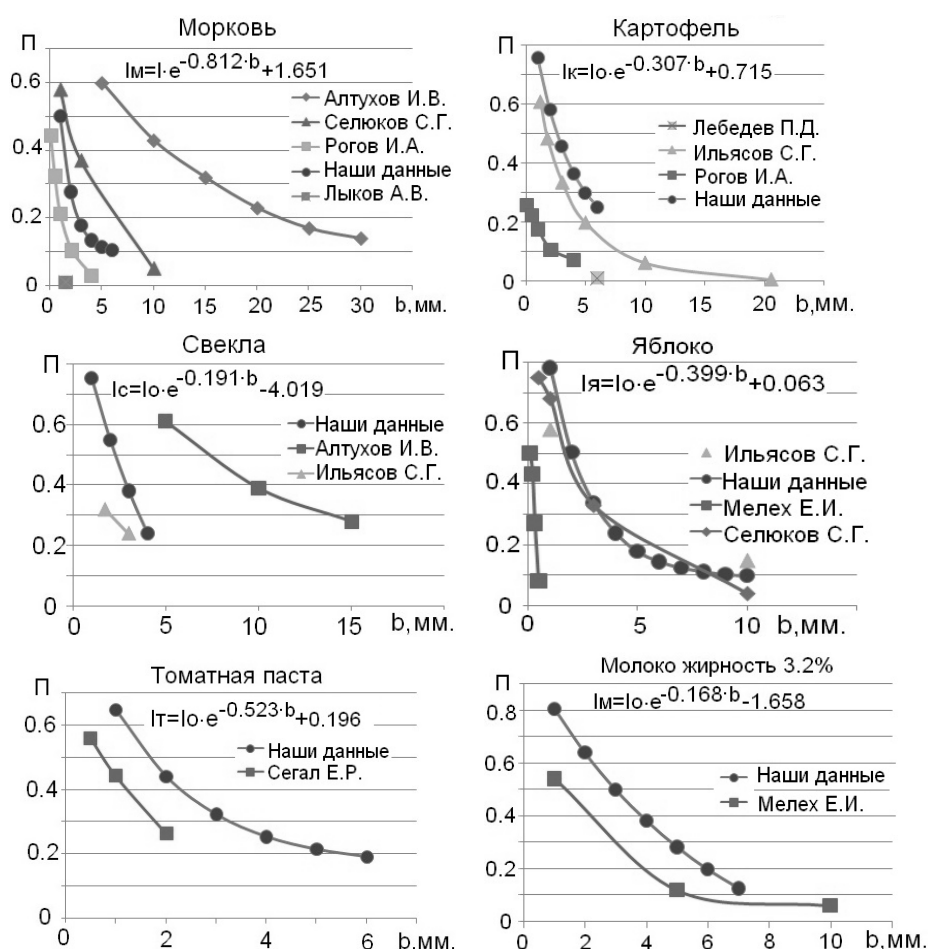


Рисунок 2 – Аппроксимация зависимости пропускания инфракрасного излучения:
 P – проницаемость, b – толщина слоя, мм

Библиографический список

1. **Алтухов И. В.** Энергосберегающая технология импульсной инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеклубнеплодов : дис. ... доктора технических наук : 05.20.02 / Алтухов Игорь Вячеславович. Иркутск , 2015. 313 с.
2. **Завалий А. А., Лаго Л. А.** Динамический метод определения проницаемости слоя высоковлажного сельскохозяйственного сырья для инфракрасного излучения // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 2. С. 69–73.
3. **Избасаров Д. С.** Научно-практические основы процессов производства пищевых порошков из растительного сырья : автореф. дис. ... доктора технических наук : 05.18.12 / Избасаров Дуйсебай Сайлаубаевич. М. , 1994. 63 с.
4. **Ильясов С. Г., Красников В. В.** Методы определения оптических и терморadiационных характеристик пищевых продуктов. М. : Пищевая промышленность, 1972. 176 с.
5. **Ильясов С. Г., Красников В. В.** Физические основы инфракрасного облучения пищевых продуктов. М. : Пищевая промышленность, 1978. 360 с.
6. **Лыков А. В.** Тепло- и массообмен в процессах сушки. М. : Госэнергоиздат, 1956. 464 с
7. **Рогов И. А., Жуков Н. Н.** Применение инфракрасного излучения в отраслях пищевой промышленности (обзор) // М. : ЦНИИТЭИлегпищемат, 1971. 79 с.
8. **Худоногов И. А., Очиров В. Д.** Сравнительные исследования спектральных терморadiационных характеристик корнеплодов моркови с использованием аналогового и цифрового приборов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2010. № 11(73). С. 74–78.
9. Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов / И. А. Рогов, В. Я Адаменко, С. В. Некрутман и др.; под. ред. И. А. Рогова. М. : Легкая и пищевая промышленность, 1981. 288 с.

УДК 66.047.7

Мария Константиновна Кошелева, кандидат технических наук, профессор кафедры «Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность», oxtpaxt@yandex.ru

Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, г. Москва

Ольга Роальдовна Дорняк, доктор технических наук, зав. кафедрой «Сопротивление материалов и теоретическая механика», ordornyak@mail.ru
Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова, Россия, г. Воронеж

Максим Владимирович Исаев, студент, isaev9mv@gmail.com

Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина

Павел Павлович Тertiшников, студент, tertishnikov.pp@bti.secna.ru

Алтайский государственный технический университет имени И. И. Ползунова (Бийского технологического института (филиал), Россия, г. Бийск

Конвективная сушка плоских волокнистых материалов, интенсифицированная ультразвуковым полем

***Аннотация.** Приводятся экспериментальные кинетические кривые непрерывной сушки типовой плотной шерстяной ткани при различных температурных режимах и интенсификации процесса ультразвуковым воздействием. Показано, что эффективным для исследованного объекта сушки является совместное ультразвуковое и тепловое воздействие. Полученные данные по кинетике сушки аппроксимированы формулами, выражающими зависимость влагосодержания материала от температуры и наличия ультразвуковой интенсификации. Полученные результаты можно использовать для анализа и расчёта кинетики интенсифицированной непрерывной конвективной сушки различных плотных шерстяных тканей.*

***Ключевые слова:** непрерывная конвективная сушка, ультразвуковая интенсификация, шерстяная ткань, аппроксимация кривых кинетики сушки.*

Maria K. Kosheleva, Ph. D. of Engineering Sciences, Professor of the Department of Energy-Resource-Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, oxtpaxt@yandex.ru
Kosygin Russian State University (Technologies. Design. Art), Russia, Moscow

Olga P. Dornyak, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Head of the Department, ordornyak@mail.ru

Voronezh State Forestry Engineering University named after G. F. Morozov, Russia, Voronezh

Maxim V. Isaev, Student, isaev9mv@gmail.com

Kosygin Russian State University (Technologies. Design. Art), Russia, Moscow

Pavel P. Tertyshnikov, Student, tertishnikov.pp@bti.secna.ru

Biysk Institute of Technology (branch), Russia, Biysk

Convective drying of flat fibrous materials intensified by an ultrasonic field

***Abstract.** Experimental kinetic curves of continuous drying of a typical dense woolen fabric under various temperature conditions and intensification of the process by ultrasonic action are given. It is shown that the combined ultrasonic and thermal effects are effective for the studied drying object. The obtained data on the kinetics of drying are approximated by formulas expressing the dependence of the moisture content of the material on temperature*

and the presence of ultrasonic intensification. The results obtained can be used to analyze and calculate the kinetics of intensified continuous convective drying of various dense woolen fabrics.

Keywords: *continuous convective drying, ultrasonic intensification, woolen fabric, approximation of drying kinetics curves.*

Целью работы является исследование кинетики непрерывного процесса конвективной сушки шерстяной ткани с высокой плотностью, интенсифицированного ультразвуковым воздействием (УЗ), и аппроксимация полученных кинетических кривых. Повышение эффективности энергоресурсоемкого процесса сушки, в том числе в химической технологии отделки текстильных материалов является актуальной [1, 2].

Объектом сушки является шерстяная ткань с поверхностной плотностью более 700 г/м², которая в промышленных условиях высушивается в непрерывных конвективных сушилках.

Экспериментальные исследования кинетики сушки плотной проводились в ООО «Центр ультразвуковых технологий» на базе Бийского технологического института (филиал) ФГБОУ ВО Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова на специально созданной там экспериментальной установке [3].

Анализ экспериментальных кривых кинетики сушки плотной шерстяной ткани при различных видах энергетического воздействия показал, что наиболее эффективным для данной ткани является единовременное ультразвуковое и тепловое воздействие. Установлено так же, что действие УЗ на кинетику процесса тем больше, чем ниже температура сушильного агента.

Использование на промышленных сушилках непрерывного действия ультразвуковой интенсификации позволит снизить температуру процесса сушки со 110...145 °С до 80 °С, сократить продолжительность процесса, что приведёт к снижению энергетических затрат.

В результате аппроксимации экспериментальных данных по кинетике сушки плотной шерстяной ткани получено уравнение:

$$U = U_0 \cdot e^{-b\tau} \quad (1)$$

где U_0 – начальное влагосодержание ткани, $U_0 = 0,76$ кг/кг; τ – время в минутах; b – коэффициент, характеризующий скорость процесса сушки:

$$b = p_0 + p_1 Y + p_2 \cdot t_c \quad (2)$$

Значение b зависит от температуры сушильного агента и наличия ультразвукового воздействия. При наличии УЗ $Y = 1$, при отсутствии УЗ $Y = 0$; T_c – температура сушильного агента в исследованном диапазоне. Значения коэффициентов: $p_0 = -0,01164$; $p_1 = -0,01298$; $p_2 = -0,0001675$.

На рисунке 1 представлены рассчитанные с использованием уравнения (1) кривые кинетики сушки при разных температурах и при наличии или отсутствии УЗ воздействия. Здесь же показаны опытные значения.

Приведенные на рисунке 1 результаты иллюстрируют достаточно хорошее качество аппроксимации кинетических кривых, полученных в данном исследовании. Полученные результаты дополняют данные других исследований, связанные с изучением, обобщением и расчётом кинетики сушки, в том числе конвективной сушки полотенных материалов [4–8].

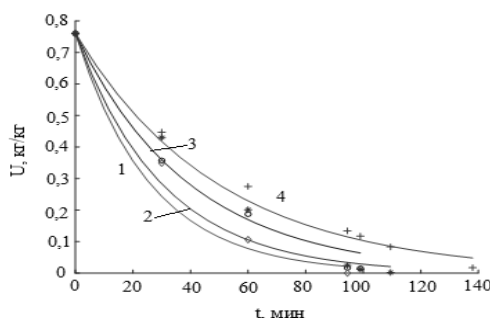


Рисунок 1 – Рассчитанные с использованием уравнения (1) кривые кинетики сушки при разных температурах и при наличии или отсутствии УЗ воздействия и опытные значения:
 1 – УЗ, $T = 80^\circ\text{C}$; 2 – $T = 80^\circ\text{C}$; 3 – УЗ, $T = 50^\circ\text{C}$; 4 – $T = 50^\circ\text{C}$

Выводы по работе

Установлено, что наиболее эффективным при сушке для исследованной плотной шерстяной ткани является комбинированное воздействие. Ультразвуковая интенсификация процесса сушки эффективнее при более низких температурах сушильного агента.

Получены результаты, которые можно использовать для анализа и расчета кинетики непрерывной конвективной сушки плотных шерстяных тканей, с учетом экспериментально обоснованной зависимости влагосодержания материала от температуры сушильного агента и наличия интенсифицирующего ультразвукового воздействия.

Библиографический список

1. Гуляев Ю. В., Белгородский В. С., Кошелева М. К. Обзор материалов симпозиума «Вторые международные Косыгинские чтения «Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование», приуроченные к 100-летию РГУ имени А. Н. Косыгина» Теоретические основы химической технологии. 2020. Т. 54. № 3. С. 392–396. DOI: 10.31857/S0040357120030057.
2. Сажин Б. С., Федосов С. В., Кошелева М. К. Формирование научных направлений и отражение научных достижений в области повышения эффективности тепломассообменных процессов, экологической и производственной безопасности текстильных производств // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2018. № 4 (376). С. 116–122.
3. Разработка экспериментального стенда для исследования непрерывной конвективной сушки текстильных материалов при контактном ультразвуковом воздействии / В. Н. Хмелев, В. А. Нестеров, М. К. Кошелева, Д. В. Генне, П. П. Тertiшников // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2. № 2. С. 64–76. [https://doi.org/10.37816/2713-0789-2022-2-2\(4\)-64-76](https://doi.org/10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-64-76).
4. Рудобашта С. П., Карташов Э. М. Диффузия в химико-технологических процессах. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : КолосС, 2013. 478 с.
5. Рудобашта С. П., Кошелева М. К. Определение коэффициентов массоотдачи и массопроводности из кривых кинетики // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2015. № 6 (360). С. 175–180.
6. Кошелева М. К., Рудобашта С. П. Влияние ультразвукового поля на кинетические коэффициенты в процессе экстрагирования // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. № 5. С. 2404–2409.
7. Кошелева М. К., Мешалкин В. П., Дорняк О. Р. Математическое моделирование тепло- и массопереноса при сушке гранул носителя для никелевого катализатора // Изв. вузов. Серия: Химия и химическая технология. 2021. Т. 55 № 3. С. 339–346. DOI: 10.31857/S0040357121030258.
8. Kosheleva M. K., Rudobashta S. P., Dorniyak O. R., Dmitriev V. M. Mass conductivity of flat fibrous materials during their convective drying. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2023. V. 66. № 1. pp. 120–125. DOI: 10.6060/ivkkt.20236601.6683.

УДК 677.027.13

Валерий Тимофеевич Казуб, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Физика и математика», bukva46@mail.ru

Пятигорский медико-фармацевтический институт – филиал Волгоградского государственного
медицинского университета, Россия, г. Пятигорск

Мария Константиновна Кошелева, кандидат технических наук, профессор кафедры
«Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность»,
oxtpaxt@yandex.ru

Марина Зиевна Цинцадзе, аспирант кафедры «Энергоресурсоэффективные технологии,
промышленная экология и безопасность», tsintsadze-mz@rguk.ru

Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, г. Москва

Особенности интенсифицирующего воздействия физических полей на процесс экстрагирования

Аннотация. Изучены некоторые особенности интенсифицирующего воздействия
физических полей на процесс экстрагирования. Рассмотрено интенсифицирующее
воздействие импульсного электрического поля, магнитного и ультразвукового по-
лей. Анализ показывает, что вода, обработанная импульсным электрическим или
магнитным полем, сохраняет свойства в течение продолжительного времени, что
позволит использовать её для проведения процесса экстрагирования на действующем
технологическом оборудовании.

Ключевые слова: экстрагирование, интенсификация, импульсное электрическое по-
ле, магнитное поле, ультразвуковое поле.

Valerij T. Kazub, Advanced Doctor in Engineering Sciences,

Head of the Department of Physics and Mathematics, bukva46@mail.ru

Pyatigorsk Medical and Pharmaceutical Institute – branch of Volgograd State Medical University,
Russia, Pyatigorsk

Maria K. Kosheleva, Ph. D. of Engineering Sciences, Professor,

Head of the Department of Physics and Mathematics, oxtpaxt@yandex.ru

Marina Z. Tsintsadze, Postgraduate of the Department of Energy-Resource-Efficient

Technologies, Industrial Ecology and Safety of the Kosygin, tsintsadze-mz@rguk.ru

Kosygin Russian State University (Technologies. Design. Art), Russia, Moscow

Features of the intensifying effect of physical fields on the extraction process

Abstract. Some features of the intensifying effect of physical fields on the extraction process
are studied. The intensifying effect of a pulsed electric field, magnetic and ultrasonic fields is
considered. The analysis shows that water treated with a pulsed electric or magnetic field
retains its properties for a long time, which will allow it to be used for the extraction process
on existing technological equipment.

Keywords: extraction, intensification, pulsed electric field, magnetic field, ultrasonic field.

Целью работы является изучение особенностей интенсифицирующего воздействия
физических полей на процесс экстрагирования.

Эффективность ультразвукового воздействия (УЗВ) на диффузию вещества в жидко-
сти определяется степенью ультразвуковой кавитации, разрушением диффузионного погра-
ничного слоя на границе твердой и жидкой фазы, толщиной этого слоя [1].

При экстрагировании УЗВ носит интенсифицирующий характер, т.е. колебания увеличивают скорость процесса [1, 2]. Ультразвуковая кавитация вызывает вторичные эффекты, которые также интенсифицируют технологические процессы. Классификация физических эффектов, которые возникают при развитии акустической кавитации [1], представлена на рисунке 1.

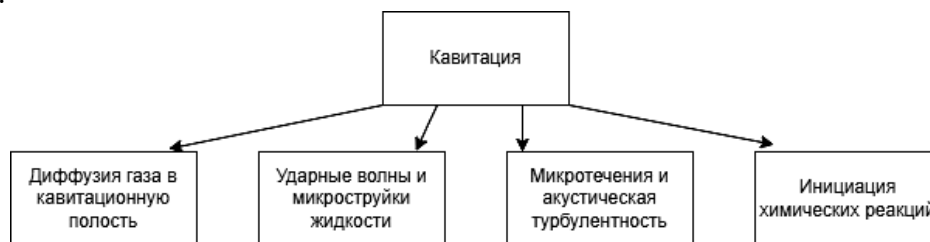


Рисунок 1 – Классификация физических эффектов, возникающих при развитии акустической кавитации

Использование магнитных полей в промышленных процессах проще и значительно дешевле, чем УЗВ [3, 4]. Как считают некоторые исследователи обработанная вода изменяет свои биологические свойства при магнитной обработке [3, 4].

В экспериментальных лабораторных исследованиях омагничивание промывной воды проводилось с использованием устройства для магнитной обработки со значением магнитной индукции в затворах между магнитами примерно 100 мТл. В таблице 1 представлены сравнительные результаты исследования кинетики экстрагирования незафиксированного красителя из текстильного материала при использовании смеси поверхностно-активных веществ.

Как видно из таблицы 1 при омагничивании эффективность экстрагирования незафиксированного красителя из текстильного материала существенно повышается. Механизм влияния магнитного поля на воду и ее примеси нельзя считать выявленным в достаточной мере. Известные соображения и гипотезы различных авторов, в основном, базируются на поляризующем действии магнитного поля на ионы и молекулы воды [3, 4]. Многочисленные наблюдения и эксперименты показывают, что при неизменном расходе воды применение магнитной обработки позволяет повысить эффективность экстрагирования [3, 4].

Таблица 1 – Кинетика экстрагирования из окрашенной ткани

Время, т, мин	Степень промывки без омагничивания промывного раствора, η, %	Степень промывки с омагничиванием промывного раствора, η, %
0	0,00	0,00
15	13,43	35,11
40	15,37	37,38
60	20,06	41,26
80	27,83	48,38
105	33,50	50,32

Значительный интерес представляет исследование эффективности процесса экстрагирования под воздействием импульсного электрического поля. Процесс экстрагирования при приложении импульсного поля затрагивает большое количество явлений, которые не проявляются при традиционных методах экстрагирования [5–8]. Импульсное поле возбуждает колебательное движение дипольных молекул воды в узких порах твердых частиц, при этом выделяется тепловая энергия, способствующая расширению частиц и проникновению молекул воды в поры твердого материала и ускорению диффузии экстрагируемых веществ в раствор [5–7]. Высказываются предположения, что воздействие на воду импульсного электрического поля (ИЭП) может приводить к разрыву водородных связей, что влияет на силы поверхностного натяжения. Как видно из таблицы 2 проведенная обработка воды полем, создаваемым импульсами напряжения амплитудой 20 кВ, приводит к снижению сил поверхностного натяжения воды, что подтверждается уменьшением коэффициента поверхностного

натяжения от $72,956 \times 10^{-3}$ Н/м (без обработки) до $65,04 \times 10^{-3}$ Н/м после обработки 200-ми импульсами [5–8]. Из таблицы 2 можно видеть влияние ИЭП на коэффициент поверхностного натяжения воды.

Таблица 2 – Влияние обработки импульсным электрическим полем (ИЭП) на значение коэффициента поверхностного натяжения воды

Вид воздействия \ Параметры	t, °C	$\sigma_{\text{ср}} \cdot 10^{-3}$, Н/м
Без воздействия ИЭП	18	72,956
Воздействие ИЭП	21	65,043

Значение ($65,043 \cdot 10^{-3}$ Н/м) коэффициента поверхностного натяжения воды соответствует температуре 66,4 °C, тогда как в процессе обработки температура воды повысилась всего на 3 °C – от 18,4 °C до 21,03°C, при такой температуре коэффициент поверхностного натяжения воды равен $72,37 \cdot 10^{-3}$ Н/м [5–8].

Кинетика изменения температуры воды представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Кинетика изменения температуры воды

τ , мин	30	60	90	120	150	180	200
t, °C	18,4	18,7	19,1	19,5	19,9	20,5	21,03

Таким образом, подтверждается предположение, что воздействие импульсного электрического поля, вероятно, приводит к разрыву водородных связей молекулы воды, что ослабляет силы поверхностного натяжения. Снижение сил поверхностного натяжения воды повышает смачиваемость, облегчает перенос извлекаемых компонентов в экстрагент [5–8].

Сохранение свойств обработанной воды в течение продолжительного времени после омагничивания или обработки импульсным электрическим полем [4–6] позволит использовать обработанную воду для проведения процесса экстрагирования на действующем технологическом оборудовании.

Библиографический список

1. Ультразвук. Аппараты в технологии / В.Н. Хмелев, А. В. Шалунов, С. С. Хмелев, С. Н. Цыганок. Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2015. 687 с.
2. Кошелева М. К., Рудобашта С. П. Влияние ультразвукового поля на кинетические коэффициенты в процессе экстрагирования // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. № 5. С. 2404–2409.
3. Классен В.И. Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных систем. М.: Цветметинформация, 1971. – 265 с.
4. Давидзон М.И. Электромагнитная обработка водных систем в текстильной промышленности. М. : Легпромбытиздат, 1988. 178 с.
5. Рудобашта С. П., Казуб В. Т. Электроразрядное экстрагирование: учебное пособие. М. : ИКЦ Колос-с, 2022. 259 с.
6. Казуб В. Т. Кинетика и основы аппаратурного оформления процессов электроразрядного экстрагирования биологически активных соединений : Дис. ... доктор технических наук. Тамбов. 2002. 345 с.
7. Kazub V. T., Kosheleva M. K., Rudobashta S. P. Kinetics of grinding of vegetable raw materials during electric discharge extraction // ChemChemTech. 2021. Vol. 64, No. 6. pp. 76–82. DOI 10.6060/ivkkt.20216406.6385.
8. Влияние электрических разрядов на кинетические коэффициенты в процессе промывки хлопчатобумажной ткани / Кошелева М. К., Рудобашта С. П., Казуб В. Т., Цинцадзе М. З. // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2020. № 1(385). С. 166–171.

УДК 66.061.34

Максим Александрович Промтов, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», декан факультета международного образования, promptov.ma@mail.tstu.ru
Андрей Юрьевич Степанов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты техносферная безопасность», benedict_dfantom@mail.ru
 Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов

Анализ эффективности экстрагирования гуминовых кислот в роторном импульсном аппарате из гуматосодержащего сырья

Аннотация. Выполнен анализ энергетической эффективности процесса экстрагирования гуминовых кислот (ГК) при обработке суспензий гуматосодержащего сырья (торфа, биогумуса, сапропеля) в установке на базе роторного импульсного аппарата (РИА) и в емкости с ленточно-лопастной мешалкой (ЛЛМ). Обработка суспензий в установке с РИА показала, что выход ГК в суспензиях торфа больше в 3,5 раза, биогумуса – в 2 раза, сапропеля – в 1,7 раза по сравнению с обработкой суспензий в емкости с ЛЛМ при сопоставимых значениях удельной энергии.

Ключевые слова: роторный импульсный аппарат, ленточно-лопастная мешалка, удельная энергия, экстрагирование, гуминовая кислота, суспензия, торф, биогумус, сапропель.

Maxim A. Promptov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor of the Department of Technological Processes, Apparatuses and Technosphere Safety, Dean of the Faculty of International Education, promptov.ma@mail.tstu.ru
Andrey Yu. Stepanov, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor Department of Technological Processes, Technosphere Safety Devices, benedict_dfantom@mail.ru
 Tambov State Technical University, Russia, Tambov

Analysis of the efficiency of extraction of humic acids in a rotor-stator device from humatic raw materials

Abstract. An analysis was made of the efficiency of detecting the extraction of humic acid (HA) from particles of humate-containing raw materials (peat, vermicompost, sapropel) during the processing of a slurry in an installation based on a rotor-stator device (RSD) and in a vessel with a helical ribbon impeller (HRI). The treatment of slurry in the prototype unit with RSD showed that the yield of HA in peat slurry is 3,5 times higher, vermicompost – 2 times, sapropel – 1,7 times compared with treatment in a vessel with HRI at same specific energy dissipation rate.

Keywords: rotor-stator device, helical ribbon impeller, specific energy, extraction, humic acid, slurry, peat, vermicompost, sapropel.

Гуминовые кислоты (ГК) используются в красителях, ингибиторах коррозии, лекарственных препаратах, буровых растворах, стимуляторах роста растений [1, с.53]. В промышленном производстве ГК извлекают из гуматосодержащего сырья (торф, биогумус, сапропель, бурый уголь и т. п.) с применением химических реагентов в емкостных аппаратах с мешалками различного типа [2, с.179].

Для перемешивания суспензии гуматосодержащего сырья (ГСС) при проведении процесса экстрагирования применяется в том числе и ленточно-лопастная мешалка (ЛЛМ), которая используется для создания турбулентного режима перемешивания суспензии ГСС в емкостном оборудовании [3, с.386]. ЛЛМ достаточно эффективна для обработки маловязких суспензий, создавая в емкости интенсивные радиальные и осевые вихревые потоки и оказывая механическое воздействие на частицы суспензии поперечными лопастями и спиральной поверхностью ленты на периферии лопастей.

Перспективным направлением для интенсификации процесса экстрагирования является разработка устройств с многофакторным импульсным воздействием на суспензию ГСС, которое может быть обеспечено в роторном импульсном аппарате (РИА). Принцип работы РИА основан на генерировании пульсаций давления и скорости в потоке обрабатываемой суспензии. РИА оказывают механическое, гидродинамическое и акустическое воздействие на поток суспензии ГСС и интенсифицируют процессы извлечения ГК из твердых частиц в жидкость [4, с.59].

Эффективность процесса экстрагирования определяется энергозатратами на обработку суспензии и степенью извлечения ГК из частиц ГСС. Уменьшение размера частиц, гидродинамические пульсации потока и кавитационные эффекты в жидкости увеличивают выход ГК за счет увеличения поверхности контакта фаз, глубокого проникновения растворителя в поры частиц. Эти эффекты позволяют получать водные растворы с высокой концентрацией ГК без использования химикатов.

Целью данной работы является определение эффективности процесса экстрагирования ГК из частиц ГСС при обработке суспензии в установке на базе РИА и в емкости с ЛЛМ при одинаковом уровне удельных энергозатрат.

В качестве суспензий ГСС использовали водные суспензии торфа, биогумуса и сапропеля, которые обрабатывали в установке на базе РИА и в емкости с ЛЛМ. При обработке суспензий в экспериментальных установках измеряли температуру, давление на входе в РИА, расход потока суспензии через РИА.

Перед смешиванием сухого торфа и биогумуса с водой для получения суспензии, из них удаляли чужеродные твердые частицы (частицы корней, коры древесины, камни) и просеивали через сито с квадратными ячейками 2×2 мм. Затем просеянный торф или биогумус в соотношении 1:4 по массе смешивали с водой, и затем заливали в емкость экспериментальной установки или в емкость с ЛЛМ [4, с.78].

Установка на базе РИА включала в себя аппарат РИА-250, насос, емкость и систему трубопроводов. Подробное описание установки, ее параметры и методика обработки суспензии ГСС в РИА-250 приведены в работе [4, с.74.]. Обрабатываемая суспензия ГСС заливалась в емкость. Из емкости суспензия насосом подавалась в РИА-250, и из аппарата по трубопроводу возвращалась обратно в емкость. Для достижения определенного числа циклов обработки движение жидкости было организовано по замкнутому контуру. По завершению обработки с заданной кратностью пробы суспензии отбирали из установки [4, с.80].

Параметры емкостного аппарата с ЛЛМ были следующими: диаметр ЛЛМ $d_s = 0,08$ м; высота ЛЛМ $h_s = 0,18$ м; количество лопастей $f = 2$; шаг лопасти (высота одного витка по винтовой линии) $p = 0,18$ м; зазор между спиралью и стенкой емкости $e = 0,015$ м; ширина лопасти $w = 0,01$ м; высота емкости $H = 0,3$ м, диаметр емкости $D = 0,11$ м.

Плотность и вязкость суспензии торфа составляли: $\rho = 1150$ кг/м³; $\mu = 1,18 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Плотность и вязкость суспензии биогумуса: $\rho = 1150$ кг/м³; $\mu = 1,23 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Плотность и вязкость суспензии сапропеля: $\rho = 1050$ кг/м³; $\mu = 1,17 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Для определения размера сухих частиц торфа и биогумуса применяли вибрационный грохот «Вибротехник ВП-Т/22С» с листовыми ситами, имеющими ячейки квадратной формы с размерами сторон 2; 1,5; 1; 0,5; 0,25 мм. Фракция торфа и биогумуса с размерами частиц более 2,5 мм предварительно отсеивалась и не использовалась в дальнейших экспери-

ментальных исследованиях. Порции исходного сухого торфа или биогумуса массой 1 кг просеивали на виброситах. После остановки вибрационного грохота каждое сито, вместе с остаточной фракцией взвешивали и определяли гранулометрический состав навесок торфа и биогумуса. Фракционный состав исходных и измельченных частиц ГСС измеряли с помощью лазерного анализатора частиц Micro Sizer 201C [4, с.86]. Средние размеры частиц торфа и биогумуса уменьшались после обработки в емкости с ЛЛМ примерно в 2 раза. После 40 циклов прохождения суспензии через РИА средний размер частиц торфа уменьшился в 30 раз, размер частиц биогумуса – в 40 раз [4, с.87].

Удельная мощность, затрачиваемая при обработке суспензии ГСС в установке на базе РИА-250, складывается из мощности N_1 , затрачиваемой на вращение ротора аппарата и мощности N_2 , затрачиваемой внешним насосом на прокачку суспензии через РИА-250.

Удельная диссипация мощности в РИА ε_1 , (Вт/кг) определяется как:

$$\varepsilon_1 = (N_1 + N_2) / m_1, \quad (1)$$

где m_1 – масса обрабатываемой суспензии, кг; N_1 – мощность, необходимая для вращения ротора, Вт; N_2 – мощность, затрачиваемая насосом на подачу суспензии в РИА-250, Вт.

Мощность, необходимая для вращения ротора РИА, определялась по формуле [5, с.11]:

$$N_1 = \text{Re}^{-0.21} \left(\frac{\delta}{R} \right)^{0.21} \left(\frac{az}{R} \right)^{0.7} \left(\frac{h}{R} \right)^{-1.3} \omega^3 \rho R^4 h, \quad (2)$$

где $\text{Re} = \omega \cdot R^2 \cdot \rho / \mu$; ω – угловая скорость ротора, с^{-1} ; R – радиус ротора, м.

Мощность, затрачиваемая насосом на подачу суспензии, рассчитывается как

$$N_2 = \Delta P \cdot Q, \quad (3)$$

где Q – расход, $\text{м}^3/\text{с}$; ΔP – перепад давления между входным и выходным патрубком РИА, Па.

Перепад давления на входном и выходном патрубках РИА определяется как:

$$\Delta P = P_1 - P_2, \quad (4)$$

где P_1 – давление на входе в РИА, P_2 – давление на выходе из РИА.

Удельная мощность для ЛЛМ ε_2 , (Вт/кг) определяется как:

$$\varepsilon_2 = N_s / m_2, \quad (5)$$

где N_s – мощность, необходимая для вращения ЛЛМ, Вт; m_2 – масса суспензии ГСС в емкости, кг

Расчет мощности на вращение ЛЛМ определяется согласно [3, с.387] как:

$$N_s = K_N \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d_s^5, \quad (6)$$

$$K_N = \frac{150}{\text{Re}} \frac{h_s}{d_s} \sqrt{\frac{f}{\frac{p}{d_s} \left(\frac{e}{w} \right)^{0.67}}}, \quad (7)$$

где $\text{Re} = n \cdot d_s^2 \cdot \rho / \mu$; K_N – критерий мощности; n – частота вращения вала мешалки, об/мин; d_s – диаметр ЛЛМ, м; h_s – высота лопасти, м; f – количество лопастей; p – шаг лопасти (высота одного витка), м; e – зазор между краем лопасти и стенкой емкости, м; w – ширина лопасти, м.

Расчетные графики удельной мощности на обработку суспензии ГСС в установке на базе РИА-250 и в емкости с ЛЛМ в зависимости от частоты вращения ротора РИА и ЛЛМ, показаны на рисунке 1. Экспериментальные зависимости концентрации ГК в суспензиях ГСС при их обработке в установке на базе РИА-250 и в емкости с ЛЛМ представлены на рисунке 2.

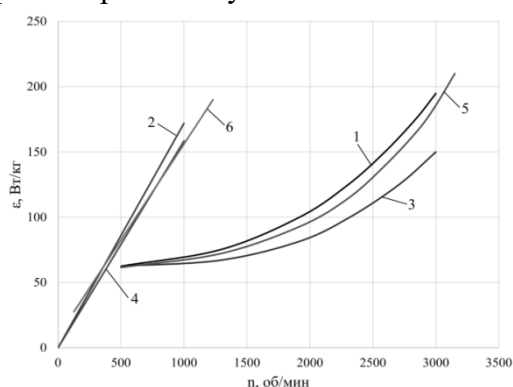


Рисунок 1 – Графики зависимости удельной энергии от частоты вращения:

1 – обработка биогумуса в РИА; 2 – обработка биогумуса в ЛЛМ; 3 – обработка сапропеля в РИА; 4 – обработка сапропеля в ЛЛМ; 5 – обработка торфа в РИА; 6 – обработка торфа в ЛЛМ

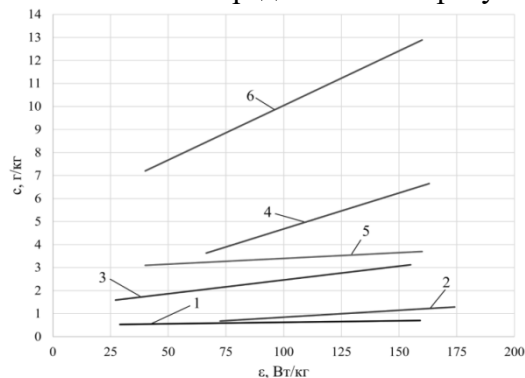


Рисунок 2 – Графики зависимости концентрации ГК в водной суспензии ГСС от удельной мощности, затрачиваемой на обработку в установке на базе РИА-250 и в емкости с ЛЛМ:

1 – биогумуса в ЛЛМ; 2 – биогумуса в РИА; 3 – сапропеля в ЛЛМ; 4 – сапропеля в РИА; 5 – торфа в ЛЛМ; 6 – торфа в РИА

Выход ГК при обработке суспензий ГСС в РИА по сравнению с обработкой ВС в сосуде с ЛЛМ при том же уровне удельной энергии был выше за счет увеличения поверхности контакта фаз при диспергировании частиц ГСС. Обработка суспензий ГСС в РИА вызывает диспергирование частиц, что приводит к увеличению межфазной поверхности, открытию пор и капилляров в твердых частицах. Интенсивная турбулентная обработка суспензии, пульсации давления, скорости потока и кавитационные эффекты способствуют более глубокому проникновению экстрагента в поры и капилляры частиц ГСС. Сочетание механического, гидродинамического, акустического и кавитационного воздействий на ГСС дает синергетический эффект при интенсификации процесса экстрагирования ГК из частиц ГСС. Выход ГК при обработке в РИА суспензий торфа больше в 3,5 раза, биогумуса – в 2 раза, сапропеля – в 1,7 по сравнению с обработкой в емкости с ЛЛМ при сопоставимых значениях удельной энергии.

Библиографический список

1. **Перминова И. В.** Гуминовые вещества – вызов химикам 21 века // Химия и жизнь. 2008. № 1. С. 50–55.
2. **Гостищева М. В., Федько И. В., Писниченко Е. О.** Сравнительная характеристика методов выделения гуминовых кислот из торфов с целью получения гуминовых препаратов // Доклады ТУСУРа. 2004. С. 66–69.
3. **Paul E. L.** Handbook of Industrial Mixing, Science and Practice / E.L. Paul, V.A. Atiemo-Obeng, S.M. Kresta (Eds.). Wiley, Hoboken, NY. 2004. 1385 p.
4. **Промтов М. А., Рудобашта С. П.** Экстрагирование гуминовых и фульвовых кислот из гуматосодержащего сырья в роторном импульсном аппарате: монография. Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ». 2022. 124 с.
5. **Промтов М. А., Борщев В. Я., Степанов А. Ю.** Особенности расчета мощности роторного импульсного аппарата с профилированным ротором // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2022. № 6. С. 10–12.

УДК 66.096.5-932.2

Вадим Станиславович Кох-Татаренко, аспирант кафедры
«Энергообеспечение предприятий и теплотехника», vadim6873@yandex.ru
Сергей Николаевич Кузьмин, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Энергообеспечение предприятий и теплотехника», tregulyaj@mail.ru
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

Торрефикация биомассы в реакторе с кипящим слоем и лабиринтной вставкой

Аннотация. Учитывая проблему декарбонизации энергетики и утилизации отходов, многие из которых являются биомассой, повышение эффективности использования биомассы в качестве топлива является актуальной задачей. Торрефикация является одной из наиболее эффективных технологий производства качественного топлива из биомассы, так как она позволяет повысить теплоту сгорания биотоплива, снизить его гидрофильность и улучшить размоловоспособность при относительно небольших энергозатратах. Совершенствование процесса торрефикации может быть достигнуто путем осуществления процесса в кипящем слое (КС) в газовой среде с низким содержанием кислорода, что сокращает энергозатраты и время процесса, а также за счет перевода реактора торрефикации в режим идеального вытеснения путем организации упорядоченного движения слоя. На основе проведенного исследования был создан промышленный реактор торрефикации биомассы с лабиринтной вставкой на производительность 1 т/ч по биоуглю. Установка введена в эксплуатацию на производственной базе ООО «ПРОДМАШ» (г. Ростов-на-Дону) в июне 2022 году.

Ключевые слова: торрефикация, кипящий слой, биомасса.

Vadim S. Kokh-Tatarenko, Postgraduate of the Department of Power Supply of Enterprises and Heat Engineering, vadim6873@yandex.ru
Sergey N. Kuzmin, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Energy Supply of Enterprises and Heat Engineering, tregulyaj@mail.ru
Tambov State Technical University, Russia, Tambov

Torrefication of biomass in a fluidized bed reactor and labyrinth insertion

Abstract. Given the issue of decarbonizing energy and utilizing waste, many of which are biomass, improving the efficiency of using biomass as fuel is a relevant task. Torrefaction is one of the most effective technologies for producing high-quality fuel from biomass, as it increases the combustion heat of biofuels, reduces their hydrophilicity, and improves their grindability at relatively low energy costs. Improving the torrefaction process can be achieved by carrying out the process in a fluidized bed (FB) in a gas environment with low oxygen content, which reduces energy consumption and process time, as well as by transferring the torrefaction reactor to the ideal displacement mode by organizing ordered layer movement. Based on the conducted research, an industrial biomass torrefaction reactor with a labyrinth insert was created with a capacity of 1 ton per hour for biochar production. The installation was put into operation at the production site of LLC "PRODMASH" (Rostov-on-Don) in June 2022.

Keywords: torrefaction; fluidized bed; biomass.

В данном исследовании процессу торрефикации подвергались частицы лузги подсолнечника. Их измельчали до размера частиц 0,2...0,6 мм. Затем загружали в реактор КС для торрефикации (рисунок 1). Реактор содержит газораспределительную решетку и рубашку масляного обогрева, которая нагревается до 350 °С. Дымовые газы от термомасляного котла, работающего на биомассе, подаются в реактор. Газы после реактора охлаждаются в теплообменнике и подвергаются механической очистке в циклоне.

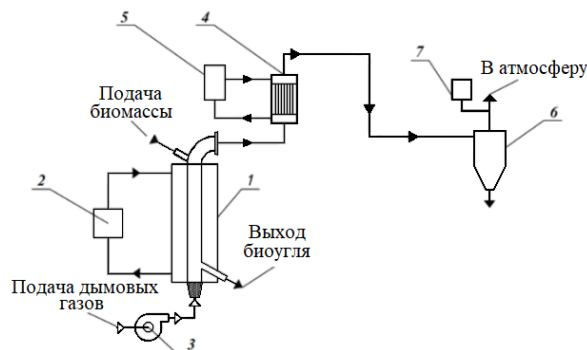


Рисунок 1 – Схема установки для исследования процесса торрефикации биомассы в кипящем слое в среде дымовых газов:

1 – реактор диаметром 100 мм; 2 – электрокотел; 3 – дымосос; 4 – теплообменник; 5 – бак – аккумулятор воды; 6 – циклон; 7 – газоанализатор

Для определения состава дымовых газов до и после реактора использовался газоанализатор MRU-300. Анализировались только данные об изменении концентрации окиси углерода. Длительность процесса торрефикации оценивалась по концентрации выхода неконденсируемых газов. После процесса образцы биомассы анализировались на влагосодержание, зольность и низшую теплоту сгорания. Такому же анализу подвергались исходные образцы биомассы.

В таблице 1 представлены результаты анализа влажности, зольности и теплоты сгорания образцов исходной биомассы и полученного из нее биоугля [1].

Таблица 1 – Характеристики исходной и торрефицированной лузги (биоугля)

Показатель	Ед. измерения	Исходная биомасса	Торрефицированная биомасса		
Время, прошедшее с начала процесса, мин		–	2,5	5	7,5
Влажность	%	10,6	9,29	3,2	2,7
Зольность	%	3,7	4,9	6,1	6,8
Низшая теплота сгорания	МДж/кг	16,0	18,35	20,7	21,2

Анализ данных, представленных в таблице 1, показывает, что необходимая продолжительность процесса окислительной торрефикации лузги подсолнечника в кипящем слое должна составлять не менее 5 мин.

Недостаток технологии торрефикации в кипящем слое – неоднородность структуры слоя, приводящая к низкой степени переработки биомассы. Классический реактор КС работает в режиме идеального смешения, что может вызвать выгрузку не полностью обработанного материала. Чтобы повысить однородность обработки, иногда используют горизонтальный желоб, но это приводит к увеличению размеров реактора и проблемам с конструкцией газораспределительной решетки. Для решения этой проблемы используют секционирование кипящего слоя, что обеспечивает режим идеального вытеснения. Была изготовлена экспериментальная установка для работы реактора КС в этом режиме.

Экспериментальная установка (рисунок 2) цилиндрической формы, являющаяся моделью реактора для торрефикации измельченной биомассы в кипящем слое, была изготовлена из органического стекла диаметром 0,3 м и высотой 1 м. На газораспределительной ре-

шетке была установлена лабиринтная вставка высотой 750 мм и шириной канала 50 мм. В начало лабиринтного канала из бункера с помощью шлюзового питателя подавалась измельченная биомасса.

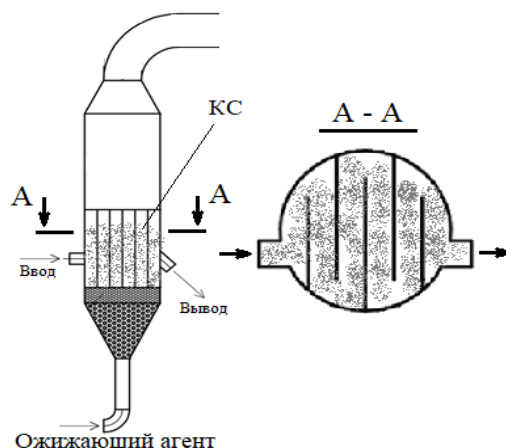


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки КС для организации режима идеального вытеснения

Результаты анализа движения частиц измельченной биомассы внутри экспериментальной установки позволили оценить время пребывания материала в реакторе, скорость движения и степень приближения ее к реактору идеального вытеснения. С этой целью в слой вводился трассер (окрашенные частицы лузги подсолнечника) и по результатам анализа отклика на выходе из установки, получено число псевдосекций $N > 20$ [1], свидетельствующее о режиме, близком к идеальному вытеснению. При этом лабиринтная вставка может выступать развитой компактной поверхностью теплообмена для передачи необходимой для процесса торрефикации биомассы тепловой энергии.

Проведенные исследования позволили разработать технологическую схему установки (рисунок 3), которая минимизирует энергетические затраты на процесс торрефикации, включая тепловую и электрическую энергию, а также на отопление и горячее водоснабжение производственной площадки. Схема включает реактор торрефикации с КС (4) с обогреваемой лабиринтной вставкой и «рубашкой», в которых циркулирует высокотемпературный теплоноситель, поступающий из теплогенератора, работающего на биомассе. В реактор КС в качестве ожижающего агента поступают дымовые газы, создающего бескислородную среду. Предварительно они охлаждаются до температуры торрефикации в турбогенераторе с ОЦР, вырабатывающим электрическую энергию на собственные нужды.

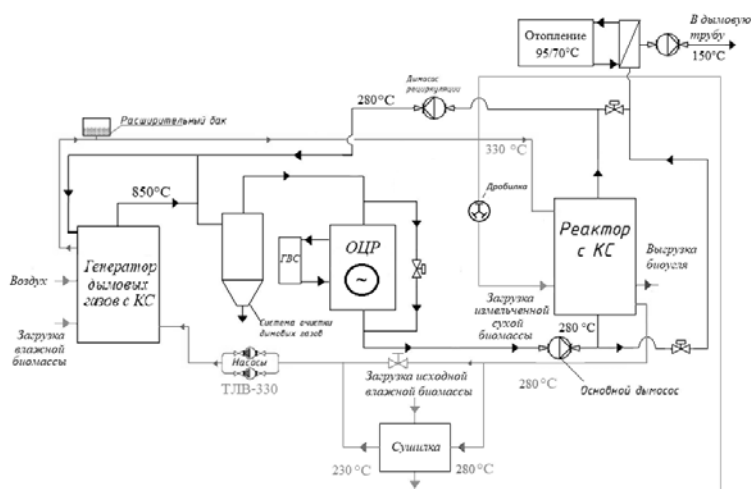


Рисунок 3 – Технологическая схема производства биоугля

Тепло передается биомассе от нагретой выше температуры торрефикации стенки реактора и обогреваемой лабиринтной вставки, а также от дымовых газов. Влажная исходная биомасса непрерывно подается в реактор КС после предварительного подсушивания до влажности 10...15 % и измельчения в дробилке. Охлажденный высокотемпературный теплоноситель после реактора КС поступает в сушилку в качестве греющего агента для влажной биомассы, а затем возвращается в теплогенератор, замыкая цикл. Температура торрефикации биомассы зависит от ее типа и определяет выбор высокотемпературного теплоносителя.

Результаты расчета элементов технологической схемы были воплощены в промышленной технологической установке на производственной базе АО «ПРОДМАШ» (г. Ростов-на-Дону).

На рисунках 4–5 показан внешний вид технологического комплекса, производительности по биоуглю 1т/ч, получаемому из подстилкочно пометной массы птицефабрик с выработкой электрической энергии мощностью в 175 кВт.



Рисунок 4 – Внешний вид реактора торрефикации с КС



Рисунок 5 – Теплогенератор кипящего слоя и турбогенератор с органическим циклом Ренкина

Библиографический список

1. **Kokh-Tatarenko V. S., Kuz'min S. N., Nebyvaev A. V. et al.** Oxidative Torrefaction of Some Biomass Kinds in a Fluidized Bed. Therm. Eng. 69, 93-100 (2022). <https://doi.org/10.1134/S0040601522020021>.

УДК 664.834

Ирина Викторовна Иванова, кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Инженерные дисциплины», aniri1901@yandex.ru
Тамбовский филиал Мичуринского государственного аграрного университета,
Россия, г. Тамбов

Дарья Олеговна Подъяблонская, магистрант, darya.podyablonskaya@yandex.ru
Станислав Павлович Рудобашта, доктор технических наук, профессор кафедры
теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, srudobashta@rgau-msha.ru
Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева,
Россия, г. Москва

Юрий Викторович Родионов, доктор технических наук, профессор кафедры
«Механика и инженерная графика», rodionow.u.w@rambler.ru
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

Исследование особенностей влагоотбора и режимов двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки яблочной кожуры

***Аннотация.** Исследованы особенности влагоотбора и режимы двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки яблочной кожуры. Интенсификация процесса сушки яблочной кожуры в первом периоде сушки осуществляется за счет создания осциллирующего режима подачи теплоносителя различной температуры с течением времени. Период падающей скорости сушки яблочной кожуры рекомендовано вести не импульсным методом, а за счет выдержки под вакуумом высушиваемого сырья с целью сокращения потребления энергии.*

***Ключевые слова:** двухступенчатая конвективно-вакуум-импульсная сушка, осциллирующий режим.*

Irina V. Ivanova, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Engineering Disciplines, aniri1901@yandex.ru

Tambov Branch of the Michurinsky State Agrarian University, Russia, Tambov

Darya O. Podiablonskaya, Master's Degree, darya.podyablonskaya@yandex.ru

Stanislav P. Rudobashta, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor of Department of Heat Engineering, Hydraulics and Enterprises Energy Suppl, srudobashta@rgau-msha.ru
Russian Timiryazev State Agrarian University, Russia, Moscow

Yuri V. Rodionov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, rodionow.u.w@rambler.ru
Tambov Branch of the Michurinsky State Agrarian University, Russia, Tambov

Investigation of the features of moisture sampling and modes of two-stage convective vacuum pulse drying of apple peel

***Abstract.** The features of moisture extraction and modes of two-stage convective vacuum pulse drying of apple peel are investigated. Intensification of the drying process of apple peel in the first drying period is carried out by creating an oscillating mode of coolant supply of different temperatures over time. The period of falling drying speed of apple peel is recommended to be conducted not by the pulse method, not by creating short pulses, but with the possibility of holding the dried raw materials under vacuum in order to reduce energy consumption.*

***Keywords:** two-stage convective-vacuum-pulse drying, oscillating mode.*

Мякоть овощей и фруктов является основной сырьевой частью для их технологической переработки. Оболочки и кожура в большинстве случаев считаются отходами. Так, например, в кожуре яблок, помимо характерных для данного фрукта пищевых веществ, концентрируется основная часть клетчатки и антиоксидантов, которые оказывают благоприятное воздействие на организм человека. А ведь яблоки являются основным сырьем при производстве соков и нектаров, образуя базовую составляющую для их производства. «Яблочная кожура представляет собой некоторую часть жмыха, но отдельно никогда не перерабатываясь, она идет в совокупности с сердцевиной, грубой клетчаткой и семечками» [4, с.373]. При производстве яблочных чипсов кожура удаляется перед нарезкой яблок на слайсы. Это выполняется для обретения конечным продуктом характерной нежности и хрупкости. Поэтому при производстве яблочных чипсов образуется значительное количество яблочной кожуры, которую необходимо переработать, желательнее с минимальными энергетическими затратами. Так как кожура содержит большинство пищевых веществ, характерных для самого яблока, то естественно, ее сушка должна быть щадящей [1, с.78]:

- температура сушки ниже температуры денатурации пищевых веществ;
- оптимизация времени влагоотбора.

В качестве щадящей переработки использовали двухступенчатую комбинированную вакуум-импульсную (КВИ) сушку, которая позволит соблюсти все требования, предъявляемые к сушке термолабильных материалов. Если вакуум-импульсная сушка является идеальной с точки зрения сохранности ценных пищевых веществ, то первый период сушки всегда проводится при повышенном температурном режиме, с целью быстрого удаления поверхностной влаги. Яблочная кожура ввиду особенностей своего строения требует более бережного отношения, чем мякоть. Поэтому первому периоду сушки необходимо уделить достаточно пристальное внимание, чтобы не превратить конечный продукт в банальную клетчатку.

Первую ступень сушки проводили в обычном конвективном режиме и в осциллирующем с температурой теплоносителя 75 и 20 °С и скоростью теплоносителя не менее 2,5 м/с, что позволило создать дополнительный градиент температуры внутри материала, ускоряющий процесс влагоотбора. «По окончании первого периода, когда наступает снижение скорости влагоотбора и углубление поверхности испарения влаги, перешли к более интенсивному способу – вакуум-импульсной сушке» [3, с.27]. При ее осуществлении использовали нагретый атмосферный воздух. «Первую и вторую ступень целесообразно проводить на одном оборудовании, конвективном вакуум-импульсном шкафу» [5, с.113], схема которого представлена на рисунке 1.

Сушильный агент при поступлении в КВИ шкаф нагреваем посредством ТЭНов 4. На входном и выходных патрубках сушильного шкафа установлены вакуумные клапаны 5 и 6, соответственно. Для управления подачей воды в вакуумной насосе используется клапан 7. Контроль температуры сушильного агента поступающего в шкаф, а также высушиваемого материала осуществляется за счет термодатчиков 9 и 8. Изменение массы высушиваемого продукта фиксируется при помощи весов с пределом измерения от 1 до 2000 г. «Все контрольно-измерительные приборы имеют аналоговый или цифровой выход на программно-технический комплекс (ПТК), который представляет собой совокупность микропроцессорных контроллеров, устройства связи и дисплейного пульта оператора» [2, с.73].

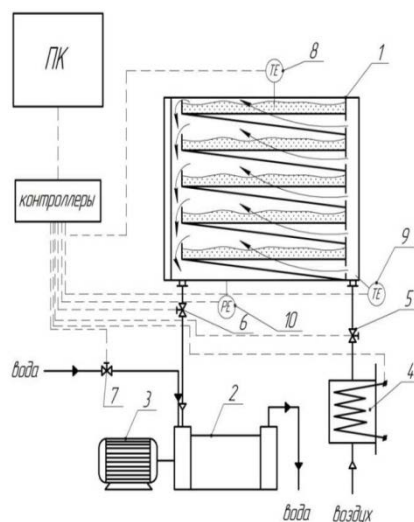


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки конвективной вакуум-импульсной сушки [3, с.373]:

1 – шкаф сушильный; 2 – двухступенчатый жидкостно-кольцевой вакуум-насос; 3 – асинхронный электродвигатель; 4 – ТЭНы; 5, 6, 7 – клапаны; 8, 9 – термодатчики; 10 – вакуумметр

Для проведения экспериментов использовали кожуру яблок сорта «Синап Орловский». Первый период сушки при обычном конвективном режиме по сравнению с осциллирующим является более длительным, что показано на рисунке 2.

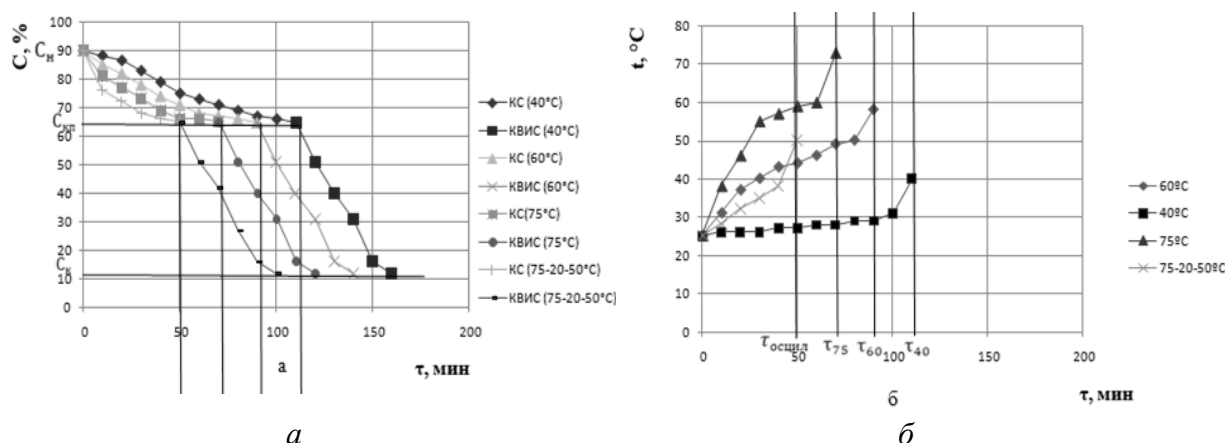


Рисунок 2 – Кривые сушки (а) и изменения температуры (б) кожуры яблок сорта «Синап Орловский» при снижении влажности материала

Из рисунка 2 видно, что период падающей скорости сушки начинается по достижении влажности кожуры яблок приблизительно 65 % по прошествии 65 мин при температуре теплоносителя 75 °С, 90 мин при 60 °С и 115 мин при 40 °С. При осциллирующем режиме 75 и 20 °С происходит более быстрый переход от первого ко второму периоду сушки яблочной кожуры – спустя лишь 50 мин.

Из рисунка 2б видно, что температуры денатурации яблочная кожа достигает за более короткий период (50 мин) при осциллирующем режиме.

На рисунке 3 представлены кривые сушки яблок сорта «Синап Орловский» во втором периоде сушки.

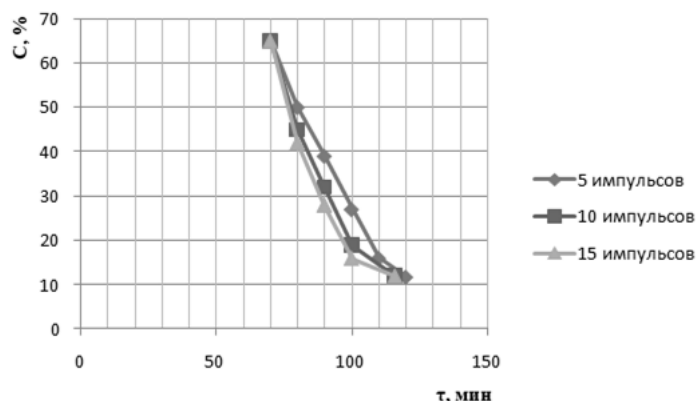


Рисунок 3 – Кривые сушки периода падающей скорости сушки кожуры яблок «Синап Орловский»

Из рисунка 3 видно, что достижение конечной влажности достигается практически одновременно, но в зависимости от длительности воздействия вакуумом на высушиваемый материал промежуточные значения влажности различны. Единственным преимуществом при длительном вакуумном воздействии является энергосбережение, так как создание вакуума или его поддержание различно по затратам энергии. Поддержание вакуума менее энергоемко.

Таким образом, к особенностям влагоотбора при сушке яблочной кожуры можно отнести осциллирующий режим при постоянной скорости сушки, который способствует более быстрому влагоотбору за счет возникновения дополнительного температурного градиента. В периоде падающей скорости необходимо уменьшить количество вакуумных воздействий, с увеличением их длительности из соображения энергосбережения. При использовании представленных режимов сушки из яблочной кожуры можно получить не только чистую клетчатку, а достаточно ценную биологически активную добавку с содержанием антиоксидантов и характерных для данного фрукта витаминов.

Библиографический список

1. Вакуумная техника и технологии в производстве продуктов питания функционального назначения / А. С. Зорин, Ю. В. Родионов, И. В. Иванова, Е. П. Иванова, Н. Н. Мочалин // Инновационные технологии в производстве функциональных продуктов питания: Всероссийская научно-практическая конференция: Мичуринск, 2014. С. 76–82.
2. **Зорин А. С.** Совершенствование технологии и технических средств комбинированной сушки растительного сырья для производства чипсов: дис. ... кандидат технических наук : 05.20.01 / Зорин А. С. Мичуринск, 2019. 156 с.
3. **Иванова И. В., Родионов Ю. В.** Двухступенчатая комбинированная сушка сельскохозяйственных продуктов // Наука и образование. Научный рецензируемый электронный журнал. 2021. Т. 4. № 4. С. 25–29.
4. Инновационные технологии сушки растительного сырья / Ю. Г. Скрипников [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. 2012. №3(41). С. 371–376.
5. **Попова И. В.** Совершенствование технологии и средств сушки овощного сырья: дис. ... кандидат технических наук : 05.20.01 / Попова И. В. Мичуринск, 2009. 161 с.

УДК 661.52

Юлия Александровна Таран, кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических технологий имени Н.И. Гельперина», taran_yu@mirea.ru
Виктория Олеговна Стрельникова, преподаватель кафедры «Процессы и аппараты химических технологий имени Н. И. Гельперина», strelnikova@mirea.ru
Валентина Михайловна Фуфаева, ассистент кафедры «Процессы и аппараты химических технологий имени Н. И. Гельперина», fufaeva@mirea.ru
Власова Анастасия Михайловна, студентка, nastjushka_vlasova@rambler.ru
 МИРЭА – Российский технологический университет
 (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Россия, г. Москва

Получение сложных удобрений на основе карбамида как способ утилизации фосфогипса

Аннотация. Целью данного исследования было оценить возможность использования фосфогипса в качестве наполнителя для получения сложных минеральных удобрений на основе карбамида. Процесс проводили на тарельчатом грануляторе. Порошок фосфогипса наносили на готовые гранулы карбамида, в качестве связующего использовали водный раствор лигносульфоната. Были получены гранулы с разными массовыми долями наполнителя, определены их основные показатели качества.

Ключевые слова: фосфогипс, гранулирование окатыванием, минеральные удобрения, отходы производств, карбамид, сложные удобрения, удобрения с наполнителями.

Yulia A. Taran, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Processes and Devices of Chemical Technologies named after N. I. Gelperin, taran_yu@mirea.ru
Victoria O. Strelnikova, Lecturer of the Department of Processes and Devices of Chemical Technologies named after N. I. Gelperin, strelnikova@mirea.ru
Valentina M. Fufaeva, Assistant of the Department of Processes and Devices of Chemical Technologies named after N.I. Gelperin, fufaeva@mirea.ru
Anastasi A. Vlasova, Student, nastjushka_vlasova@rambler.ru
 MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Russia, Moscow

Obtaining complex fertilizers based on urea as a way to utilize phosphogypsum

Abstract. The purpose of this study was to evaluate the possibility of using phosphogypsum as a filler for the production of complex mineral fertilizers based on urea. The process was carried out on a plate granulator. Phosphogypsum powder was applied to ready-made urea granules, an aqueous solution of lignosulfonate was used as a binder. Granules with different mass fractions of the filler were obtained, their main quality indicators were determined.

Keywords: phosphogypsum, pelletizing, mineral fertilizers, industrial waste, urea, complex fertilizers, fertilizers with fillers.

Введение

Одним из побочных продуктов производства экстракционной фосфорной кислоты и фосфорных удобрений из апатитов и фосфоритов является фосфогипс, представляющий собой дигидрат сульфат кальция ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). На 1 т продукта приходится от 4 до 7 т для

апатитового и фосфоритового сырья соответственно. В РФ количество накопленных отходов фосфогипса оценивается в 300 млн. тонн с ежегодным увеличением на 10...15 млн т. Отвалы фосфогипса приводят к загрязнению окружающей среды [1].

Основными способами утилизации фосфогипса является его использование: в качестве добавки для производства цемента [2, 3], гипсовых вяжущих [4], как источника редкоземельных элементов и фосфомела [5], в сельском хозяйстве для гипсования солонцовых почв [6], как компонента сложных удобрений [7–9].

Нами предлагается использовать невостребованный фосфогипс в производстве сложных удобрений повышенного качества, как один из наиболее перспективных способов его утилизации, поскольку такое применение не требует внедрения нового дорогостоящего оборудования, логистического анализа для сырья и, кроме того, позволит расширить линейку выпускаемой продукции на предприятиях по производству минеральных удобрений.

Целью исследования являлось проанализировать возможность использования фосфогипса в качестве наполнителя для карбамида, вводимого при гранулировании окатыванием, и определить такие характеристики полученного продукта, как качество поверхности гранул, массовую долю внесенного наполнителя с учетом потерь, гранулометрический состав и статическую прочность.

Одной из задач исследования было определить максимально возможную массовую долю фосфогипса, вносимого в качестве наполнителя, при которой качество готовых гранул повысится. Одним из важных ограничений в данном аспекте является максимальный диаметр гранул, который необходимо учитывать, поскольку большинство удобрений вносится механизированным способом.

Материалы и методы

Для проведения анализа использовались:

- гранулированный карбамид марки Б производства ПАО «Акрон», (46,2 % масс. азота), просеянный через сито с отверстиями размером меньше 5 мм;
- порошок фосфогипса нейтрализованный для строительных работ производства ООО «ЕвроХим-БМУ» (ТУ 2141-009-32320462-2016), содержащий 97,6 % масс. дигидрат сульфата кальция, 0,12% масс. водорастворимого P_2O_5 , гигроскопическую влагу не более 14% масс. и просеянный через сито с отверстиями размером меньше 2 мм;
- порошок лигносульфоната марки ЛСТП производства ООО «Химэкс» (ТУ 2455-028-00279580-2014), содержащий 58 % масс. солей натрия лигносульфоновых кислот.

Гранулирование проводили в тарельчатом грануляторе. Количество оборотов тарелки – 30 ± 5 об/мин; угол наклона тарелки – 40° ; температура на тарелке – 60 ± 1 °C; температура в слое гранул – 50 ± 1 °C; температура на форсунке – 21 ± 1 °C; характер распыла на форсунке – тонкий распыл.

Методика проведения эксперимента заключалась в распыле на слой гранул, находящийся в тарельчатом грануляторе, связующего с последующим внесением влажного порошка фосфогипса. Процесс проводился периодически, с чередованием стадий гранулирования и сушки. После выгрузки гранулы взвешивались и направлялись на досушивание в сушильный шкаф при температуре 55 °C до постоянной массы.

Массовую долю внесенного наполнителя рассчитывали, как: доля наполнителя

$$\% = \frac{m - m_0}{m} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где m , m_0 – масса образцов с наполнителем и без него, г.

Качество поверхности полученных гранул оценивали с помощью микроскопа с увеличением 8х. Гранулометрический состав определяли с помощью набора сит по ГОСТ

21560.1-82. Статическую прочность определяли с помощью измерителя прочности ИПГ-1М по ГОСТ 201560.2-82.

Результаты и обсуждение

На основании предыдущих опытов покрытия гранул карбамида растворами лигно-сульфоната (л/с) с концентрациями 30% масс., 40% масс., 50% масс. без использования фосфогипса (ф/г) были определены потери связующего, которые составили 75% масс. Наилучший результат дало использование раствора лигносульфоната 40% масс., с которым продолжили работу в дальнейших опытах.

Потери фосфогипса составили приблизительно 45...55% масс. Наименьшие потери фосфогипса наблюдались при использовании 30 и 90 г наполнителя.

В результате были получены гранулы карбамида с наполнителем (рисунки 1–3).

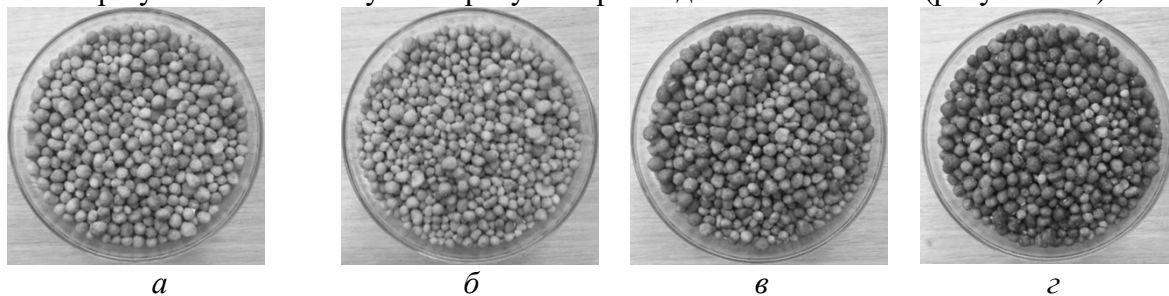


Рисунок 1 – Вид готовых гранул при:

$a - m_{ф/г} = 30 \text{ г}; б - m_{ф/г} = 50 \text{ г}; в - m_{ф/г} = 70 \text{ г}; з - m_{ф/г} = 90 \text{ г}$

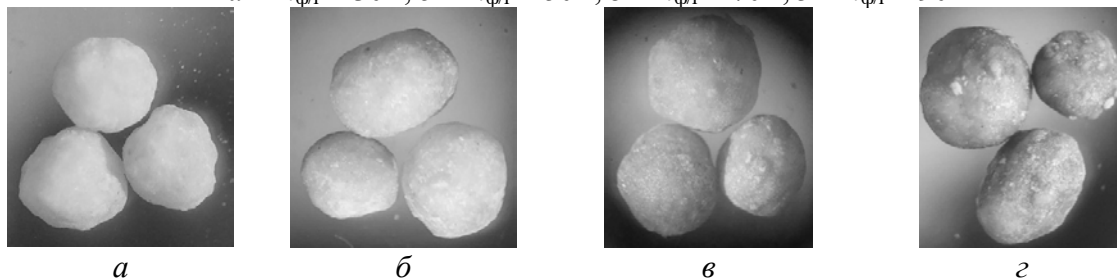


Рисунок 2 – Вид готовых гранул с увеличением 8х при:

$a - m_{ф/г} = 30 \text{ г}; б - m_{ф/г} = 50 \text{ г}; в - m_{ф/г} = 70 \text{ г}; з - m_{ф/г} = 90 \text{ г}$

Поверхность покрытия в опытах № 1-2 – ровная и гладкая, в опыте № 3 на поверхности гранул появляются вкрапления наполнителя, размер которых увеличивается в Опыте № 4. С увеличением доли наполнителя наблюдается повышение липкости поверхности гранул и их склеивание.

Таблица 1 – Результаты опыта по определению количества фосфогипса

Параметры	Опыт № 1	Опыт № 2	Опыт № 3	Опыт № 4
Исходная масса гранул, г	100	100	100	100
Исходная масса ф/г, г	30	50	70	90
Время проведения опыта, мин	30	35	45	55
Объём используемого связующего, мл	24,0	26,5	43,0	54,0
Средний расход связующего, мл/мин	0,80	0,76	0,96	0,98
Масса используемого л/с, г	11,5	9,1	20,5	25,8
Конечная масса гранул, г (до сушки)	119,7	125,8	143,0	158,5
Конечная масса гранул, г (после сушки)	119,5	125,6	141,1	156,2
Доля покрытия, % масс.	16,3%	20,4%	29,1%	36%
Потери л/с (75 % масс.), г	8,6 г	6,8 г	15,4 г	19,4 г
Потери ф/г, г (% масс.)	13,4 г (44,7%)	26,7 г (53,4%)	34,0 г (48,6%)	40,2 г (44,7%)

Массовая доля наполнителя в готовой грануле повышается с увеличением количества используемого фосфогипса (смотрите таблицу 1) с 15 % масс. для 30 г ф/г до 35 % масс. для 90 г ф/г. Однако на рисунке 3 гранул в разрезе видно, что чем больше массовая доля фосфогипса, тем хуже адгезия покрытия к поверхности гранул.

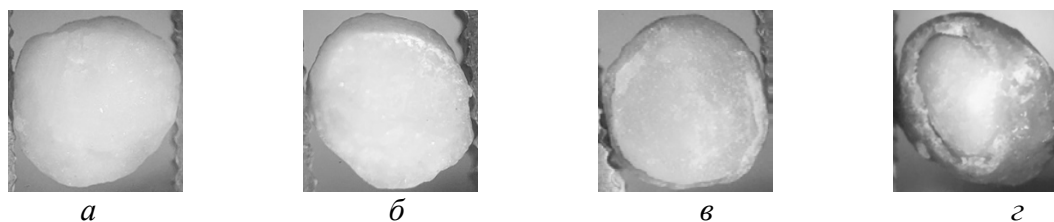


Рисунок 3 – Вид готовых гранул в разрезе с увеличением 8х при:

1 – $m_{ф/г} = 30$ г; 2 – $m_{ф/г} = 50$ г; $m_{ф/г} = 70$ г; $m_{ф/г} = 90$ г

Гранулометрический состав увеличился, т. к. появилась фракция больше 5 мм (смотрите рисунок 4).

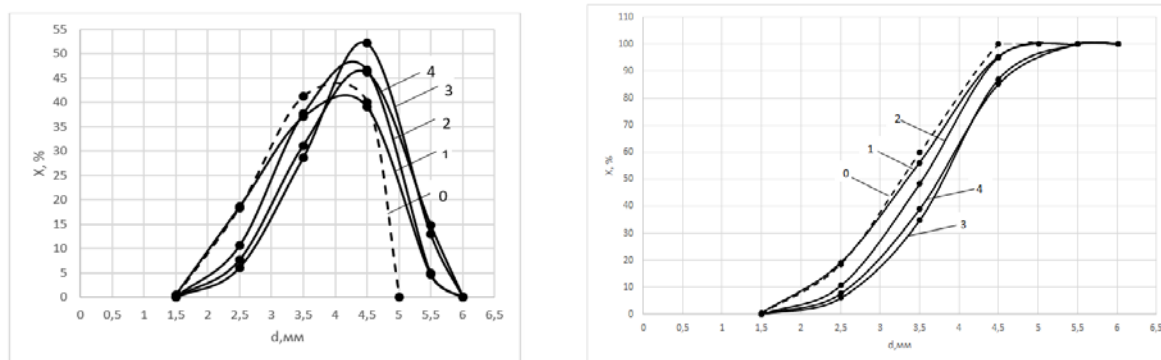


Рисунок 4 – Дифференциальная и интегральная кривые распределения гранул по размерам:

0 – исходные гранулы без покрытия ($m_r = 100$ г); 1 – гранулы из Опыта № 1 ($m_r = 119,5$ г, $m_{ф/г} = 30$ г); 2 – гранулы из Опыта № 2 ($m_r = 125,6$ г, $m_{ф/г} = 50$ г); 3 – гранулы из Опыта № 3 ($m_r = 141,1$ г, $m_{ф/г} = 70$ г); 4 – гранулы из Опыта № 4 ($m_r = 156,2$ г, $m_{ф/г} = 90$ г)

Статическая прочность гранул карбамида в Опыте № 1 увеличилась на 20% по сравнению с гранулами без покрытия, а с дальнейшим увеличением количества фосфогипса начала снижаться (смотрите рисунок 5), что может быть связано с отслаиванием верхних слоев гранулы от ядра из-за плохой адгезии между ними.

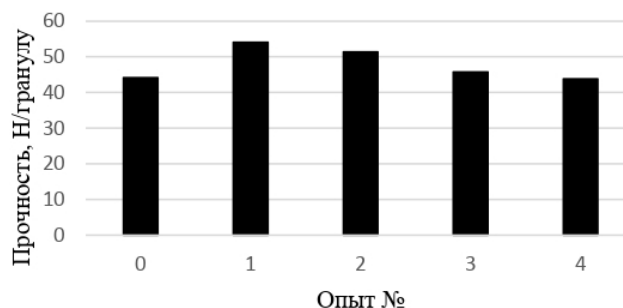


Рисунок 5 – Зависимость статической прочности гранул от массы внесенного фосфогипса:

0 – исходные гранулы без покрытия; 1 – $m_{ф/г} = 30$ г; 2 – $m_{ф/г} = 50$ г; $m_{ф/г} = 70$ г; $m_{ф/г} = 90$ г

Выводы

На основе экспериментальных данных можно сделать вывод о перспективности данного способа утилизации фосфогипса, так как нам удалось получить гранулы сложного удобрения с повышенной статической прочностью.

Анализ свойств, полученных нами гранул показал, что массовая доля покрытия 15 % масс, является наилучшей по физико-механическим свойствам гранул. Они обладают ровной не липкой поверхностью, статическая прочность увеличилась на 20 % в сравнении с исходными гранулами.

Анализ дифференциальной и интегральной кривой гранулометрического состава, показывает, что придельный диаметр гранул не превышен и в совокупности с нормами содержания фосфогипса в почве сельхоз земель [10] это говорит о том, что разумно повышать массовую долю вносимого наполнителя.

Большое количество потерь и самого фосфогипса и связующего в ходе эксперимента позволяет сделать вывод о том, что в рамках следующего этапа работ, необходимо подобрать альтернативное связующее, которое позволит сократить потери и повысить адгезию слоев гранулы.

Библиографический список

1. Мещеряков Ю. Г., Федоров С. В. Проблемы промышленной переработки фосфогипса в РФ, состояние и перспективы // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 6 (часть 2). С. 273–276.
2. Современные направления переработки фосфогипса / В. В. Головнева, А. Е. Кулемина, И. А. Почиталкина, О. Э. Шубабко // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2020. № 4. Т. XXXIV. С. 65–67.
3. Кочетков А. В., Щеголева Н. В., Коротковский С. А., Талалай В. В., Васильев Ю. Э., Шашков И. Г. Условия получения фосфогипса как отхода – побочного продукта производства азотно-фосфорных удобрений // *Российский журнал транспортного машиностроения*. 2019. № 2. Т. 6. [Электронный ресурс]. URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS219.pdf> (дата обращения 22.02.2023).
4. Шуйский А. И., Прокопов А. Ю., Торлина Е. А. Способ переработки фосфогипса // *Международная научно-техническая конференция «FarEastCon-2019»*. Конференция ИОР. Серия: Материаловедение и инженерия. 2020. Т. 753, № 2. Р. 022013.
5. Литвинова Т. Е., Сучков Д. В. Комплексный подход к утилизации техногенных отходов минерально-сырьевого комплекса // *ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022. № 6-1. С. 331–348.
6. Matveeva V. A., Smirnov Y. D., Suchkov D. V. Industrial processing of phosphogypsum into organomineral fertilizer // *Environ Geochem Health*. 2022. V. 44. № 1. pp. 1605–1618.
7. Vashishtha M., Dongara P., Singh D. Improvement in properties of urea by phosphogypsum coating // *International Journal of ChemTech Research*. 2010. V. 2. № 1. pp. 36–44.
8. Shivay Ya. S., Prasad R., Singh M. P. Effect of Nitrogen Levels and Coated Urea on Growth, Yields and Nitrogen Use Efficiency in Aromatic Rice // *Journal of Plant Nutrition*. 2015. V. 36. № 6. pp. 875–882.
9. Yu X., Li, B. Release mechanism of a novel slow-release nitrogen fertilizer // *Particuology*. 2019. V. 45. № 10. pp. 124–130.
10. Yakovlev A. S., Kaniskin M. A., Terekhova V. A. Ecological Evaluation of Artificial Soils Treated with Phosphogypsum // *Eurasian soil science*. 2013 V. 46. № 6. pp. 697–703.

УДК 661.152

Юлия Александровна Таран, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Процессы и аппараты химических технологий имени Н. И. Гельперина», taran_yu@mirea.ru
Валентина Михайловна Фуфаева, ассистент кафедры
«Процессы и аппараты химических технологий имени Н. И. Гельперина», fufaeva@mirea.ru
Виктория Олеговна Стрельникова, преподаватель кафедры
«Процессы и аппараты химических технологий имени Н. И. Гельперина», strelnikova@mirea.ru
МИРЭА – Российский технологический университет
(Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова)», Россия, г. Москва

Получение удобрений пролонгированного действия на основе приллированного и гранулированного карбамида

***Аннотация.** На основе приллированного и гранулированного карбамида были получены удобрения пролонгированного действия с двумя различными составами покрытия. Процесс нанесения покрытия проводили на тарельчатом грануляторе. Изучено влияние типа исходного карбамида на скорость высвобождения питательных веществ в воду в зависимости от массовой доли и состава покрытия. Анализ кривых растворения для полученных продуктов позволил сделать выводы о рациональном выборе исходного сырья для получения удобрений с заданными свойствами.*

***Ключевые слова:** удобрения пролонгированного действия, приллированный и гранулированный карбамид, сера, парафин.*

Yulia A. Taran, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Processes and Devices of Chemical Technologies named after N. I. Gelperin, taran_yu@mirea.ru
Valentina M. Fufaeva, Assistant of the Department of Processes and Devices of Chemical Technologies named after N. I. Gelperin, fufaeva@mirea.ru
Victoria O. Strelnikova, Lecturer of the Department of Processes and Devices of Chemical Technologies named after N. I. Gelperin, strelnikova@mirea.ru
MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Russia, Moscow

Production of fertilizers with prolonged action based on prilled and granular urea

***Abstract.** Prolonged action fertilizers with two different coating compositions were obtained on the basis of prilled and granular urea. The coating process was carried out on a plate granulator. The influence of the initial urea type on the rate of nutrients release into water, depending on the mass fraction and composition of the coating has been studied. The analysis of the dissolution curves for the obtained products allowed us to draw conclusions about the rational choice of raw materials to obtain fertilizers with the specified properties*

***Keywords:** prolonged action fertilizers, prilled and granular urea, sulfur, paraffin.*

Вследствие стремительного роста населения планеты и увеличения потребности в продуктах питания возрастает роль агрохимической отрасли промышленности в области производства удобрений, которые применяются для увеличения урожайности культур и плодородия почвы. Однако применение традиционных минеральных удобрений, содержащих азот (карбамид, аммиачная селитра, сложные NPK удобрения), осложняется тем, что гранулы удобрения быстро растворяются в воде, а выделившиеся в почву питательные компоненты не успевают полностью поглотиться культурами. Избыточный непоглощенный азот вы-

мывается в почвенные воды и улетучивается в атмосферу, что представляет серьезный источник загрязнения окружающей среды [1].

Решением этой проблемы может стать производство и применение удобрений пролонгированного действия, обеспечивающих замедленное высвобождение питательных веществ. Одним из способов получения таких удобрений является покрытие исходного традиционного удобрения оболочкой. В результате жизнедеятельности микроорганизмов и воздействия условий окружающей среды в оболочке образуются поры, через которые внутрь капсулы поступает вода, а образующийся раствор удобрения медленно выделяется в почву и более полно потребляется растениями.

При применении удобрений пролонгированного действия наблюдается: снижение затрат и потерь при внесении; снижение ущерба, наносимого окружающей среде [2]; повышение урожайности культур [3]. Такие удобрения можно получить в тарельчатых или барабанных аппаратах, а также в аппаратах с псевдоожиженным слоем. Применяют также и нетрадиционные методы, например, распылительную сушку, экструзию.

Одним из основных показателей качества таких удобрений является скорость высвобождения питательных веществ. На их качество влияет большое количество параметров: исходное сырье, состав и толщина покрытия, параметры его нанесения и т. д.

Большинство научных публикаций посвящено исследованию состава покрытий и технологиям их нанесения, однако влияние исходного сырья на качество продукта, как правило, в таких исследованиях не учитывают, поэтому наше исследование посвящено именно этому аспекту.

В РФ в промышленности азотосодержащие минеральные удобрения преимущественно получают в виде приллов и гранул. Приллы имеют гладкую, близкую к сферической поверхность и достаточно однородный гранулометрический состав, их себестоимость ниже, однако они имеют «усадочную полость», которая часто соединена каналом с атмосферой, из-за чего их статическая прочность ниже в сравнении с гранулами [4].

У гранул поверхность более шероховатая и большинство гранул отличаются по форме от сферической, имеют острые углы и сколы, при этом гран. состав менее однородный, статическая прочность выше, но выше и себестоимость. На рисунке 1 приведена дифференциальная кривая, иллюстрирующая гран. состав исходного карбамида.

Поэтому при получении удобрений пролонгированного действия у разных типов сырья есть свои преимущества и недостатки.

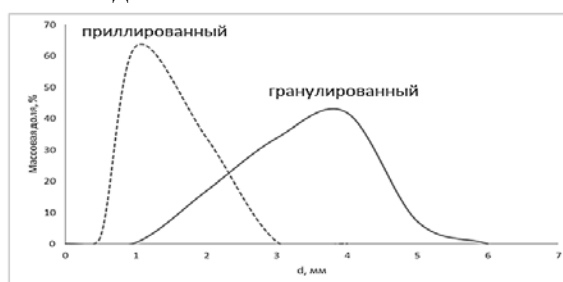


Рисунок 1 – Дифференциальная кривая гранулометрического состава исходного карбамида

В данном исследовании проведен ряд опытов по получению приллированного и гранулированного карбамида пролонгированного действия с разным составом и долей покрытия. Анализ кривых растворения продуктов помог сделать вывод о влиянии типа исходного сырья на достигаемый пролонгированный эффект.

В качестве сырья был использован карбамид (содержание азота 46 %) марки Б приллированный и гранулированный изготовителя ООО «ТПК «НОВ-АГРО». Для проведения опытов была отобрана фракция 2,0...3,0 мм.

В качестве материалов для покрытий использованы сера молотая (СТО 46484954-0021-2011, производитель АО «База № 1 Химреактивов») и парафин П-2 (ГОСТ 23683-89).

Сера сама является удобрением и давно применяется в качестве покрытия. Исследование параметров ее нанесения представлено в одной из наших работ [5]. Парафин является биоразлагаемым и доступным полимерным материалом, который также применяется для формирования покрытий [6].

Для нанесения покрытия использовали гранулятор тарельчатого типа (рисунок 2). Процесс проводился в периодическом режиме.

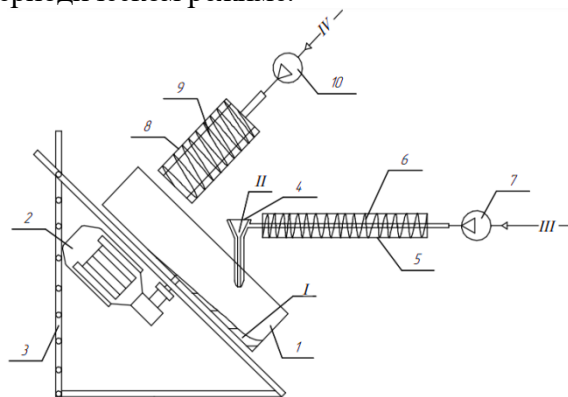


Рисунок 2 – Схема установки по получению удобрений пролонгированного действия:

I – тарельчатый гранулятор; *2* – червячный мотор-редуктор; *3* – устройство регулировки угла наклона гранулятора; *4* – диспергирующее устройство; *5* – воздухопровод с кожухом; *6, 9* – ТЭНы; *7, 10* – компрессор; *8* – тепловая пушка;
I – сырье; *II* – расплав покрытия; *III, IV* – воздух

Кривые растворимости для полученных продуктов снимали, определяя концентрацию карбамида в растворе по показателю преломления с помощью рефрактометра ИРФ-454 Б2. Методика анализа представлена в работе [7].

Полученные кривые растворимости (рисунок 3 *а, б*) показали, что для меньших долей покрытия (20, 30% масс.) наилучший результат показывают гранулы, так как толщины покрытия недостаточно для того, чтобы запечатать усадочный канал у приллов (происходит разрушение оболочки, проникновение воды внутрь капсулы и быстрое растворение ядра). Однако при увеличении массовой доли покрытия (от 40% масс.) наилучший результат показывают приллы, так как при большей толщине покрытия происходит надежное запечатывание «усадочного канала», а более близкая к сферической форма прилл способствует формированию равномерной оболочки.

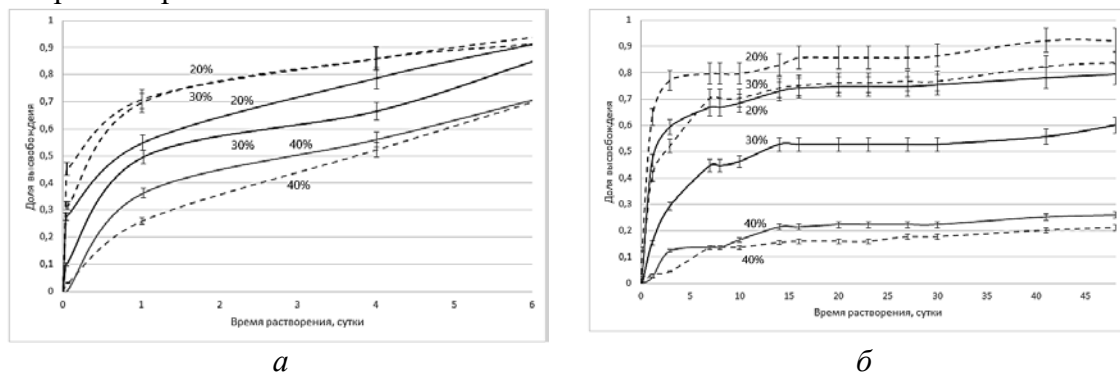


Рисунок 3 – Кривые растворимости для капсулированных приллов (пунктирные) и гранул (сплошные) карбамида с покрытием на основе:
а – серы; *б* – парафина

На рисунке 4 видно, что гранулы и приллы ощутимо различаются по внешнему виду и структуре. Однако после нанесения покрытия, полученные на их основе удобрения не имеют существенных визуальных отличий.

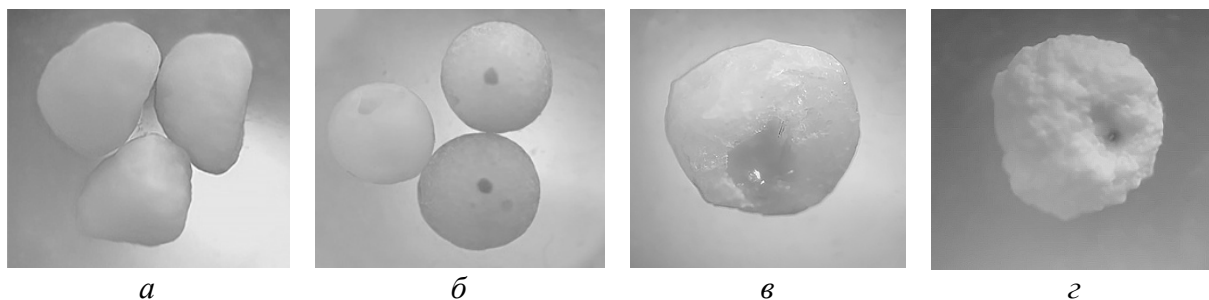


Рисунок 4 – а – гранулированный карбамид, б – приллированный карбамид с усадочными каналами, соединенными с атмосферой, в – прилл в разрезе (видна усадочная полость), з – прилл, покрытый серой (усадочный канал закрыт не полностью)

На основе данного исследования можно сделать вывод, что при более низких массовых долях покрытия (20, 30% масс.) использование гранулированного карбамида в качестве исходного сырья будет эффективнее, а при получении продуктов с толстыми оболочками (от 40% масс.) целесообразно использовать приллы.

Библиографический список

1. **Ahmed M., Rauf M., Mukhtar Z., Saeed N.A.** Excessive use of nitrogenous fertilizers: an unawareness causing serious threats to environment and human health // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. V. 24(35). pp. 26983-26987.
2. Novel slowrelease nanocomposite nitrogen fertilizers: the impact of polymers on nanocomposite properties and function / **E. I. Pereira, C. C. Da Cruz, A. Solomon, A. Le, M. A. Cavigelli, C. Ribeiro** // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2015. V. 54. pp. 3717–3725.
3. Long-term effects of controlled release urea application on crop yields and soil fertility under rice-oilseed rape rotation system / **J. Geng, Y. Sun, M. Zhang, C. Li, Y. Yang, Z. Liu, S. Li** // *Field. Crop. Res.* 2015. V. 184. pp. 65–73.
4. **Чебланов Н. В., Сергеев Ю. А., Солдатов А. В.** Приллированный и гранулированный карбамид: свойства и перспективы. *Евразийский химический рынок*. 2010. № 9. С. 26–33.
5. **Таран Ю. А., Фуфаева В. М., Разина Н. Д.** Энерго- и ресурсосбережение при производстве и применении удобрений пролонгированного действия // *Энергосбережение – теория и практика: Труды Одиннадцатой Всероссийской конференции с Международным участием «Энергосбережение – теория и практика» (Москва, 10-14 октября 2022 г.)* М. : ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2022. С. 354–357.
6. **Purnomo C. W., Saputra H.** Manufacturing of slow and controlled release fertilizer // *Controlled release fertilizers for sustainable agriculture*. 2021. pp. 95–110.
7. **Таран Ю. А., Фуфаева В. М., Разин С. А.** Повышение эффективности применения минеральных удобрений методом капсулирования с целью достижения пролонгированного действия // *Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума, посвященного 110-летию А.Н. Плановского, в рамках Третьего Международного Косыгинского форума «Современные задачи инженерных наук»*. М. : 2021. С. 300–302.
8. **Taran Yu. A., Fufaeva V. M.** Production of encapsulated controlled-release fertilizers based on prilled and granular urea // *Chemical and Petroleum Engineering*. V. 58. № 5-6. pp. 499–504.

УДК 66.048.3-932.2

Геннадий Алексеевич Носов, доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химических технологий имени Н. И. Гельперина», nosovga@mail.ru

Михаил Евгеньевич Уваров, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Процессы и аппараты химических технологий имени Н. И. Гельперина», uvamikhail@yandex.ru

Дарья Сергеевна Степанова, студентка, dasha-stepasha21@yandex.ru

МИРЭА – Российский технологический университет

(Институт тонких химических технологий имени М. В. Ломоносова)», Россия, г. Москва

Энергосберегающие варианты процесса ректификации с использованием компрессионных тепловых насосов

***Аннотация.** Рассмотрен процесс разделения бинарных смесей методом ректификации с использованием парокомпрессионных тепловых насосов открытого типа. При этом проанализировано влияние технологических параметров на энергетические показатели разделения. Показано, что применение тепловых насосов позволяет существенно снизить энергетические затраты на процесс разделения. Отмечается, что установки с открытым тепловым насосом более эффективны аналогичных установок с тепловыми насосами закрытого типа.*

***Ключевые слова:** бинарные смеси, дистилляция, ректификация, энергетические затраты, тепловые насосы.*

Gennady A. Nosov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor of the Department of Processes and Devices of Chemical Technologies named after N. I. Gelperin, nosovga@mail.ru

Mikhail E. Uvarov, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department of Processes and Apparatuses of Chemical Technologies named after N. I. Gelperin, uvamikhail@yandex.ru

Darya S. Stepanova, Student, dasha-stepasha21@yandex.ru

MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Russia, Moscow

Energy saving options of rectification process with the use of compression heat pumps

***Abstract.** The process of separation of binary mixtures by rectification using open-type compression heat pumps is considered. The influence of technological parameters on the energy parameters of separation is analyzed. It is shown that the use of heat pumps can significantly reduce the energy costs of the separation process. It is shown that installations with an open heat pump are more efficient than installations with closed-type heat pumps.*

***Keywords:** binary mixtures, distillation, rectification, energy costs, heat pumps.*

Ректификация является одним из энергозатратных процессов химической технологии [1–3]. Повысить ее энергоэффективность можно используя различные тепловые насосы [4–7]. Чаще всего при осуществлении данного процесса применяются парокомпрессионные тепловые насосы открытого и закрытого типов [5–8]. В установках закрытого типа в качестве «рабочего тела» используется промежуточный теплоноситель, который циркулирует в замкнутом контуре. В установках с применением открытых тепловых насосов рабочим телом могут быть пары дистиллята или же кубовая жидкость [5]. Имеется целый ряд схем, в которых в качестве рабочего тела используются пары разделяемой смеси или жидкие фрак-

ции, отбираемые с промежуточных тарелок ректификационных колонн [8]. К сожалению, информации об энергетической эффективности указанных выше процессов в доступной литературе мало.

Целью данных исследований был сравнительный анализ вариантов процесса ректификации с применением тепловых насосов открытого и закрытого типа.

На рисунке 1а приведена принципиальная схема ректификационной установки с тепловым насосом открытого типа, установленным на линии верхнего продукта. Как и в обычном процессе ректификации (без применения ТН) исходная смесь L_1 с концентрацией легколетучего компонента x_1 подается на одну из промежуточных тарелок. Пары, выходящие из ректификационной колонны РК и обогащенные низкокипящим компонентом, сжимаются в компрессоре ТК от давления p_1 до давления p_2 , после чего поступают на обогрев кипятильника Т в качестве теплоносителя. Далее сконденсированный поток дистиллята проходит через дроссельный вентиль ДВ, а затем часть его возвращается в ректификационную колонну в виде флегмы Π_1 . Другая его часть Π_2 отводится в качестве одного из продуктов разделения. В данной схеме отпадает необходимость установки конденсатора паров дистиллята, так как они конденсируются в кипятильнике Т, отдавая тепловую энергию. Поскольку довольно часто количество тепла, выделяющегося при конденсации сжатых паров Q_{DC} , может не совпадать с расходом тепла Q_K , необходимого для испарения смеси в кипятильнике Т, в схеме предусмотрен компенсирующий теплообменник ТК. В случае, когда $Q_{DC} < Q_K$, в теплообменник ТК подается некоторое количество греющего пара. При обратной ситуации, когда $Q_{DC} > Q_K$, в теплообменник подается охлаждающая вода.

Принципиальная схема ректификационной установки с использованием теплового насоса закрытого типа приведена на рисунок 1б.

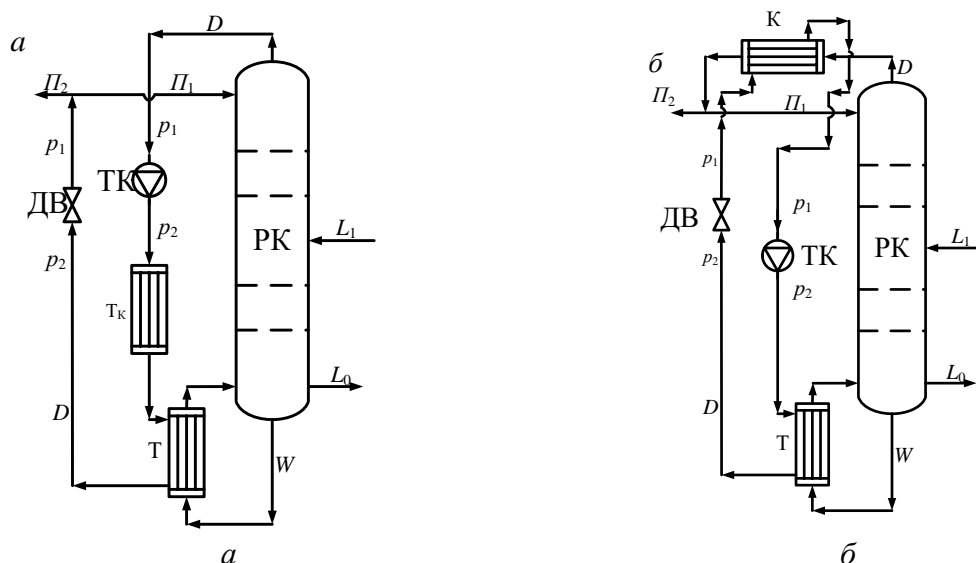


Рисунок 1 – Принципиальные схемы процесса ректификации с применением теплового насоса открытого (а) и закрытого (б) типов

Анализ процесса ректификации с применением тепловых насосов нами был выполнен на примере разделения бинарных семей «вода – уксусная кислота» и «вода – диметилформамид». В обеих этих смесях в качестве легколетучего компонента выступает вода. При этом для смеси вода – уксусная кислота среднее значение коэффициента относительной летучести составляет $\alpha = 1,67$, а для смеси вода – диметилформамид $\alpha = 3,93$. Было также принято, что процесс ректификации проводится при атмосферном давлении p_1 . Производительность установки по исходной смеси составляла $L_1 = 2000$ кг/ч. При использовании закрытого

теплового насоса (рисунок 1б) в качестве промежуточного теплоносителя (рабочего тела) использовалась вода.

Для характеристики процесса разделения ректификационных установок с тепловыми насосами мы использовали коэффициент преобразования энергии [5]

$$\varepsilon_0 = \frac{Q_{\text{кип}}}{N_D}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{кип}}$ – затраты тепловой энергии на испарение смесей в кубе ректификационной колонны; N_D – затраты энергии на работу компрессора.

Величину $Q_{\text{кип}}$ устанавливали из теплового баланса процесса ректификации [3]. В случае применения теплового насоса открытого типа расход энергии на сжатие паров дистиллята компрессором составляет

$$N_D = \frac{D(t_2 - t_1)}{\eta}, \quad (2)$$

где i_1 и i_2 – энтальпии исходных и сжатых паров дистиллята; η – коэффициент полезного действия компрессора.

Как известно, энтальпии паров зависят от давления. При анализе рассматриваемых процессов значение i_1 соответствовало атмосферному давлению. Давление сжатых паров дистиллята p_2 выбирали с таким расчетом, чтобы в кипятильнике ректификационной колонны обеспечивался необходимый перепад температуры (порядка 10 °C). Зная значение p_2 , устанавливали соответствующее значение i_2 .

Мощность компрессора закрытого теплового насоса составляет

$$N_D = \frac{G(t_2 - t_1)}{\eta}, \quad (3)$$

где G – расход промежуточного теплоносителя; i_1 и i_2 – энтальпии паров теплоносителя до компрессора и после него.

Расчеты процесса ректификации показали, что с увеличением концентрации легколетучего компонента (воды) в исходной смеси a_1 возрастают нагрузки на кипятильник $Q_{\text{кип}}$ и конденсатор Q_D , как для смеси вода-уксусная кислота, так и для смеси вода-ДМФА. Это связано с тем, что телота испарения (конденсации) воды существенно выше, чем у уксусной кислоты и диметилформамида. Поэтому увеличение ее содержания в исходной смеси вызывает повышение значений $Q_{\text{кип}}$ и Q_D . При этом значения тепловых потоков $Q_{\text{кип}}$ и Q_D для системы вода-ДМФА существенно ниже, чем для системы вода-УК. Это объясняется различием физико-химических свойств данных систем, а также более высокими значениями R для системы вода-УК, чем для системы вода-ДМФА. Следует отметить, что величина коэффициента относительной летучести для системы вода-ДМФА примерно в 2 раза выше, чем для системы вода-УК.

Зависимость мощности компрессора теплового насоса открытого типа N_D от состава исходных смесей a_1 показано на рисунке 2. С повышением содержания воды в исходной смеси для обеих смесей затраты энергии на сжатие паров дистиллята возрастают. Это связано с тем, что с увеличением концентрации a_1 возрастает количество сжимаемых паров D . При этом мощность компрессора при разделении смеси вода-уксусная кислота существенно выше, чем для системы вода-диметилформамид. Примерно аналогичная же картина наблюдается при использовании теплового насоса закрытого типа.

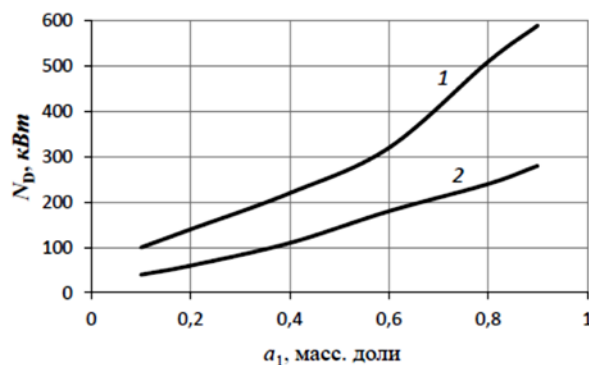


Рисунок 2 – Влияние состава исходной смеси a_1 на мощность компрессора ND:

1 – система H₂O-УК; 2 – система H₂O-ДМФА

Проведенные расчеты показали, что при использовании теплового насоса открытого типа для смеси вода-УК величина ε_0 составляла порядка 8,4, а для смеси вода-ДМФА $\varepsilon_0 = 6$. При этом значение коэффициента преобразования энергии ε_0 для рассматриваемых смесей практически не зависит от их исходных концентраций a_1 . Последнее объясняется тем, что при изменении значений a_1 происходит пропорциональное изменение величин D , N_D и $Q_{\text{куб}}$.

Примерно аналогичная же картина наблюдается и при использовании теплового насоса закрытого типа. При этом значения коэффициентов преобразования для закрытого теплового насоса оказались несколько (на 7÷8 %) ниже, чем при использовании открытого теплового насоса.

Анализ литературных данных показал также, что с уменьшением коэффициента относительной летучести разделяемых смесей эффективность использования тепловых насосов возрастает.

Библиографический список

1. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. М. : Химия, 1981. 812 с.
2. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: Издание шестое. М. : Альянс, 2004. 750 с.
3. Айнштейн В. Г., Захаров М. К., Носов Г. А., и др. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. М.: Телевинк, 2015, 1760 с.
4. Рей Д. А., Макмайл Д. Тепловые насосы. М.: Энергоиздат, 1982, 220 с.
5. Янговский Е. И., Левин Л. А. Промышленные тепловые насосы. М.: Энергоиздат, 1989, 128 с.
6. Захаров М. К., Носов Г. А., Айнштейн В. Г. Тепловые насосы в тепло- и массообменных процессах. // Химическая технология, 2001, № 10, С. 38-47.
7. Разделение смесей путем сочетания процессов дистилляции, ректификации, и фракционной кристаллизации с использованием тепловых насосов / Г. А. Носов, В. С. Жильцов, Д. С. Яковлев, М. В. Михайлов // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 105-летию со дня рождения А. Н. Плановского. 2016. С. 325–328.
8. Справочник химика 21. Ректификация тепловым насосом.2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.chem21.info/info/332706/>.

УДК 62-71

Николай Александрович Шевкун, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, energo-shevkun@rgau-msha.ru

Владимир Александрович Шевкун, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, vladimirshevkun@yandex.ru

Наталья Георгиевна Кожевникова, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, energo-ngk@rgau-msha.ru

Александр Владимирович Драный, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, energo-dranuy@rgau-msha.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Россия, г. Москва

Анализ применимости систем охлаждения воздуха в производственных помещениях

***Аннотация.** Температурные режимы в производственных помещениях для содержания животных оказывают существенное влияние на их состояние. Особенно это актуально в летний период. С целью выявления оптимального технического решения для эффективного снижения и поддержания температуры в необходимом диапазоне был проведен анализ систем охлаждения воздуха. На основании проведенного анализа систем охлаждения и эффективности их функционирования установлено, что наиболее эффективны системы водоиспарительного охлаждения с орошаемыми слоями.*

***Ключевые слова:** вентиляция, микроклимат, рекуперация тепла, теплоутилизационные установки.*

Nikolay A. Shevkun, Ph. D. of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Heat Engineering, Hydraulics and Power Supply of Enterprises

Vladimir A. Shevkun, Ph. D. of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Heat Engineering, Hydraulics and Power Supply of Enterprises

Natalia G. Kozhevnikova, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Heat Engineering, Hydraulics and Power Supply of Enterprises

Alexander V. Draniy, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Heat Engineering, Hydraulics and Power Supply of Enterprises

Russian Timiryazev State Agrarian University, Russia, Moscow

Analysis of the applicability of air cooling systems in industrial premises

***Abstract** Temperature conditions in production rooms for keeping animals have a significant impact on their condition. This is especially true in the summer. In order to identify the optimal technical solution for effective temperature reduction and maintenance in the required range, air cooling systems were analyzed. Based on the analysis of the cooling systems and their efficiency, it was found that the most effective water evaporation cooling systems with irrigated layers are.*

***Keywords:** ventilation, microclimate, heat recovery, heat recovery plants.*

Микроклимат - совокупность физических и химических факторов воздушной среды. Важными физическими факторами являются температура, относительная влажность, скорость движения воздуха.

Особое внимание заслуживает температура воздуха в производственных помещениях для содержания животных [1, 2]. Колебания температурных режимов ниже или выше оптимальных значений серьезно сказываются на состоянии животных. Исследования, проведенные отечественными и зарубежными учеными, показали, что превышение температуры выше нормативной приводят к ухудшению качества воздуха, а так же неблагоприятно сказывается на состоянии животных [3], в частности снижаются среднесуточные приросты, ухудшается репродуктивность, увеличивается падеж. Поэтому поддерживать температурные режимы, особенно в летний период, при отлаженной системе регулирования микроклимата [4] является важным.

Охладить воздух в животноводческих помещениях возможно посредством парокомпрессионных холодильных установок или систем водоиспарительного охлаждения. В животноводстве парокомпрессионные установки применяются крайне редко [5] и их применимость возможно, когда нет альтернативных вариантов для охлаждения воздуха. Кроме этого данный тип установок более сложен конструктивно, требует существенных финансовых затрат на эксплуатацию и обслуживание. Проведенные исследования использования парокомпрессионных установок в свиноводстве для Европейской части России [6] показали, что их применение может привести к увеличению себестоимости продукции до 26 %.

В системах водоиспарительного охлаждения охлаждение воздуха происходит за счет испарения воды с обдуваемых поверхностей или распыла воды в воздушный поток. Взаимодействие охлаждаемого воздуха с водой может происходить в оросительных камерах, кассетах смоченных водой, или при распыле воды в воздушные потоки внутри производственных помещений (рисунок 1).

Системы водоиспарительного охлаждения в сравнении с парокомпрессионными установками значительно проще и менее требовательны к обслуживанию.



Рисунок 1 – Классификация систем водоиспарительного охлаждения

В распылительных системах распыл жидкости обеспечивается за счет центробежных сил, эжекции, ультразвука или посредством форсунок низкого или высокого давления [6]. В оросительных камерах распыл охлаждающей воды осуществляется форсунками.

Сравнивая различные способы распыла жидкости следует отметить их функциональные особенности. Центробежные распылители обеспечивают дробление капель в пределах 20...60 мкм и позволяют понизить температуру воздуха на 4...8 °С. К недостаткам можно отнести высокое энергопотребление и уровень шума, образование дождевого дискомфорта для животных вследствие образования мелких капель. Ультразвуковые распылители созда-

ют мелкодисперсный туман с размером капель 1...5 мкм. Однако из-за воздействия ультразвуковых колебаний на животных широкого применения в животноводстве не нашли.

Эжекционные системы обеспечивают распыл воды через распылительные головки за счет подачи воздуха [7, 8] под высоким давлением, который осуществляет дробление капель воды до мелкодисперсного состояния. Недостатком системы является шум от работы компрессора, обеспечивающего функционирование системы, и высокие требования к качеству распыляемой воды. Форсуночный распыл обеспечивает снижение температуры приточного воздуха на 3...5 °С, дробление капель охлаждающей воды в пределах 0,5...0,15 мкм.

В системах водоиспарительного охлаждения с орошаемыми слоями применяют орошаемые кассеты или панели. Кассеты и панели бывают целлюлозно-бумажные или полимерные. Преимуществом полимеров является возможность их промывки под высоким давлением. Недостаток - низкая охлаждающая способностью по сравнению с целлюлозно-бумажными из-за худшей смачиваемой способности полимерной поверхности [6].

Исследования по сравнительной оценке систем охлаждения при условии абсолютности потенциальных возможностей по охлаждению и условия равенства воздухообменов по удалению избытков теплоты и влаги [5] показывает (таблица 1), что среди систем водоиспарительного охлаждения системы с орошаемыми поверхностями обеспечивают максимальное снижение температуры приточного воздуха. Они же наиболее эффективны с энергетической точки зрения.

Таблица 1 – Анализ эффективности систем охлаждения

Наименование показателя	Форсунки низкого давления	Форсунки высокого давления	Орошаемые панели	Центробежный охладитель	Орошаемые модули	Эжекционные
Эффективное снижение температуры приточного воздуха, °С	1	3	15	6	8	4,5
Холодопроизводительность системы, кВт	34,2	102,6	424,9	170,0	226,6	127,5
Удельное энергопотребление на 1000 м ³ /ч воздуха, Вт	1,8	5,0	3,3	90,9	68,8	179,9

Исходя из выше изложенного, следует отметить, что применение систем водоиспарительного охлаждения основанного на охлаждении воздуха посредством орошаемых панелей является наиболее перспективным для понижения температуры приточного воздуха в животноводческих помещениях. Водоиспарительные системы, эксплуатирующие орошаемые панели на основе полимерных материалов, требуют дополнительного изучения с целью повышения качественных показателей их функционирования.

Библиографический список

1. Рекуперативная установка с системой корректирования направления вектора потока приточного воздуха / И.Ю. Игнаткин, А.В. Архипцев, Н.А. Шевкун, Е.А. Овсянникова, В.А. Шевкун, О.М. Мельников // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 183. С. 1–11.
2. Игнаткин И. Ю., Архипцев А. В., Шевкун Н. А., Скороходов Д. М., Овсянникова Е. А. Компактная теплоутилизационная установка Патент на полезную модель 214992 U1, 23.11.2022. Заявка № 2022126567 от 12.10.2022.
3. Ильин И. В., Курячий М. Г., Игнаткин И. Ю. Влияние параметров микроклимата на продуктивность свиней // Перспективное свиноводство: теория и практика. 2011. № 3. С. 21–25.

4. **Игнаткин И. Ю., Курячий М. Г.** Системы вентиляции и влияние параметров микроклимата на продуктивность свиней // Вестник НГИЭИ. 2012. № 10(17). С. 16–34.
5. **Shevkun N., Ignatkin, I., Kazantsev S., Skorokhodov D., Serov N., Alipichev A., Panchenko V.** Developing and Testing the Air Cooling System of a Combined Climate Control Unit Used in Pig Farming. Agriculture 13, 334. (2023) <https://doi.org/10.3390/agriculture1302033>
6. **Новиков Н. Н., Кольчик И. Е.** Сравнительная характеристика технических решений водоиспарительных систем кондиционирования воздуха животноводческих помещений // Техника и технологии в животноводстве. 2020. № 3(39). С. 65–73.
7. Анализ характера распределения основных параметров воздушного потока в воздуховодах / **Н. Г. Кожевникова, Н. А. Шевкун, А. В. Драный, А. А. Цымбал, Е.И. Трубилин, В. И. Коновалов** // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 161. С. 282–289.
8. Анализ распределения давления в воздушном потоке по длине воздуховода / **Н. Г. Кожевникова, Н. А. Шевкун, А. В. Драный, А. А. Цымбал** // Сборник научных трудов Седьмой Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения Академика А. В. Лыкова. 2020. С. 282–286.

УДК 699.812.3

Михаил Геннадьевич Ермоченков, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры ЛТ5 «Проектирование объектов лесного комплекса», ermochenkov@mgul.ac.ru
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
(Мытищинский филиал), Россия, г. Мытищи

Светлана Андреевна Белых, кандидат технических наук, доцент, зав. базовой кафедрой «Строительные материаловедения и технология», smit1@brstu.ru

Юлия Владимировна Новоселова, кандидат технических наук, доцент базовой кафедры «Строительные материаловедения и технология», zaika21@mail.ru
Братский государственный университет», Россия, г. Братск

Результаты термического анализа антипирена на основе жидкого стекла

Аннотация. В статье приведены результаты термического анализа процессов, протекающих в разработанной композиции на основе натриевого жидкого стекла и кварца углеродистого с добавкой поверхностно-активного вещества. Представлены результаты термогравиметрических исследований, дифференциальной сканирующей калориметрии и газового анализа продуктов деструкции. Выявлена многостадийность протекающих процессов, получены кинетические параметры отдельных стадий. Проведен газовый анализ состава продуктов термодеструкции материала и установлена связь концентраций отдельных газов с отдельными стадиями процесса.

Ключевые слова: антипирен, защита древесины, термическая деструкция, термический анализ.

Mikhail G. Ermochenkov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Associate Professor, Professor, ermochenkov@mgul.ac.ru

Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch), Russia, Mytishchi

Svetlana A. Belykh, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor Basic Department of Building Materials Science and Technology, smit1@brstu.ru

Yulia V. Novoselova, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor Basic Department of Construction Materials Science and Technology, zaika21@mail.ru

Bratsk State University, Russia, Bratsk

Results of thermal analysis of liquid glass-based antipyrine

Abstract. The article presents the results of thermal analysis of the processes occurring in the developed composition based on sodium liquid glass and carbon quartz with the addition of a surfactant. The results of thermogravimetric studies, differential scanning calorimetry and gas analysis of destruction products are presented. The multistage nature of the ongoing processes is revealed, the kinetic parameters of individual stages are obtained. A gas analysis of the composition of the thermal degradation products of the material was carried out and the relationship of the concentrations of individual gases with individual stages of the process was established.

Keywords: flame retardant, wood protection, thermal destruction, thermal analysis.

Цель

Древесина широко-распространенный в природе материал. Она используется для производства конструкционных и отделочных строительных материалов. Это обусловлено

тем, что древесина обладает высокой механической прочностью, экологической чистотой, химической стойкостью, высокими декоративными свойствами и др. Однако, наряду с этим у древесины имеются и недостатки. Одним из них является пожарная опасность материалов и конструкций из древесины. Это приводит к необходимости применять специальные средства для снижения скорости распространения пламени, воспламеняемости и горючести материалов.

Одним из направлений решения данной проблемы является покрытие деревянных поверхностей и конструкций специальными составами, препятствующими воспламенению древесины и снижающими скорость распространения пламени по поверхности – антипиренами [1–4, 6].

Нагрев древесины приводит к ее термической деструкции с выделением газофазных продуктов. При достижении на поверхности концентраций газовых продуктов деструкции и кислорода определенных пределов и нагреве их до температуры воспламенения происходит возгорание. Таким образом, к уменьшению воспламеняемости материала приводят снижение теплового потока в защищаемую поверхность, ее температуры и, как следствие, скорости термической деструкции. Снижение скорости термодеструкции древесины приводит к уменьшению концентрации газовых горючих продуктов деструкции на поверхности материала. В свою очередь, антипирены при нагреве также подвергаются термической деструкции с выделением газофазных продуктов, которые не являются горючими и, выделяясь на поверхности, способствуют снижению концентрации газовых горючих компонентов.

В настоящее время одним из перспективных направлений разработки новых антипиренов являются огнезащитные композиции на основе вспучивающихся компонентов [5, 9].

Методы

Процессы, протекающие в антипирене при тепловом воздействии, можно описать системой дифференциальных уравнений, включающую [7] уравнение переноса теплоты, уравнение изменения массы в твердой фазе, **уравнение переноса массы в газовой фазе. Все эти уравнения включают члены, описывающие внутренние источники теплоты и массы за счет протекания в слое антипирена физико-химических процессов. Для описания этих источников используется уравнение Аррениуса для многостадийного процесса [8, 10]:**

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \sum_{\gamma} \omega_{0,\gamma} A_{\gamma} \exp\left(-\frac{E_{\gamma}}{RT}\right), \quad (1)$$

где ω – безразмерная масса; ω_0 – безразмерная начальная масса стадии; A – частотный фактор стадии, с^{-1} ; E – энергия активации, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, моль/(кг·К); T – температура, К.

Для определения кинетических параметров многостадийных процессов, протекающих в слое антипирена при тепловом воздействии, были проведены термогравиметрические (TG) исследования с одновременной дифференциальной сканирующей калориметрией (DSC).

Результаты

Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунке 1.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что процессы, протекающие в материале, являются многостадийными. Отдельной стадией будем считать единичную простую реакцию. Будем полагать протекающие реакции независимыми и параллельными. Исследуемый материал является многокомпонентным.

Метод и алгоритм выделения отдельных стадий и расчета соответствующих кинетических параметров изложены в [8, 10].

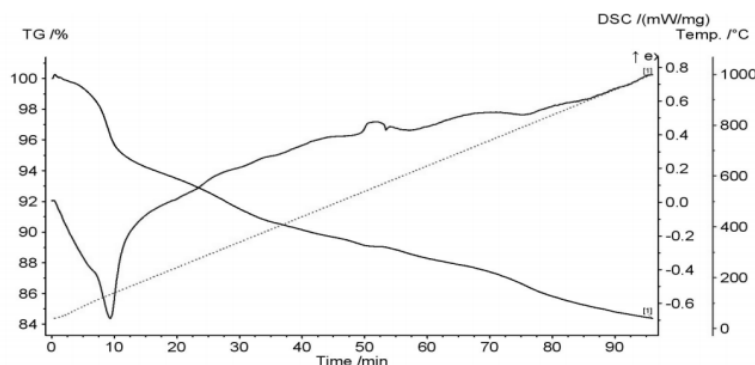


Рисунок 1 – Результаты совместных TG и DSC исследований антипирена

В таблице 1 представлены кинетические параметры отдельных стадий термодеструкции антипирена, полученные при обработке экспериментальных данных.

Таблица 1 – Результаты термогравиметрического анализа антипирена

Антипирен	Номер стадии	Температура максимума скорости стадии, T_{max} , К	Температура начала стадии, $T_{нач}$, К	Температура конца стадии, $T_{кон}$, К	Начальная относительная масса стадии, ω_0	Энергия активации, E/R , К	Частотный фактор, A , c^{-1}
Жидкое стекло + кварц углеродистый	1	398	319	445	0,233	6035	$2,275 \cdot 10^4$
	2	413	–	490	0,325	4016	64,88
	3	523	333	671	0,233	3476	1,6415
	4	678	460	835	0,048	5482	6,284
	5	903	860	920	0,009	79866	$5,2 \cdot 1036$
	6	973	795	1070	0,147	16991	$1,164 \cdot 105$
	7	988	950	1005	0,004	95524	$1,466 \cdot 1040$

На рисунке 2 приведены результаты сравнения потери относительной массы образца, полученной расчетным путем и при проведении термогравиметрических исследований. Анализ приведенных данных позволяет сделать вывод о том, что приведенная модель адекватно описывает физико-химические процессы, протекающие в защитном слое при тепловом воздействии.

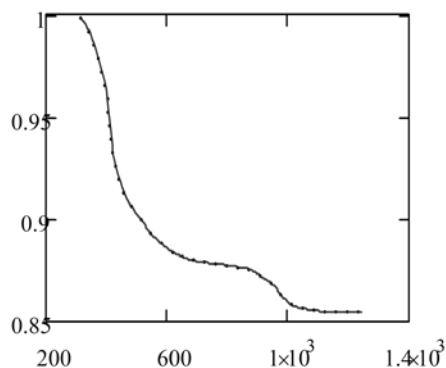


Рисунок 2 – График изменения относительной массы образца антипирена по времени:

• • • – экспериментальные значения; — – расчетные значения

На рисунке 3 приведены графики зависимости от температуры скорости изменения относительных масс образца антипирена и отдельных стадий процесса.

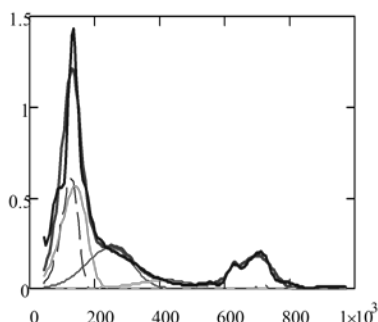


Рисунок 3 – График изменения скорости убыли относительной массы образца антипирена по времени:

— — экспериментальные значения, производные расчетных значений изменения относительных масс отдельных стадий: — — — 1-й стадии; — — — 2-й стадии; — — — 3-й стадии; — — — 4-й стадии; — — — 5-й стадии; — — — 6-й стадии; — · — 7-й стадии; — — — сумма производных отдельных стадий

Анализ результатов термогравиметрических исследований и термогазового анализа позволяет сделать следующие выводы: вода, присутствующая в антипирене в связанном виде, выделяется при протекании 1-й, 2-й и 3-й стадий термической деструкции. На них приходится более 40 % уносимой массы. Это хорошо коррелируется с результатами ДСК, приведенными на рисунке 4. При температурах выше 300 °C заметного уноса влаги не наблюдается.

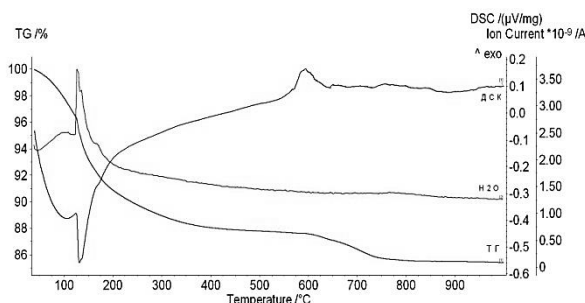


Рисунок 4 – Термограммы антипирена, отражающие тепловые эффекты с выделением H₂O

На рисунке 5 приведены результаты газового анализа продуктов деструкции антипирена на содержание CO₂ и SO₂. Сравнение с результатами ТГА показывает, что пики выделения двуокиси углерода приходятся на 5-ю и 6-ю стадии термической деструкции. Изменение массы на этих стадиях соответствует 15 % уносимой массы. Пик выделения SO₂ находится в интервале 550...620 °C и по массе не превышает 1 % от уносимой массы.

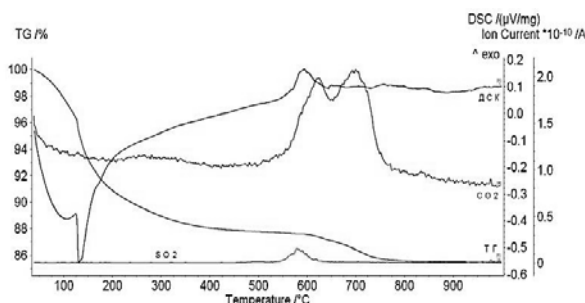


Рисунок 5 – Термограммы антипирена, отражающие тепловые эффекты с выделением CO₂, SO₂

Выводы

Таким образом, в результате проведенного термического анализа установлено, что термическая деструкция антипирена на основе жидкого стекла с кварцем углеродистым является многостадийным процессом. После обработки результатов термогравиметрических экспериментов были получены кинетические параметры и относительные массы отдельных стадий термодеструкции. Установлена связь концентраций паров влаги, двуокиси углерода и серы в продуктах деструкции с отдельными стадиями процесса.

Полученная информация позволяет рассчитывать источники теплоты и массы при математическом моделировании процессов, протекающих в защитном слое при тепловом воздействии, рассчитывать концентрации горючих процессов деструкции древесины и кислорода на поверхности материала.

Библиографический список

1. **Белых С. А., Новоселова Ю. В., Кудяков А. И.** Жидкое стекло из микрокремнезема в качестве связующего при получении огнезащитной композиции для древесины // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 4(32). С. 154–160.
2. **Белых С.А., Новоселова Ю.В.** Особенности получения огнезащитного покрытия для древесины на основе жидкого стекла // Молодая мысль: наука, технологии, инновации: материалы VI(XII) Всероссийской научно-технической конференции. Братск: Изд-во БрГУ, 2014. С. 15–17.
3. **Белых С. А., Новоселова Ю. В., Новоселов Д. А.** Обеспечение оптимальной вязкости жидкостекольных композиций для защиты древесины от возгорания // Молодая мысль: наука, технологии, инновации: материалы X(XVI) Всероссийской научно-технической конференции. Братск : Изд-во БрГУ, 2018. С. 94–98.
4. **Белых С. А., Новоселова Ю. В.** Оптимизация составов сырьевой смеси при получении огнезащитного покрытия для древесины на основе жидкого стекла и местных сырьевых ресурсов // Труды Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. Братск : Изд-во БрГУ, 2014. С. 87–94.
5. **Енджиевская И. Г., Василовская Н. Г., Слакова О. В.** Составы для огнезащитных покрытий на основе вспученного вермикулита татарского месторождения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 1. С. 117–122.
6. **Еремина Н. В., Аввакумов Е. Г., Зелинский В. Ю.** Жидкостекольная огнезащитная композиция на основе механически активированного глинозема // Стекло и керамика. 2005. Т.2. С. 28–30.
7. **Ермоченков М. Г., Семенов Ю. П.** Математическое моделирование процессов, протекающих в древесине при термическом модифицировании // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. М. : Изд-во Москов. гос. ун-та леса, 2012. № 4(87). С. 92–97.
8. **Ермоченков М. Г.** Кинетика термической деструкции древесины в среде инертных газов // Лесотехнический журнал. Научный журнал. Воронеж : Изд-во Воронежского ун-та, 2016. Т.6, № 4(24). С. 168–173.
9. Растворы силиката натрия, как связующее, в термоогнестойких вспучивающихся композициях строительного назначения / И. С. Суровцев, Т. Д. Никулина, В. А. Поляков, О. Б. Рудаков // Научный Вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Воронеж, 2012. Т.1. С. 47–49.
10. **Шведов Б. А.** Энерго- и массообмен в материалах тепловой защиты многоразовых ракетно-космических систем : дис. ... доктора технических наук / Б. А. Шведов. М. : МЛТИ, 1990. 542 с.

УДК 631.365.22

Артём Сергеевич Ключников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерно-интегрированное машиностроение», artik8487@mail.ru

Егор Николаевич Балтаев, магистрант, baltaeven.17@edu.ystu.ru

Антон Александрович Сопов, магистрант, sopovaa.17@edu.ystu.ru

Ярославский государственный технический университет, Россия, г. Ярославль

Хозяйственное испытание зерносушилки Strahl 2500 FR

Аннотация. Показаны результаты хозяйственного испытания зерносушилки шахтного типа Strahl 2500 FR, которая пользуется значительным спросом у российских сельхозтоваропроизводителей. Паспортная производительность сушилки составляет 24,4 плановых тоны в час. По результатам испытаний производительность сушилки составила 14,9 плановых тоны в час, расход топлива (природного газа) на одну тонну готового продукта составил 10,0 метров кубических. Удельные затраты тепловой энергии составили 5048,5 кДж на один килограмм удаленной влаги. Отклонения у готового продукта по температуре не превышали 0,5 °С, по влажности 0,5 %.

Ключевые слова: сушка зерна, шахтная зерносушилка, производительность зерносушилки, энергозатраты на сушку.

Artem S. Kliuchnikov, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Computer-Integrated Mechanical Engineering, artik8487@mail.ru

Egor N. Baltaev, Master's Degree, baltaeven.17@edu.ystu.ru

Anton A. Sopov, Master's Degree, sopovaa.17@edu.ystu.ru

Yaroslavl State Technical University, Russia, Yaroslavl

Production test of the Strahl 2500 FR grain dryer

Abstract. The results of an economic test of the mine-type grain dryer Strahl 2500 FR, which is in great demand among Russian agricultural producers, are shown. Passport capacity of the dryer is 24.4 planned tons per hour. According to the test results, the productivity of the dryer was 14.9 planned tons per hour, the fuel (natural gas) consumption per ton of the finished product was 10.0 cubic meters. Specific costs of thermal energy amounted to 5048.5 kJ per kilogram of removed moisture. The deviations of the finished product in temperature did not exceed 0,5°C, in humidity 0,5%.

Keywords: grain drying, mine grain dryer, grain dryer productivity, energy consumption for drying.

Зерносушилки шахтного типа широко распространены в России. Их применяют практически во всех регионах на сушке предварительно очищенного зернового вороха зерновых, зернобобовых и масличных культур. Главное требование к обрабатываемому материалу – это хорошая сыпучесть. Большинство шахтных сушилок имеют сушильные камеры прямоугольного сечения по горизонтали, которые оборудованы коробами, для подвода сушильного агента и отвода отработавшего сушильного агента. Наличие коробов позволяет уменьшить аэродинамическое сопротивление и устранить его неблагоприятное влияние на равномерность процесса сушки [1]. Основными конструктивными различиями как правило являются форма и шаг расстановки коробов, а также исполнение устройства выгрузки шахты [2]. В отношении технологии производства сушки бывают установки с рециркуляцией

сушильного агента или без нее, а также с подачей сушильного агента под давлением или путем создания разрежения в отводящем диффузоре; с рециркуляцией сушильного агента или без нее [3].

К наиболее важным показателям при выборе зерносушильного оборудования можно отнести затраты энергии на процесс сушки и качество получаемого продукта [4, 5].

Зерносушильное оборудование фирмы Strahl пользуется значительным спросом у отечественных сельхозтоваропроизводителей. Среди прочих, наибольшее распространение получили сушилки шахтного типа серии FR. По нашему мнению, связано это, прежде всего, с высокими показателями качества высушенного продукта и, как заверяет производитель, относительно низкими затратами энергии на процесс удаления влаги.

В Ярославской области, одним из передовых хозяйств (ООО «Красный маяк») в 2019 году была запущена в эксплуатацию сушилка Strahl 2500 FR. Руководством предприятия была поставлена задача провести хозяйственное испытание данной зерносушилки с целью определения расхода энергоносителей на производство сушки в условиях хозяйства, соответствия технологического процесса агротехническим требованиям и фактической производительности.

Сушилка Strahl 2500 FR паспортной производительностью 24,4 т/ч имеет следующие конструктивные особенности. Сушильная камера, а также диффузоры для подвода и отвода сушильного агента изготовлены из коррозионно-устойчивого металла и теплоизолированы слоем минеральной ваты в 20 мм. Короба выполнены в виде открытой снизу пятигранной призмы и имеют неизменную площадь сечения по всей длине. Выгрузка зерна из сушильной камеры представлена качающимися клапанами с приводом от пневматического цилиндра. Подача сушильного агента к материалу осуществлена путем создания разрежения в отводящем диффузоре.

Технологическая схема сушилки представлена на рисунке 1.

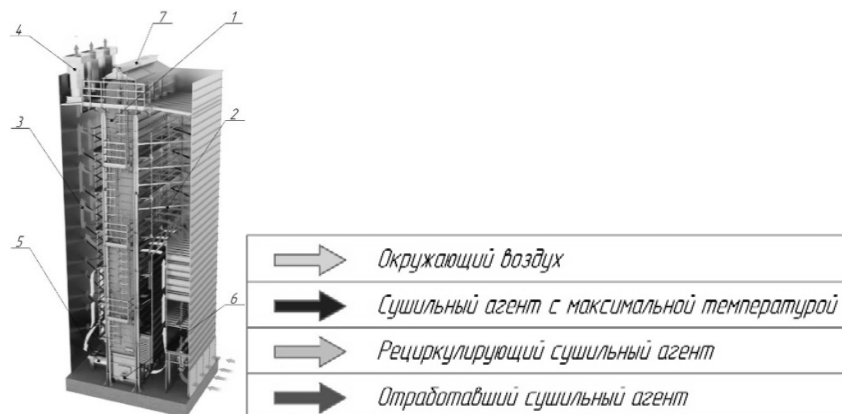


Рисунок 1 – Технологическая схема работы зерносушилки Strahl 2500 FR:

1 – сушильная камера; 2 – камера подвода сушильного агента; 3 – камера отвода сушильного агента; 4 – выхлопной вентилятор; 5 – вентилятор рециркуляции сушильного агента; 6 – выгрузной шнек; 7 – загрузочный шнек

Хозяйственное испытание сушилки Strahl 2500 FR провели на двух культурах пшеница и ячмень в соответствии с ГОСТ Р 55262-2012 «Сушильные машины и установки сельскохозяйственного назначения. Методы испытаний».

Характеристики обрабатываемого зернового вороха и показатели условий испытаний представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Характеристики зернового вороха при испытаниях сушилки Strahl 2500 FR

№ п/п	Культура	Сорт	Средняя относительная влажность вороха, %	Дисперсия по влажности	Средняя засорённость, %
1	Пшеница яровая	Сонетт	19,4	0,05	3,0
2	Ячмень яровой	Експлорер	20,1	0,06	3,2

Таблица 2 – Показатели условий испытания сушилки Strahl 2500 FR

Показатели и результаты	Значения (М±m)
Атмосферное давление, кПа	102,2±0,10
Температура наружного воздуха, °С	15,0±0,21
Влажность наружного воздуха, %	85±0,8
Масса исходного материала (пшеница), кг	66000,0±0,10
Масса исходного материала (ячмень), кг	66000,0±0,10
Температура исходного материала (пшеница), °С	21,6±0,28
Температура исходного материала (ячмень), °С	21,5±0,19

Температура сушильного агента была установлена на рекомендуемом заводом изготовителем оборудования уровне в 95 °С и поддерживалась штатной автоматикой суши. Сушку проводили согласно требований внутрикорпоративной документации до средней относительной влажности продукта 13 %. Влажность вороха определяли прибором Vile 65, температуру материала определяли термометром ртутным ТП-4Г ГОСТ 2045-71, цена деления 0,5 °С по стандартной методике. Расход топлива (природного газа) измеряли счётчиком ЕК 270, электрической энергии – электросчётчиком Меркурий-230 ART 03. Статистическую обработку данных проводили в программном пакете Statistica.

Основные результаты и выводы

Производительность сушилки по готовому продукту для пшеницы составила 12,42 т/ч (14,9 пл.т/ч), по ячменю 11,30 т/ч. Расход природного газа на одну тонну готового продукта для пшеницы составил около 10,0 м³, для ячменя 10,9 м³. Удельные затраты тепловой энергии на удаление влаги составили 5048,5 кДж/кг.уд.вл. для пшеницы и 5502,9 кДж/кг.уд.вл. для ячменя. Удельный расход электрической энергии составил для пшеницы 0,024 кВт·ч/кг уд.вл. и 0,026 кВт·ч/кг уд.вл. для ячменя. Отклонения у готового продукта по температуре не превышали 0,5 °С, по влажности 0,5 %, что соответствует агротехническим требованиям, предъявляемым к сушильным установкам для зерна.

Библиографический список

1. Мальтри В., Пётке Э., Шнайдер Б. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения. Сокр. пер. с немецк. В. М. Комиссаров, Ю. Л. Фрегер, под ред. В. Г. Евдокимова М. : Машиностроение, 1979. 525 с.
2. Жуков Н. В., Цугленок С. К., Манасян М. А. Для сравнительной характеристики зерносушилок // Хранение и переработка зерна. С. 30.
3. Андрианов Н. М., Николаенок А. В. Совершенствование системы распределения газа шахтных зерносушилок // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. 2013. Т. 2. № 71. С. 4–7.
4. Яшкин А. С., Попов В. М., Афонькина В. А. Использование плёночных электронагревателей в шахтных зерносушилках // Актуальные проблемы энергетики АПК. 2018. С. 245–247.
5. Полубояринов Н. А., Сибирина Т. Ф. Построение математической модели оптимизации процесса сушки зерна в шахтной зерносушилке // Эпоха науки. 2019. № 17. С. 101–104.

УДК 579.66+663.18

Владимир Михайлович Кочетков, начальник технологического отдела, kwm@bk.ru

Иван Сергеевич Гаганов, ведущий инженер, ivan.gaganov@yandex.ru

Владимир Владимирович Кочетков, техник-технолог, vkochetkov@bk.ru

Павел Андреевич Нюньков, генеральный директор, nyunkov.p@gibios.ru

ООО «ГИПРОБИОСИНТЕЗ», Россия, г. Москва

Обеспечение устойчивых гидродинамических режимов в струйных биореакторах с эжектором, предназначенных для культивирования метанооксиляющих бактерий

***Аннотация.** В работе рассмотрены возможные конструкционные решения, используемые для обеспечения устойчивых гидродинамических режимов в биореакторах струйного типа, оснащенных эжектором. Приведены оригинальные конструкционные и технические решения, реализованные в ферментационном оборудовании, позволяющие сократить энергозатраты при проведении процесса культивирования метанооксиляющих бактерий и обеспечить требуемую продуктивность процесса, что делает возможным применение рассмотренных биореакторов в области промышленной микробиологии.*

***Ключевые слова:** биореактор, ферментер, биомасса, белок, метанооксиляющие бактерии, *Methylococcus capsulatus*.*

Vladimir M. Kochetkov, Head of Technological Department, kwm@bk.ru

Ivan S. Gaganov, Leading Engineer, ivan.gaganov@yandex.ru

Vladimir V. Kochetkov, Process technician, vkochetkov@bk.ru

Nyunkov A. Pavel, General Director, nyunkov.p@gibios.ru

LLC "GIPROBIOSYNTHESIS", Russia, Moscow

Maintenance of stable hydrodynamic conditions in jet bioreactors with an ejector designed for the cultivation of methane-oxidizing bacteria

***Abstract.** Possible design solutions used to ensure stable hydrodynamic regimes in jet bioreactors equipped with an ejector are considered. The original design and technical solutions used in fermentation equipment allowing to reduce energy inputs during the cultivation process of methane-oxidizing bacteria and to ensure the required productivity of the process, which allows to use the considered bioreactors in the field of industrial microbiology, are presented.*

***Keywords:** bioreactor, fermentor, biomass, protein, methanotrophs, *Methylococcus capsulatus*.*

Процесс культивирования метанооксиляющих бактерий осуществляется в биореакторах, в которые обеспечивается непрерывная подача компонентов минерального питания, а также кислородсодержащего газа, представляющего собой кислородно-воздушную смесь и природного газа с требуемым содержанием метана не менее 90 % об. Для обеспечения высокой скорости роста микроорганизмов, возможной только в случае хорошего снабжения их метаном и кислородом, требуется обеспечить в биореакторе гидродинамический режим, при котором будет реализована достаточная растворимость газов в культуральной жидкости [1, с.80], и применение технических решений, которые позволят избежать коалесценции пузырей газа в активных зонах биореактора, и как следствие, уменьшения поверхности контакта фаз.

Для обеспечения вышеуказанных условий культивирования метанооксиляющих бактерий оптимальным техническим решением является использование биореакторов эжекторного типа, которые позволяют не только обеспечить эффективное насыщение культуральной жидкости газовой фазой, но и обеспечивают возврат газовой фазы из газового пространства ферментера.

Одной из наиболее распространенных проблем данного типа аппаратов является высокое газонасыщение культуральной жидкости, которая из основного рабочего объема биореактора поступает в циркуляционный контур, на всасывающую линию насосного оборудования, обеспечивающего подачу рабочей культуральной жидкости в эжектор. Наличие пузырьковой газовой фазы на входе в насос способствует изменению параметров его работы, выраженных в снижении напора, что впоследствии приводит к потерям вводимой в систему энергии. Кроме того, неравномерность потока культуральной жидкости при его повышенном газонасыщении не позволяет обеспечить стационарный гидравлический режим в биореакторе, поскольку происходит изменение скоростных режимов ввода газожидкостной смеси в аппарат.

Следует рассмотреть ряд технических решений, которые позволяют избежать попадания газовой фазы в циркуляционный контур вертикального биореактора, оснащенного эжектором. В общем можно выделить два подхода к решению проблемы – использование внутренних элементов конструкции, исключающих проскок газовой фазы на всасывающую линию насоса и использование устройств для газоотделения на самой циркуляционной линии.

В системе, разработанной ООО «ГИПРОБИОСИНТЕЗ» реализован подход, основанный на использовании внешних устройств для газоотделения, установленных на внешнем контуре циркуляции. На рисунке 1 [2, с.9] представлена схема ферментационной установки, включающая три позиции емкостного оборудования: биореактор, газоотделитель и накопительную емкость. На циркуляционном контуре системы установлен центробежный насос, обеспечивающий подачу рабочей культуральной жидкости в эжектор, где происходит смешение с ней циркулирующей газовой фазы и подача газожидкостной смеси в биореактор. Для исключения попадания газовой фазы в насосное оборудование на циркуляционной линии установлен газоотделитель, в котором происходит дегазирование культуральной жидкости с последующим выходом ее на всасывающую линию насоса.

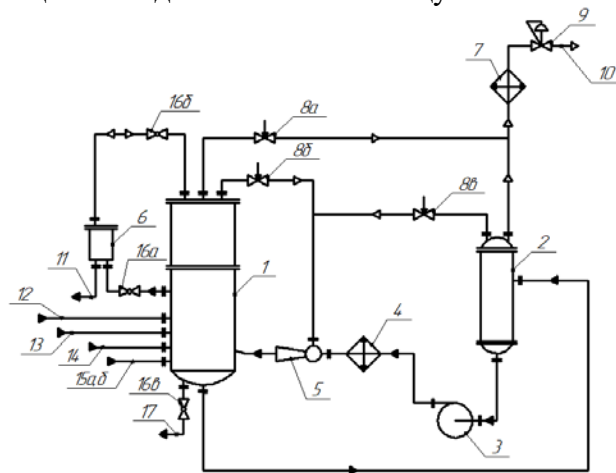


Рисунок 1 – Схема ферментационной установки для культивирования метанооксиляющих бактерий *Methylococcus capsulatus*:

1 – биореактор; 2 – газоотделитель; 3 – насос; 4 – теплообменник; 5 – эжектор; 6 – накопительная емкости; 7 – конденсатор; 8 а, б, в – регулирующая арматура; 9 – регулятор давления «до себя»; 10 – выход отходящих газов; 11 – отбор культуральной жидкости; 12 – вход технологической воды; 13 – вход аммиачной воды; 14 – вход компонентов минерального питания; 15 а, б – вход кислородосодержащего и природного газа; 16 а, б, в – запорная арматура; 17 – отбор пробы

Однако при реализации вышеуказанной схемы возникает проблема, заключающаяся в том, что плотности газожидкостной смеси, поступающей в газоотделитель и культуральной дегазированной жидкости отличаются, что приводит к значительным колебаниям уровня в газоотделителе. Таким образом, необходимо обеспечить выравнивание скоростей поступающего в газоотделитель потока газожидкостной смеси и потока культуральной жидкости выходящего из него. Достижение устойчивого состояния в системе газоотделения обеспечивается с помощью представленной на схеме ферментационной установки трубопроводной обвязки, которая позволяет с помощью размещаемой на ней регулирующей арматуры (рисунок 1, позиция 8 *а, б, в*) устанавливать заданные соотношения расходов для потоков газовой фазы в системе: биореактор – газоотделитель – насос – эжектор.

Следует отметить, что для обеспечения требуемого гидродинамического режима в биореакторе необходимо также учитывать направление газожидкостного потока в точке ввода его в биореактор. В промышленном биореакторе [3, с.1], представленном на рисунке 2, ввод газожидкостной смеси осуществляется под углом к горизонтالي, в нижнюю часть обечайки аппарата, что позволяет обеспечить необходимое время пребывания диспергированного в культуральной жидкости газа и снизить его количество в циркулирующей культуральной жидкости. Кроме того, симметричный ввод потоков от двух эжекторов обеспечивает дополнительное смешение двух потоков смеси газа и жидкости, поступающих из циркуляционных контуров аппарата.



Рисунок 2 – Ферментер колонный: а – вид сбоку; б – вид сверху

При использовании ранее озвученного подхода к ограничению количества газовой фазы в циркуляционном контуре и, соответственно, на всасывающей линии насосного оборудования, заключающегося в использовании внутренних элементов конструкции, следует рассмотреть различные варианты переливных устройств, устанавливаемых в точке выхода культуральной жидкости на циркуляцию. Данные элементы конструкции не только препятствуют воронкообразованию в биореакторе, но и позволяют исключить прорыв ядра воронки в сливное отверстие циркуляционного контура, что может привести к срыву режима работы насосного оборудования.

Библиографический список

1. **Винаров А. Ю.** Процессы и аппараты биотехнологии. Производство белка из метана: учебное пособие. СПб. : Лань, 2022. 128 с.
2. **Кочетков В. М., Лалова М. В., Левитин Л. Е., Молчан В. М., Нюньков П. А., Цымбал В.В.** Ферментационная установка для культивирования метанокисляющих бактерий *Methylococcus capsulatus* // Патент России № 2769129 С1. 2022. Бюл. № 10.
3. **Кочетков В. М., Левитин Л. Е., Нюньков П. А., Рыжов Г. В., Цымбал В. В.** Ферментер колонный (патент на промышленный образец) // Патент России № 126579 2021. Бюл. № 8.

УДК 664.723

Мунассар Емад Хусsein Али, лаборант-исследователь, *emadmounasar@gmail.com*
Иван Александрович Шорсткий, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Технологическое оборудование и системы жизнеобеспечения», *i-shorstky@mail.ru*
Кубанский государственный технологический университет
(Институт механики, робототехники, инженерии транспортных и технических систем),
Россия, г. Краснодар

**Сушка зернового материала с предварительной обработкой
слаботочным плазменным каналом искрового разряда**

Аннотация. Представлено перспективное направление применения электрофизической обработки в качестве подготовительной процедуры для интенсификации этапа сушки зернового материала. Рассмотрено актуальное положение дел в области применения электрофизических технологий для интенсификации сушки растительных материалов. Рассмотрены особенности влияния электрофизической обработки на тепловые и массообменные процессы. Выявлено, что предварительная электрофизическая обработка способствует значительному снижению длительности последующей сушки.

Ключевые слова: слаботочный плазменный канал искрового разряда, зерновой материал, сушка, эффективность, кинетика сушки.

Emad Munassar, Laboratory Assistant-researcher, *emadmounasar@gmail.com*
Ivan A. Shorstky, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Technological Equipment and Life Support Systems, *i-shorstky@mail.ru*
Kuban State Technological University (Institute of Mechanics, Robotics, Engineering of Transport and Technical Systems), Russia, Krasnodar

Abstract. A promising direction of application of electrophysical processing as a preparatory procedure for the intensification of the drying stage of grain material is presented. The current state of affairs in the field of application of electrophysical technologies for intensification of drying of plant materials is considered. The peculiarities of the influence of electrophysical processing on thermal and mass transfer processes are considered. It is revealed that preliminary electrophysical treatment contributes to a significant reduction in the duration of subsequent drying.

Keywords: low-current plasma channel of spark discharge, grain material, drying, efficiency, drying kinetics.

Grain materials drying with pretreatment by low-current spark discharge plasma channel

Перспективные электрофизические технологии являются важным междисциплинарным направлением пищевой и сельскохозяйственной промышленности, целью которого является получение безопасных и качественных пищевых продуктов в необходимом количестве на основе возникающих электрогидродинамических эффектов и явлений. За последнее десятилетие некоторые электрофизические технологии, такие как озонирование, обработка импульсным электрическим полем, обработка низкотемпературной плазмой, нашли широкое применение в технологиях увеличения сроков хранения пищевых продуктов, улучшения переработки пищевого сырья и подготовительных процессов [1–3]. Однако у перечисленных выше технологий есть как преимущества, так и недостатки, среди которых высокие капи-

тальные затраты их практической реализации [4], а также высокие требования электрической безопасности при организации производственного процесса. Следовательно, необходимо постоянное совершенствование указанных технологий как с точки зрения их доступности для практической реализации, так и теоретическая проработка возникающих эффектов и механизмов воздействия на пищевой продукт.

Особое место при использовании электрогидродинамических потоков в процессах сушки занимают комбинированные процессы при одновременном использовании сушильного агента и электроактивированного потока [5–7]. Данная комбинация позволяет сочетать традиционные эффекты на тепломассоперенос, а также формировать дополнительные силы интенсификации процессов сушки.

В данной работе в качестве основного метода воздействия на зерновой материал использовали слаботочный плазменный канал искрового разряда. Генерацию искрового разряда осуществляли с использованием высоковольтного блока питания с максимальным выходным напряжением 30 кВ. Частота следования искровых разрядов составляла порядка 600 Гц. Длительность обработки была подобрана на основе предыдущих результатов и составляла 260 с. Рассмотрено 2 опыта обработки зернового материала: контрольный образец без обработки (опыт А), при нахождении зернового материала на диэлектрической подложке с формированием искрового разряда (опыт Б). Тепловой эффект от обработки слаботочным плазменным каналом искрового разряда составлял менее 3 °С. Для этого температура поверхности зерна была измерена с помощью инфракрасного пирометра.

После обработки зерновой материал направлялся на этап конвективной сушки в сушильном шкафу Экрос 4620 (Экросхим, Россия) с циркуляцией воздуха при температуре 110 °С. Сушку проводили до момента снижения влажности зернового материала до кондиционной влажности 10 %. Во время эксперимента осуществляли оценку кинетики сушки. Для этого с интервалом в 10 мин брали навеску для определения влажности зернового материала.

На рисунке 1 представлены кривые сушки зернового материала для поставленных опытов. Пропускание электроактивированного сушильного агента, содержащим озоновоздушную смесь и группы ионов OH^- , O^- и H^+ сквозь слой зернового материала при работе в режиме искрового (опыт Б) при атмосферном давлении с объемной плотностью электрических зарядов $10^{-2} - 10^{-1}$ Кл/м³ позволяет сочетать в себе максимальный эффект ускорения процесса сушки зернового материала.

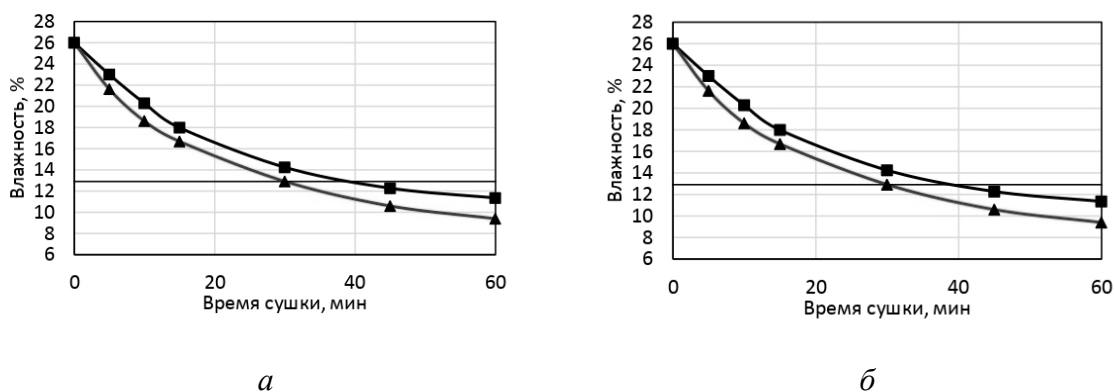


Рисунок 1 – Кинетика (а) и скорость сушки (б) зернового материала для поставленных опытов

При одновременном участии озоновоздушной смеси и воздействия коронного разряда формируются три градиента, влияющих на массоперенос: градиент температуры, градиент химического потенциала и градиент электрического поля. Воздействие искровым разрядом атмосферного давления позволяет сочетать изменения массообменных характеристик

сушки с поверхности зерна за счет изменения физико-механических характеристик влаги и микроструктурных изменений зернового материала. С точки зрения процесса сушки кривая представлена периодом падающей скорости сушки. При этом стоит отметить, что для опыта Б в начальный период времени (15 мин) скорость сушки выше на 15...20 % по сравнению с необработанным материалом. При этом максимальная скорость сушки установлена на уровне 0,83 % влаги/мин для образца зерна по опыту Б при воздействии искровым разрядом.

Можно предположить, что при работе представленной технологии на малотоннажной зерносушилке (100 т сырья в сутки), предварительная электрофизическая обработка потенциально может увеличить производство примерно на 10...15 т в сутки. Это потенциально может обеспечить дополнительный доход, который увеличит как норму прибыли, так и окупаемость инвестиций в оборудование обработки слаботочным плазменным каналом искрового разряда. В настоящее время разрабатываемые нашей исследовательской группой технологии предварительной электрофизической подготовки растительных материалов показывают высокие технологические эффекты.

Выводы

В работе экспериментально установлено, что предварительная обработка слаботочным плазменным каналом искрового разряда способствует снижению длительности сушки зернового материала до кондиционной влажности. Скорость сушки зернового материала, обработанного слаботочным плазменным каналом искрового разряда в начальный момент времени выше, чем в материале без предварительной обработки. В целом, процедура предварительной обработки слаботочным плазменным каналом искрового разряда может быть рекомендована при подготовке зернового материала к этапу сушки, учитывая факт сокращения общей длительности процесса.

Библиографический список

1. Радиационная обработка как технологический прием в целях повышения уровня продовольственной безопасности / Т. В. Чиж, Г. В. Козьмин, Л. П. Полякова, Т. В. Мельникова // Вестник РАЕН. 2011. № 4. С. 44–49
2. **Singh A., Orsat V., Raghavan V.A.** Comprehensive review on electrohydrodynamic drying and high-voltage electric field in the context of food and bioprocessing // *Drying Technology*. 2012. Т. 30. № 16. С. 1812–1820.
3. **Ganesan A. R., Tiwari U., Ezhilarasi P. N., Rajauria G.** Application of cold plasma on food matrices: A review on current and future prospects // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2021. Т. 45. № 1. С. e15070
4. **Priyadarshini A., Rajauria G., O'Donnell C.P., Tiwari B.K.** Emerging food processing technologies and factors impacting their industrial adoption // *Critical reviews in food science and nutrition*. 2019. Т. 59. № 19. С. 3082–3101.
5. **Mirzaei-Baktash H., Hamdami N., Torabi P., Fallah-Joshaqani S., & Dalvi-Isfahan M.** Impact of different pretreatments on drying kinetics and quality of button mushroom slices dried by hot-air or electrohydrodynamic drying // *LWT*. 2022. Т. 155. С. 112894.
6. **Полищук Н. В., Панченко М. С., Панченко И. М.** Влияние радиусов кварцевых капилляров на высоту поднятия воды в электрическом поле // *Электронная обработка материалов*. 2008. № 4. С. 45–50.
7. **Sheikholeslami M., Seyednezhad M.** Simulation of nanofluid flow and natural convection in a porous media under the influence of electric field using CVFEM // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Т. 120. С. 772–781.

УДК 664.8.9.8.033

Александр Александрович Платицын, *технический директор*, gendir@techwb.ru
ООО «Технологии Без Границ», Россия, г. Бийск

Игорь Алексеевич Бакин, *доктор технических наук, профессор, и.о. зав. кафедрой*
«Процессы и аппараты перерабатывающих производств», bakin@rgau-msha.ru
Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева,
Россия, Москва

Повышение энергоэффективности сушильной установки для плодоовощных концентратов

Аннотация. Для повышения показателей качества и характеристик вакуумной сушки изучено использование теплового насоса и рециркуляции сушильного агента. Методы: сухих веществ (ГОСТ 33977), аскорбиновой кислоты (ГОСТ 24556), каротиноидов (ГОСТ Р 54037). Осциллирующие режимы сушки изучены на установке (патент РФ № 200436) ООО «Технологии Без Границ». Определены параметры: кондуктивный нагрев до 40...60 °С, вакуум 40...60 кПа. При регидратации не изменилось содержание витамин С, а доля каротиноидов увеличилась в 4,8 раз. Влагоудержание моркови изменилось от 87 до 10 %, для свеклы от 91 до 12 %.

Ключевые слова: вакуумная сушка, дегидратация, плодородное сырье.

Aleksandr A. Platicyn, *Technical Director*
LLC «Technologies without Borders», Russia, Biysk

Igor A. Bakin, *Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor, Acting Head*
of the Department of Processes and Apparatuses of Processing Industries, bakin@rgau-msha.ru
Russian State Agrarian University named after K.A. Timiryazev, Russia, Moscow

Improving energy efficiency of drying installation for fruit and vegetable concentrates

Abstract. To improve the quality and characteristics of vacuum drying, the use of a heat pump and recirculation of the drying agent has been studied. The methods used included drying substances (GOST 33977), ascorbic acid (GOST 24556), and carotenoids (GOST R 54037). Oscillating drying modes were studied on the equipment (patent of the Russian Federation No. 200436) of LLC "Technologies Without Borders". The following parameters were determined: conductive heating up to 40...60 °C, vacuum 40...60 kPa. Upon rehydration, the content of vitamin C remained unchanged, while the proportion of carotenoids increased by a factor of 4.8. The moisture content of carrots changed from 87 to 10 %, and for beets, it changed from 91 to 12 %.

Keywords: vacuum drying, dehydration, fruit raw materials.

Комплексный подход к проектированию жизненного цикла пищевой продукции предполагает минимизацию потерь на всех этапах. Стадии переработки сырья в полуфабрикаты связаны с рисками потери пищевой ценности. Спрос потребителей на удобные в приготовлении продукты, имеющие высокое содержание антиоксидантных веществ, обусловил использование низкотемпературных технологий переработки.

Информация и спрос на продукты питания с пользой для здоровья, благодаря высокому содержанию активных веществ, лучшими показателями и органолептическими свойствами, делает актуальными исследования по разработке технологии консервации растительного сельскохозяйственного сырья (плодов, фруктов и овощей) [1, с.111375].

Низкотемпературная сублимационная сушка является перспективным методом регидратации, проводимым под вакуумом, позволяющим сохранить термолабильные веще-

ства, внешний вид и органолептические показатели исходного сырья. Однако необходимость замораживания сырья, длительность процесса и высокие эксплуатационные затраты удорожают продукцию. Аналогичным низкотемпературным методом регидратации, отличающимся отсутствием стадии сублимации, является вакуумная сушка. Удаление влаги в этом случае происходит до фазового перехода, при пониженном давлении. Органолептические характеристики продукции – внешний вид, запах/аромат, консистенция/текстура и вкус, в значительной степени зависят от организации и параметров процесса сушки [2, с.12]. В исследованиях по сушке цитрусовых показано, что понижение давления до 5 Па приводит к получению образцов с наименьшим содержанием влаги, но они воспринимаются с более сильным вкусом и наиболее хрустящими [2, с.12]. При более высоких давлениях до 100 Па, образцы имеют большую влажность, но при этом более насыщенный интенсивный цвет.

В исследованиях кинетики разложения аскорбиновой кислоты в ломтиках красного перца во время вакуумной сушки изучено изменение трех различных температур (40, 55 и 60 °С) и двух абсолютных давлений (40,0 кПа и 60,0 кПа). Получено, что наибольшая концентрация витамина С была в образцах, высушенных при температуре 45 °С и давлении 40,0 кПа [3, с.20].

Перенос водяного пара при регидратации через оболочки растительного сырья зависит в большей степени от градиента давления паров, чем от давления в сушильной камере. Это позволяет при большем парциальном давлении водяных паров внутри образцов сырья увеличить движущую силу и снизить затраты энергии на сушку. Данный способ реализуется при циклическом изменении абсолютного давления в сушилке.

Известный метод атмосферной сублимационной сушки основан на использовании осушителей с тепловым насосом. Температура сушки в этом методе не превышает рабочую температуру теплового насоса (85 °С), при использовании принципа обратимого цикла Карно [4, с.547]. Процесс реализуется в широком диапазоне температур и влажности, обеспечивая оптимальные условия для сушки термочувствительных пищевых материалов. В сравнении с конвективными и лиофильными способами, сушка с тепловым насосом имеет меньшее энергопотребление и больший тепловой коэффициент полезного действия. С точки зрения промышленной реализации сочетание вакуумной сушки с циклом осушения и энергоотвода теплоты от водяных паров с помощью теплового насоса, является многообещающей альтернативой конвективному способу.

Целью исследований было проведение исследований закономерностей процесса вакуумной сушки для повышения показателей качества продукции и обеспечения энергоэффективности процесса при использовании теплового насоса и рециркуляции сушильного агента.

В работе использовались методы исследования: сухих веществ (ГОСТ 33977), аскорбиновой кислоты (ГОСТ 24556), каротиноидов (ГОСТ Р 54037). Исследования проведены на промышленной установке (патент РФ № 200436) ООО «Технологии Без Границ». Объектами исследования являлись образцы моркови столовой (Нантская) и свеклы (Цилиндра), урожая 2021 г., выращенные в условиях Алтайского края.

Исходя из предварительных исследований, выявлена перспективность использования осциллирующих способов создания вакуумного давления в камере [5, с.121]. Для повышения эффективности использования теплоты увлажненного сушильного теплоносителя изучен процесс осушения в конденсаторе с использованием теплового насоса. Для низкотемпературной сушки энергоэффективность зависит от соотношения расходов количества теплоты сушильного агента и теплоты, отводимой тепловым насосом. Известно, что интенсивность теплоотдачи и процесса фазового перехода определяется условиями обтекания сушильным агентом поверхностей конденсации [5, с.125]. На основе этих предположений предложена схема низкотемпературной сушильной установки (рисунок 1).

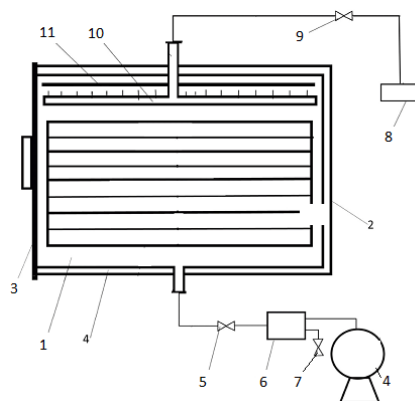


Рисунок 1 – Схема сушильной установки

Во внутреннем объеме сушильной камеры 1 размещаются полки для продукта 2, который загружается через дверцы 3. Система вакуумирования состоит из вакуумного насоса 4 с вакуумным вентилем 5, ресивера 6 с вентилем для сброса конденсата 7. Система обогрева работает по принципу теплового насоса, включающего компрессорную установку 8 с терморегулирующим вентилем 9, а также размещенные в камере калориферы 10 и секции конденсации 11. Термодинамический цикл включает сжатие хладагента в компрессоре до давления конденсации, подачу его в секцию калорифера в сушильной камере. После дросселирования хладагент поступает в конденсаторы (испарители), где воздух осушается, а конденсат удаляется из камеры в периоды циклов нагрева при атмосферном давлении. Выбор схемы с тепловым насосом обусловлен тем, что при сушке овощного сырья температура его поверхности приближается к температуре сушильного агента, для эффективного удаления влаги требуется понижать температуру конденсации. Для рационального использования теплоты хладагента, отводимой от испарителя, в конденсатор теплонасосной установки подводится поток теплоты от воздуха в камере. Направленное движение потоков воздуха и паров обеспечивается схемой рециркуляции и циркуляционных вентиляторов, показанной на рисунке 2.

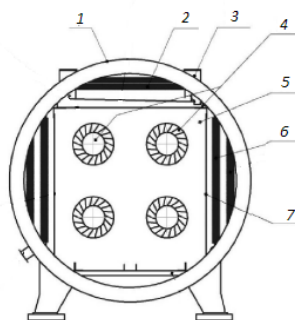


Рисунок 2 – Схема циркуляционных вентиляторов

Для направленного движения агента в объеме камеры предложено установить четыре вентилятора и экраны. Внутри камеры 1 продольно расположены потолочный 2 и боковые 6 и 7 экраны, образуя секцию зоны осушения. На заднем торце корпуса размещается блок циркуляции воздуха 5, состоящий из четырех циркуляционных вентиляторов 4. Конденсаторы 3 расположены между потолочным экраном 2 и корпусом 1. Воздух, находящийся в сушильной камере, нагревается калориферами, проходит через сырье, размещенное на полках. Увлажненный сушильный агент всасывается установкой циркуляции и пройдя через циркуляционные вентиляторы отправляется в боковые сегменты, где установлены калориферы. Данное техническое решение и конструкция защищены патентом на изобретение [6].

Проведены исследования вакуумной сушки при температуре до 35...40 °С для моркови столовой сорта Нантская и свеклы на ООО «Технологии Без Границ», г. Бийск. Изучен

процесс сушки свеклы от 91 до 12 % влажности. Длительность составила от 4 до 5 ч, при удельных энергозатрах $0,5 \text{ кВт/м}^2$ в зависимости от свойств исходного сырья и предварительной подготовки. Для моркови влажность изменилась с 87 до 10 %. При регидратации не изменилось содержание витамин С, а доля каротиноидов увеличилась в 4,8 раз. Влагосодержание моркови изменилось от 87 до 10 %, для свеклы от 91 до 12 %. Анализ показателей качества выявил сохранность основных биологически активных веществ высушенных овощных пищевых концентратов.

Результаты исследований показывают преимущество способа вакуумной сушки, сопоставляя с данными работ, где изучены конвективно-радиационная сушка [7], при которой равновесная влажность составила 10 %, при удельной мощности нагревателей $2,0 \text{ кВт/м}^2$. В работе [8] в условиях терморрадиационного энергоподвода плотность теплового потока составила $3,55 \text{ кВт/м}^2$, при температура поверхности сырья $52...53^\circ\text{C}$. Качество сырья напрямую зависит от температуры и длительности сушильного процесса [9], в связи с чем предложенная конструкция и система нагрева характеризуется широкими режимами переработки.

По результатам исследований изучены и запатентованы новые технические решения для обеспечения процесса низкотемпературной сушки овощных пищевых концентратов. Повышение качества сушки достигается равномерной циркуляцией сушильного агента вдоль оси камеры при проведении вакуумной сушки и использовании теплового насоса.

Библиографический список

1. Supercritical drying of food products: An insightful review / K Pravallika, S Chakraborty, RS Singhal // Journal of Food Engineering, 2022. P. 111375. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111375.
2. Silva-Espinoza M. A., et al. Impact of freeze-drying conditions on the sensory perception of a freeze-dried orange snack / Silva-Espinoza, M.A., Salvador, A., Del Mar Camacho, M., & Martínez-Navarrete, N. // Journal of the science of food and agriculture, 2021. P. 12. doi: 10.1002/jsfa.11101.
3. Demiray E., Tülek Y. Color and Ascorbic Acid Degradation Kinetics of Red Pepper (*Capsicum annuum* L.) Slices during Vacuum Drying / Akademik Gıda. 2020. № 18(1) pp. 19–26. doi:10.24323/akademik-gida.730013
4. Fakhreddin Salehi Recent Applications of Heat Pump Dryer for Drying of Fruit Crops: A Review, International Journal of Fruit Science, 2021. pp. 546–555, doi: 10.1080/15538362.2021.1911746.
5. Обоснование параметров конвективно-вакуумной сушки растительного сырья / И. Я. Федоренко, Т. Н. Землянухина, С. В. Шилов, Н. А. Орлова // Вестник АлтГАУ. 2020. № 11. С. 120–125.
6. Пат. 200436 U1 Российская Федерация, МПК F 26 В 9/06. Сушильная камера / Платицын А. А., Шилов С. В.; патентообладатель: ООО «Технологии без границ». № 2020125238 ; заявл. 29.07.2020 ; опубл. 23.10.2020, Бюл. № 30.
7. Мелякова О. А. Энергоэффективные режимы сушки овощей // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 4(84). С. 169–172.
8. Осциллирующий режим сушки шинкованной моркови инфракрасным излучением / С. Ф. Демидов, Б. А. Вороненко, В. В. Пеленко [и др.] // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 4. С. 49–54.
9. Бакин И. А., Шилов С. В., Мустафина А. С. Информационные системы контроля и управления процессов дегидратации плодово-ягодного сырья. Хранение и переработка сельхозсырья. 2023; (1). <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.277>.

Работа выполнена за счет средств Программы развития университета в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

УДК 536.2

Анастасия Игоревна Скоморохова, аспирант кафедры
«Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», nasta373@mail.ru
Григорий Вячеславович Рыбин, магистрант кафедры «Агроинженерия»,
enot1237@gmail.com
Дмитрий Вячеславович Никитин, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Механика и инженерная графика», vacuum2008@yandex.ru
Александр Викторович Щегольков, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электроэнергетика», energynano@yandex.ru
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

Тепловые процессы при производстве продуктов питания на пищевом 3D-принтере

Аннотация. В статье представлены аспекты разработки нового поколения пищевых устройств – пищевого 3D-принтера, позволяющего обеспечить рациональные режимные параметры печати продукта с соблюдением оптимального температурного режима. С этой целью в устройстве 3D-принтера используется теплоаккумулирующие материалы. При выпекании изделий из теста используется устройство, работающее на основе вакуумных технологий.

Ключевые слова: термообработка теста, теплообмен, аддитивное производство.

Thermal processes in food production on a food 3D-printer

Anastasia I. Skomorokhova, Postgraduate of the Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering, nasta373@mail.ru
Grigory V. Rybin, Master's Degree of the Department of Agroengineering, enot1237@gmail.com
Dmitry V. Nikitin, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, vacuum2008@yandex.ru
Alexander V. Shchegolkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering, energynano@yandex.ru
Tambov State Technical University, Russia, Tambov

Abstract. The article presents aspects of the development of a new generation of food devices – a food 3D printer, which makes it possible to provide rational regime parameters for printing a product in compliance with the optimal temperature regime. For this purpose, heat storage materials are used in the 3D printer device. When baking dough products, a device based on vacuum technologies is used.

Keywords: heat treatment of dough, heat exchange, additive manufacturing.

Производство продуктов питания с использованием аддитивных технологий в настоящее время пользуется популярностью среди потребителей всего мира [1]. Трехмерная печать открывает новые возможности в сфере производства функциональных продуктов питания с определенным набором полезных компонентов. Наибольший интерес такая продукция представляет для групп населения, нуждающихся в диетическом сбалансированном питании. По этой причине актуальны исследования, направленные на повышение качества еды, изготавливаемой на пищевых 3D-принтерах [2].

Одним из важнейших факторов, оказывающих влияние на свойства готового продукта, является температурный режим печати и последующей обработки. При производстве

функциональных продуктов важно обеспечивать сохранение биологически активных веществ и полезных компонентов исходного сырья [3].

При печати нагрев материала осуществляется в экструдере. Здесь обеспечивается вязкая консистенция, пригодная для выдавливания с последующим затвердеванием на столе построения. Здесь также происходит нагрев, способствующий равномерному распределению материала при его застывании.

Обеспечить рациональные температурные режимы можно посредством внедрения в устройство пищевого 3D-принтера тепловых аккумуляторов. Их применение позволит поддерживать постоянную температуру в течение всего процесса печати.

При термообработке изделий из теста предлагается осуществлять так называемое вакуумное выпекание в разработанной камере (рисунок 1). Такое выпекание предполагает охлаждение под вакуумом для получения более мягких образцов и повышения срока их хранения за счет изменения микроструктуры [4].

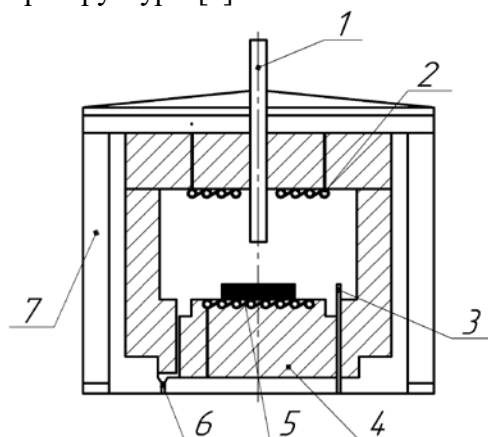


Рисунок 1 – Устройство для вакуумной термообработки теста:

1 – устройство для парогазовой смеси; 2 – устройство подогрева с электропитанием;
3 – устройство контроля температуры; 4 – рабочая площадка; 5 – изделие из теста; 6 – отвод для вакуумного насоса; 7 – корпус

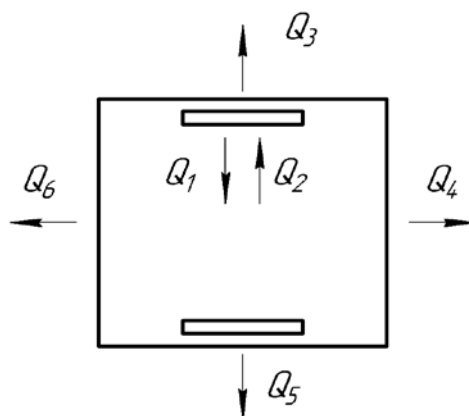


Рисунок 2 – Схема тепловых потоков в устройстве

Исследования по выбору сырья для печати направлены на поиск новых ингредиентов среди сельскохозяйственных культур Центрального Черноземья. Предлагается использовать при создании функциональных продуктов порошки и экстракты, а в качестве связующего вещества будет выступать пектин, который помимо придания желеобразной консистенции материалу, способен обогатить продукт полезными для организма человека свойствами.

Дифференциальные уравнения, описывающие теплообмен в установке, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \rho_T C_T h_T F_T = \frac{dT_T}{d\tau} &= (P_{ик} + P_{та}) - K_{1-2} F_1 (T_T - T_B) - K_1 F_{11} (T_T - T_Y); \\ \rho_Y C_Y h_Y F_Y = \frac{dT_Y}{d\tau} &= K_{1-2} F_1 (T_T - T_B) - K_{2-3} F_2 (T_Y - T_B); \\ \rho_B C_B V_B = \frac{dT_B}{d\tau} &= K_{2-3} F_2 (T_Y - T_B) - K_3 F_2 (T_B - T_{окр}); \\ \text{начальные условия: } \tau > 0; T_T = T_B = T_Y &= +20^\circ\text{C}; T = T(\tau); \\ \text{параметры варьирования: } P_{та}; P &\equiv P(T), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $F_T, F_Y, F_1, F_{11}, F_2$ – площади 3D модели из теста, корпуса установки, поверхности теплообмена теста с воздухом внутри установки, поверхности теплообмена теста с корпусом установки, поверхности теплообмена корпуса установки с окружающей средой, м^2 ; $P_{ик}, P_{та}$ – тепловой поток, возникающий от нагревателя и теплового аккумулятора (ТА), Вт; K_{1-2}, K_{2-3}, K_1 – коэффициенты теплопередачи от теста к воздуху внутри установки, от воздуха к стенкам устройства, от стенок устройства в окружающую среду, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; $T_T, T_Y, T_B, T_{окр}$ – температуры теста, устройства, воздуха внутри установки и окружающей среды, $^\circ\text{C}$; C_T, C_Y, C_B – теплоемкость теста, материала установки, воздуха, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ_T, ρ_Y, ρ_B – плотности материала теста, устройства и воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; h_T, h_Y – высоты теста и внутренней камеры устройства, м; V_B – объем воздуха внутри устройства, м^3 ; τ – время, с

Таким образом, представлено описание устройства, которое позволяет в условиях вакуума проводить термическую обработку изделий из теста. На основе теплового баланса, предложена система дифференциальных уравнений, которая может быть решена с использованием численных методов.

Работа выполнена при содействии фонда ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия инновациям)» по договору № 17503ГУ/2022 от 28.04.2022 г. «Разработка пищевого 3D-принтера для изготовления продуктов питания функционального назначения» в рамках конкурса УМНИК-21.

Библиографический список

1. **Lupton D.** Download to delicious': Promissory themes and sociotechnical imaginaries in coverage of 3D printed food in online news sources // *Futures*. Elsevier, 2017. Vol. 93. pp. 44–53.
2. Paediatric-friendly chocolate-based dosage forms for the oral administration of both hydrophilic and lipophilic drugs fabricated with extrusion-based 3D printing / C. Karavasili, A. Gkaragkounis, T. Moschakis [et al.] // *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2020. Vol. 147. P. 105291.
3. Вакуумные технологии производства порошков и экстрактов из овощей, плодов и ягод для функциональных продуктов питания / Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин, О. А. Зорина [и др.] // *Наука в центральной России*. 2023. № 1(61). С. 55–65.
4. **Sezin T. Ş.** Evaluation of partial-vacuum baking for gluten-free bread: Effects on quality attributes and storage properties // *Journal of Cereal Science*, 2020. Vol. 91. P. 102891.

УДК 66-97

Александр Алексеевич Соловьев, ведущий инженер отдела термопластичных композиционных материалов, AleksanAlekseSolovy1@rosatom.ru

Мария Алексеевна Фатеева, начальник отдела термопластичных композиционных материалов, MAFateeva@rosatom.ru

Артур Радикович Гареев, заместитель директора по науке и инновациям, ARGareev@rosatom.ru

АО «Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита», Россия, г. Москва

Технологические аспекты процесса сушки полифениленсульфида в аппарате с принудительной конвекцией

***Аннотация.** В работе исследовался процесс сушки полифениленсульфида в аппарате с принудительной конвекцией. Показана невозможность предварительной сушки нетермостабилизированного полифениленсульфида, так как после сушки происходит падение показателя текучести расплава, напрямую влияющего на процесс переработки полифениленсульфида в изделие. Установлена закономерность падения показателя текучести расплава и отсутствия этого эффекта при термостабилизации полифениленсульфида. Определены режимы сушки термостабилизированного полифениленсульфида в аппарате с принудительной конвекцией.*

***Ключевые слова:** полифениленсульфид, сушка, термостабилизация.*

Alexander A. Soloviev, Leading Engineer of the Department of Thermoplastic composite Materials, AleksanAlekseSolovy1@rosatom.ru

Maria A. Fateeva, Head of the Department of Thermoplastic composite Materials, MAFateeva@rosatom.ru

Artur R. Gareev, Deputy Director for Science and Innovation, ARGareev@rosatom.ru
JSC Scientific Research Institute of Graphite-Based Structural Materials, Russia, Moscow

Techological aspects polyphenylenesulfide drying process in the forced convection drying apparatus

***Abstract.** The paper investigated the drying process of polyphenylene sulfide in a device with forced convection. It is shown that it is impossible to pre-dry non-thermostabilized polyphenylene sulfide, since after drying there is a drop in the melt flow rate, which directly affects the process of processing polyphenylene sulfide into the product. The regularity of the melt flow index drop and the absence of this effect during thermal stabilization of polyphenylene sulfide is established. The drying modes of thermally stabilized polyphenylenesulfide in an apparatus with forced convection are determined.*

***Keywords:** polyphenylenesulfide, drying process, thermostabilization.*

Введение

Полифениленсульфид (PPS, ПФС) – представитель класса теплостойких полиариленов [1]. ПФС используется в электронной и электротехнической промышленности, автомобилестроении, машиностроении, в том числе в точной механике и других отраслях. Как и любой инженерный пластик, полифениленсульфид перед переработкой необходимо высушить [2, 3] для исключения брака в конечном изделии. Актуальность данной работы обу-

словлена снижением у ПФС ключевого для переработки свойства – показателя текучести расплава. Снижение происходит во время предварительной сушки порошкообразного ПФС.

Материалы и оборудование

В работе использовался полифениленсульфид (ПФС) производства ООО НТЦ «Ахмадуллины». Структурная формула ПФС представлена на рисунке 1. Исследуемый полифениленсульфид является высокотекучим полимером и имеет показатель текучести расплава ПТР = 120 г/мин при нагрузке к 5 кг. ПФС исследовался в виде порошка и термостабилизированный [4] полифениленсульфид в виде гранул.

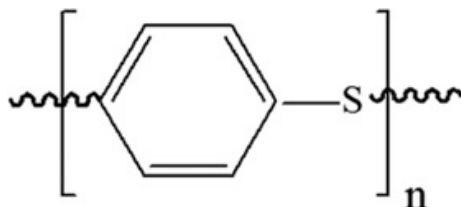


Рисунок 1 – Структурная формула полифениленсульфида

Термостабилизация ПФС проводилась в двухшнековом экструдере LabTech Scientific 16/40.

Сушка полифениленсульфида производилась в сушилке с принудительной конвекцией при температуре 120 °С в лабораторном сушильном шкафу SIBLAB 400/40.

Определение показателя текучести расплава проводилось на пластометре ПТР-ЛАБ-02 при температуре 320 °С, давлении 5 кг, выдержке в камере в течение 5 мин.

Результаты и обсуждение

Сушка ПФС производилась в течение 2-х, 4-х и 6-ти часов соответственно для порошкообразной и гранулированной форм. Результаты снижения ПТР приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние процесса сушки нетермостабилизированного ПФС на показатель текучести расплава

Время сушки, ч	ПТР порошкообразного полифениленсульфида, г/10 мин
Несушенный	120
2	60
4	30
6	10

Как видно из таблицы показатель текучести расплава существенно снижается, что недопустимо для термопластов, которые должны перерабатываться многократно [4] без существенной потери реологических свойств. В качестве компромиссного решения возможна сушка полифениленсульфида при температуре 100 градусов. Однако, опираясь на опыт зарубежных производителей, рекомендующих сушку в диапазоне 130...150 °С [5], нет гарантии удаления оставшейся воды и летучих веществ.

Таблица 2 – Влияние процесса сушки термостабилизированного ПФС на показатель текучести расплава

Время сушки, ч	ПТР термостабилизированного гранулированного полифениленсульфида, г/10 мин
Несушенный	180
2	154
4	160
6	173

После проведенной термостабилизации [6] ПФС эффект падения ПТР перестал появляться. Результаты сушки термостабилизированного полифениленсульфида представлены в таблице 2.

Разница в измерениях не превышает 15 % и обусловлена рабочим диапазоном прибора ПТР-ЛАБ-02, который измеряет ПТР в диапазоне от 1 до 100 г/10 мин и механическим узлом среза экструдата, вносящим погрешность в измерения. Однако, из таблицы видно, что показатель текучести расплава ПФС после термостабилизации изменяется существенно меньше, чем в случае нетермостабилизированного ПФС.

Заключение

В результате проведенных работ получены следующие результаты.

1. Выявлена необходимость термостабилизации ПФС производства ООО НТЦ «Ахмадуллины» для получения постоянства свойств ПФС.
2. Определена зависимость падения ПТР нетермостабилизированного ПФС в зависимости от времени сушки.
3. Определены режимы сушки ПФС в сушилке с принудительной конвекцией: диапазон температур 120...150 °С и время сушки не менее 2-х часов.

Библиографический список

1. **Михайлин Ю. А.** Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. Спб. : ЦОП «Профессия», 2017. 624 с.
2. **Harper C. A.** Modern Plastics HandBook. McGraw-Hill, 1999. 1231 p.
3. **Басов Н. И., Брой В.** Техника переработки пластмасс. М. : Химия, 1985. 528 с.
4. **Власов С. В., Кандырин Л. Б., Кулезнев В. Н.** Основы технологии переработки пластмасс: Учебник для ВУЗов. М. : Мир, 2006. 600 с.
5. **Крыжановский В. К.** Инженерный выбор и идентификация пластмасс. СПб. : Научные основы и технологии, 2009. 204 с.
6. **Xing J., Xu Z. Z., Li D. W.** Preparation and oxidation resistance of polyphenylene sulfide modified by high-temperature antioxidants // Materials Research Express. 2021. V.8, № 4. p. 1–13.

УДК 537.523.9:664.3.033.8

Максим Дмитриевич Соснин, лаборант-исследователь, аспирант кафедры «Технологическое оборудование и системы жизнеобеспечения», maksim-sosnin7@mail.ru
Кубанский государственный технологический университет», Россия, г. Краснодар

Низкотемпературная плазма как способ подготовки растительного материала перед этапом сушки

Аннотация. Испытывали технологии предварительной электрофизической обработки с помощью интеллектуальной низкотемпературной плазмы (НП), основанной на нетепловом методе, к процессу сушки табачных листьев. Обработанные и затем высушенные с помощью естественной сушки листья табака анализировали на предмет микроструктурных изменений и физико-механических свойств. Обработку нитевидной микроплазмой проводили при напряженности электрического поля $E = 600$ кВ/м длительностью одного импульса 40 мкс и частотой следования импульсов 100 Гц. Установлено, что предварительная обработка нитевидной микроплазмой сокращает длительность процесса естественной сушки табачных листьев на 32 и 12 % для достижения равновесного влагосодержания при обработке жилки и всей пластины соответственно.

Ключевые слова: первичная обработка листового табака, электрофизические методы, нитевидная микроплазма, электропорация, естественная сушка, интенсификация процесса сушки, табачный лист.

Maxim D. Sosnin, Laboratory Researcher, Post-Graduate Student of the Department Technological Equipment and Life Support Systems, maksim-sosnin7@mail.ru
Kuban State Technological University, Russia, Krasnodar

Plant materials drying with pretreatment by cold plasma

Abstract. The aim of this work is to develop a new technology of preliminary electrical treatment using cold plasma for drying tobacco leaves. Virginia 202 tobacco leaves are used as an object of research. Tobacco leaves were dried naturally and analyzed for their microstructural changes, physical, and mechanical properties. Cold plasma treatment was carried out at an electric field of the strength $E = 600$ kV/m, a single pulse duration of 40 microseconds, and a pulse repetition rate of 100 Hz. It was found that cold plasma pretreatment allowed to reduce the duration of tobacco leaves drying by 32 % and 12 % to achieve an equilibrium moisture content when treating the vein and the whole leaf surface, respectively.

Keywords: primary processing of leaf tobacco, electrophysical methods, filamentary microplasma, electroporation, drying, intensification of the drying process, tobacco (leaf).

Изучение механизмов тепло- и массопереноса процесса сушки тонколистовых растительных материалов, предварительно обработанных электрофизическим методом является важным аспектом построения основ для разработки передовых технологий в пищевой, химической и других областях промышленности [1]. Под тонколистовыми растительными материалами подразумевается широкий ряд табачных и чайных листов.

В результате обработки низкотемпературной плазмой (НП) материал приобретает электропорированную структуру мембран растительных клеток, что в свою очередь ускоряет процесс массопереноса. Формирование новых каналов от воздействия НП способствует

изменению общей диффузии процесса массопереноса [2]. Данный факт наблюдался как экспериментально, так и с помощью анализа кривых сушки.

Обработка низкотемпературной атмосферной плазмой была выполнена с использованием высоковольтной системы питания (Matsusada AMPS 20B20, Япония) в сочетании с функциональным генератором Agilent. В поставленных экспериментах длительность импульса и частота микроплазменного разряда составляли 40 мкс и 100 Гц соответственно. Выбранные электрические параметры позволили точно контролировать обработку поверхности листьев табака в сочетании со скоростью перемещения электрода. Каждый импульс подавал напряжение до 14 кВ. Кроме того, при предварительной обработке НП использовались положительные импульсы с напряженностью электрического поля 600 кВ/см. Средняя удельная потребляемая энергия для предварительной обработки НП составила 1,7 кДж/кг при 3000 разрядах. Общее время обработки составило 60 секунд. Разница в температуре между предварительно обработанными НАП яблочными чипсами и контрольным образцом составила менее 2 °С, которая была измерена с помощью термопары Т-типа. Измерение высоковольтного сигнала осуществляли с помощью осциллографа Tektronix TDS 220 (Tektronix, США).

Схема для обработки листьев табака (рисунок 1 б) представляет собой систему из плоского анода, на котором располагают исследуемый материал и катода с ТЭ, установленного на шасси для осуществления сканирующего принципа обработки.

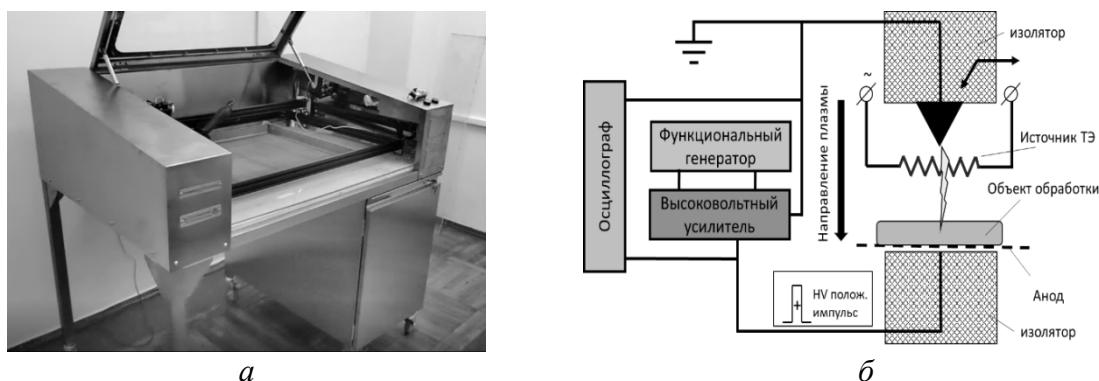


Рисунок 1 – Установка со сканирующей обработкой в непрерывном режиме (а) и схема обработки нитевидной микроплазмой растительного материала (б)

На рисунке 2 представлена оценка поверхности листьев табака после обработки низкотемпературной плазмой. Основным визуальным отличием поверхности листа является потемнение обработанной зоны. При обработке НП на поверхности листа образуются отверстия, напоминающие устьичные отверстия, через которые осуществляется интенсивный массообмен.

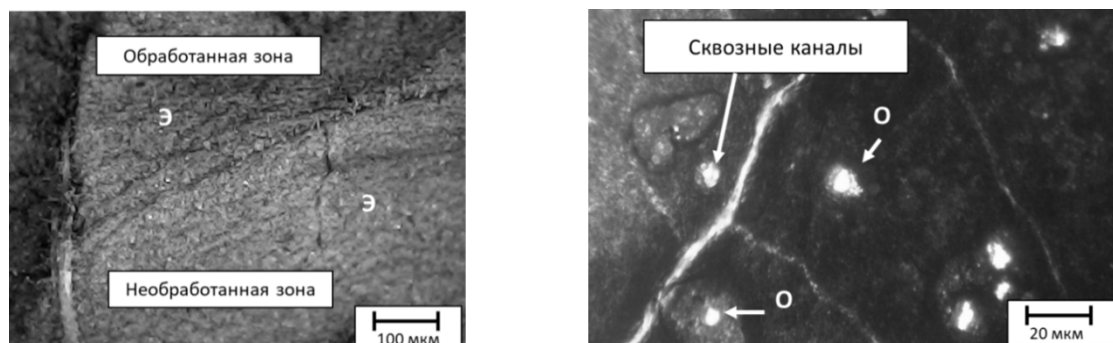


Рисунок 2 – Поверхность табачного листа: обработанная и необработанная нитевидной микроплазмой зона и фотографии с оптического микроскопа с наличием наружного эпидермиса (Э) и сквозных каналов (О)

Кинетические закономерности сушки листьев табака представлены на рисунке 3. Из опытных данных, полученных на экспериментальной установке, следует, что при сушке предварительно обработанного материала наблюдаются незначительные периоды прогрева и период падающей скорости сушки. Необходимо отметить, что предварительная обработка НП положительно влияет на процесс сушки. Процесс высушивания биоматериала до влажности $E = 0,05$ составил порядка 255 ч, тогда как обработанные НП образцы достигли данного показателя при значениях времени 180 мин. Данный факт означает, что обработка позволила сократить время сушки на 30 %.

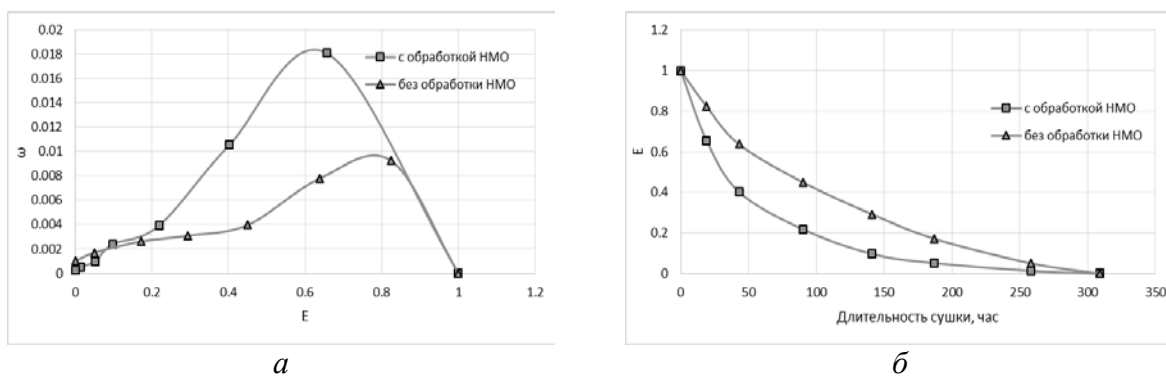


Рисунок 3 – Кривая сушки (а) и скорости сушки (б) для образцов листьев табака без и после НМО обработки

В данной статье экспериментально установлено, что предварительная обработка НП значительно влияет на кинетику сушки. Кроме того, изменяя режимы плазменной обработки, есть возможность управлять массообменными процессами, важными для дальнейшей переработки растительного сырья, таких как сушка и экстрагирование. Воздействие на мембрану клеток растительного сырья приводит к модификации капиллярно-пористой структуры с формированием дополнительных, образованных плазменным разрядом пор, ориентированных вдоль направления напряженности электрического поля. Предварительная обработка низкотемпературной плазмой позволила сократить длительность сушки на 30 % до достижения равновесного влагосодержания, что приводит к снижению времени сушки на 75 ч. Полученные данные кинетики процесса могут быть использованы для построения математической модели процесса сушки с применением предварительной обработки низкотемпературной плазмой, а также для определения перспектив применения технологии в промышленности.

Библиографический список

1. Шорсткий И. А. Применение обработки импульсным электрическим полем биоматериалов при подготовке к сушке: монография. Краснодар : ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2020. 172 с.
2. Микроплазменная обработка для сушки табачных листьев / И. А. Шорсткий, М. Д. Соснин, Е. В. Гнучих, Е. Е. Ульянченко // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2021. № 1(47). С. 25–33.

УДК 67.05: 66.040.287

Виктор Георгиевич Сотников, аспирант кафедры «Переработка древесных материалов»,
vcvcvc12345678@gmail.com

Казанский национальный исследовательский технологический университет»,
Россия, г. Казань

Установка термической переработки отходов агропромышленного комплекса в адсорбенты

Аннотация. Представлены схема и описание установки термической переработки отходов агропромышленного комплекса в адсорбенты, работающей, по принципу медленного кондуктивного пиролиза, на газообразных продуктах термического разложения сырья агропромышленного комплекса. Получаемые адсорбенты могут использоваться в качестве аналогов активированного угля.

Ключевые слова: медленный кондуктивный пиролиз, водопаровая активация, конвективная сушка.

Viktor G. Sotnikov, Postgraduate of the Department of Wood Materials Processing,
vcvcvc12345678@gmail.com

Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan

Installation for thermal processing of agricultural waste into adsorbents

Abstract. The scheme and description of the installation for the thermal processing of agricultural waste into adsorbents, which operates on the principle of slow conductive pyrolysis, on gaseous products of thermal decomposition of raw materials of the agro-industrial complex, are presented. The resulting adsorbents can be used as analogues of activated carbon.

Keywords: slow conductive pyrolysis, water steam activation, convective drying.

В данной работе представлены, описание и принцип работы установки термической переработки отходов агропромышленного комплекса в адсорбенты [1–4]. Схема установки представлена на рисунке 1.

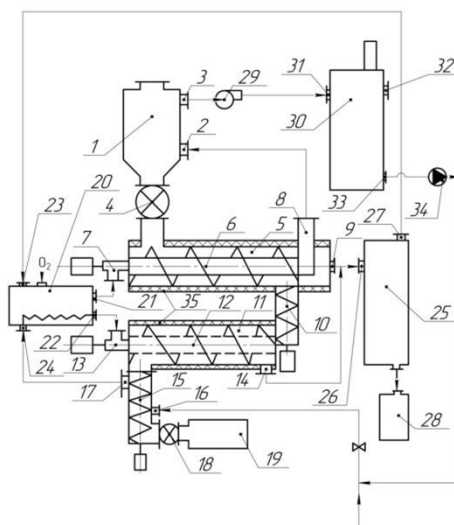


Рисунок 1 – Схема установки термической переработки отходов агропромышленного комплекса в адсорбенты

Установка включает в себя: загрузочный бункер 1 с патрубками: подвода топочных газов 2 и отвода отработанных топочных газов 3; роторные питатели 4,18; камеру пиролиза (первую рабочую камеру) 5 с патрубком отвода пиролизных газов 9; полый шнековый механизм 6 с патрубками: подвода топочных газов 7 и отвода топочных газов 8; шнековый транспортер 10; камеру активации (вторую рабочую камеру) 11 с патрубком отвода газов активации 14; полый перфорированный шнековый механизм 12 с патрубком подвода перегретого пара 13; шнековый транспортер охлаждения сырья 15 с патрубками: подвода воды 16 и отвода пара 17; бункер сбора активированного угля 19; блок подогрева пара, содержащий в себе топку 20, с патрубками: отвода топочного газа 21, отвода перегретого пара 22, подвода горючего газа 23, подвода пара 24; систему сепарации пиролизных газов и газов активации 25 с патрубками: подвода газов пиролиза и активации 26, отвода горючих газов 27; сборник пиролизного дистиллята 28; газодувку 29; систему газоочистки 30 с патрубками: подвода отработанных топочных газов 31, подвода воды 32, отвода воды 33; насоса 34; теплоизолированный корпус 35.

Устройство работает следующим образом.

Заявляемое устройство предназначено для конверсии органических веществ посредством их нагрева в бескислородной среде. Для успешной работы установки сырье измельчается до размеров 5...7 мм.

Сырье подается в загрузочный бункер 1, продвижение сырья по загрузочному бункеру происходит за счет сил гравитации. Затем через роторный питатель 4 сырье подают в камеру пиролиза 5, где происходит термическое разложение сырья. Перемещение сырья по камере пиролиза осуществляется посредством вращения лопастей полого шнекового механизма 6. Пространство внутри вала полого шнекового механизма прогревается топочными газами, тем самым разогревается внешняя стенка вала полого шнекового механизма поддерживая температуру 500 °С внутри первой камеры. Углеродистый остаток из камеры пиролиза через шнековый транспортер 10 подается в камеру активации 11. Попадающий в камеру активации углеродистый остаток продвигается посредством вращения лопастей полого перфорированного шнекового механизма 12. Через перфорированные стенки вала полого шнекового механизма пар, подогретый до температуры 900 С°, орошает слой углеродистого остатка в результате он превращается в активированный уголь, который затем перемещается из второй камеры в шнековый транспортер охлаждения сырья 15. Проходя по шнековому транспортеру охлаждения сырья активированный уголь охлаждается водой и паром. Далее охлажденный активированный уголь через роторный питатель 18 выгружается в бункер сбора активированного угля 19.

Образующиеся пиролизные и активационные газы выводятся из первой и второй рабочих камер через патрубки 9 и 14, в систему сепарации пиролизных газов и газов активации 25 через патрубок 26. Сепарированный горючий газ выводится из системы сепарации через патрубок отвода горючих газов 27 и поступает на сжигание в топку 20 через патрубок подвода горючего газа 23. Выгоревший газ отводится из топки, через патрубок отвода топочного газа 21, и подводится в полый шнековый механизм, через патрубок подвода топочных газов 7. Топочные газы проходят через полый вал, прогревают стенки шнекового механизма и выводятся через патрубок отвода топочных газов 8, в загрузочный бункер через патрубок подвода топочных газов 2 и используются в качестве теплоносителя для сушки сырья в бункере 1. Отработанные топочные газы отводятся из загрузочного бункера через патрубок отвода топочных газов 3 газодувкой 29 и подаются в систему газоочистки 30 через патрубок 31. Из системы газоочистки очищенные газы удаляются в атмосферу.

В систему газоочистки подается вода (абсорбент) через патрубок 32. Отработанная техническая вода отводится, из системы газоочистки насосом 34 через патрубок отвода воды 33, подается в шнековый транспортер охлаждения сырья через патрубок 16. Проходя через слой горячего активированного угля вода превращается в пар и отводится через патрубок

отвода пара 17 в топку через патрубок 24. В топке пар перегревается и отводится через патрубок 22 в полый перфорированный шнековый механизм через патрубок подвода перегретого пара 13. В результате взаимодействия перегретого пара с углеродистым остатком образуются активированный уголь и газы активации. Последний выводится, через патрубок 14.

Пиролизный дистилят отводится из системы сепарации через в сборник пиролизного дистилята 28.

Таким образом, совокупность признаков заявленной установки для переработки органического сырья позволяет получать активированный уголь применимый в промышленности и бытовых нуждах. Полное задействование ресурсов переработки в заявленной установке позволяет получить безотходное производство активированного угля из различных видов органических отходов. Энергия сжигания, сепарированного несконденсированного горючего газа, используется для активации карбонизата, тем самым снижая общие энергозатраты для переработки сырья. Пиролизный дистилят имеет высокую степень очистки и может использоваться в качестве топлива.

Благодарность: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00036, <https://rscf.ru/project/23-26-00036/>.

Библиографический список

1. **Safin R. G., Ziatdinov R. R., Sotnikov V. G. et al.** Optimizing the Structure of a Production System for Activated Carbon. *Russ. Engin. Res.* 42, 867-870 (2022).
2. **Safin R. G., Sotnikov V. G., Ziatdinova D. F.** (2023). Installation for the Processing of Plant Waste into Activated Carbon. In: Radiono A. A., Gasiyarov V. R. (eds) *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14125-6_79.
3. Сафин Р. Г., Сотников В. Г., Зиятдинова Д. Ф. Пирогенетическая переработка органических отходов текстильной промышленности в адсорбенты // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 5(395). С. 229–235. DOI 10.47367/0021-3497_2021_5_229.
4. Пат. 2789699 С1 Российская Федерация, МПК С 01 В 32/324, С 10 В 53/00. Способ получения активированного угля / Р. Г. Сафин, В. Г. Сотников, А. С. Родионов [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет». № 2021135547 ; заявл. 03.12.2021 ; опубл. 07.02.2023.

УДК 691

Андрей Александрович Титунин, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Лесозаготовительные и деревоперерабатывающие производства», a_titunin@ksu.edu.ru

Татьяна Николаевна Вахнина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Лесозаготовительные и деревоперерабатывающие производства», t_vachnina@mail.ru

Ирина Вячеславовна Сусоева, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Лесозаготовительные и деревоперерабатывающие производства», i.susoeva@yandex.ru
Костромской государственной университет, Россия, г. Кострома

Сходимость расчетных и экспериментальных значений коэффициента теплопроводности композиционных материалов из целлюлозосодержащих отходов

Аннотация. В работе использована теория обобщенной проводимости для определения теплопроводности композитов теплоизоляционного назначения. Выдвинута гипотеза о возможности распространения математического описания теплопроводности дисперсных систем на высоконаполненные композиционные плиты. Рассчитаны коэффициенты теплопроводности композиционных плит из невозвратных отходов прядения льняных волокон и синтетических связующих. Сравнение результатов расчета и определения коэффициента теплопроводности с использованием прибора ИТП-МГ4 показало высокую сходимость теоретических и экспериментальных данных.

Ключевые слова: лен, невозвратные отходы, карбамидоформальдегидное связующее, фенолоформальдегидное связующее, теория проводимости, дисперсная система, теплоизоляционные плиты, коэффициент теплопроводности.

Andrey A. Titunin, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Logging and Wood Processing Industries, a_titunin@ksu.edu.ru

Tatiana N. Vakhnina, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Logging and Wood Processing Industries, t_vachnina@mail.ru

Irina V. Sysoeva, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Logging and Wood Processing Industries, i.susoeva@yandex.ru
Kostroma State University, Russia, Kostroma

Convergence of the calculated and experimental values of the thermal conductivity coefficient of composite materials from cellulose-containing waste

Abstract. The paper uses the theory of generalized conductivity to determine the thermal conductivity of thermal insulation composites. A hypothesis has been put forward about the possibility of extending the mathematical description of the thermal conductivity of dispersed systems to highly filled composite slabs. The coefficients of thermal conductivity of composite boards from non-recoverable spinning waste of flax fibers and synthetic binders are calculated. Comparison of the results of calculation and determination of the thermal conductivity coefficient using the TCM-MG4 device showed a high convergence of theoretical and experimental data.

Keywords: flax, non-returnable waste, urea-formaldehyde binder, phenol-formaldehyde binder, theory of conductivity, dispersion system, heat-insulating boards, thermal conductivity coefficient.

Математическое описание закономерностей передачи тепловой энергии в материале является главной задачей исследователей со второй половины XXVIII века, результатом работ в данном направлении было создание Ж. Б. Фурье теории теплопроводности. Классическое математическое описание процесса передачи тепла в материале определяется в рамках частных задач – теплопроводность через плоскую пластину, через цилиндрическую или шаровую стенку. Разработка огромного количества композиционных материалов со сложной структурой межфазных взаимодействий приводит к значительному усложнению описания тепловых явлений в материале. Формализация описания явлений как теплового, так и другого энергетического характера, возможна при использовании теории обобщенной проводимости [7].

Задача определения коэффициента теплопроводности слоя из дискретных частиц с поровым пространством сама по себе достаточно сложна. Одним из первых в нашей стране исследователей в области теплопроводности неорганических строительных материалов был Б. Н. Кауфман [3]. Он обобщил большое количество экспериментальных данных и предложил формулы для расчета эффективной теплопроводности некоторых волокнистых материалов (минеральной ваты, стекловаты). К недостаткам рассмотренных Б. Н. Кауфманом с коллегами эмпирических формул Г. Н. Дульнев и Ю. П. Заричняк отнесли то, что зависимости часто не содержат коэффициенты теплопроводности компонент. Результаты полученных исследователями теоретических и экспериментальных значений коэффициента теплопроводности волокнистых материалов имеют погрешность $\pm 0...74\%$ [2].

Решение задачи определения теплопроводности пористого тела дано в работе О. Винера [11]. Верхняя граница Винера эффективной теплопроводности пористого тела достигается в системе, состоящей из плоскопараллельных слоев дискретных частиц, расположенных вдоль вектора теплового потока. Нижняя граница Винера достигается в аналогичной системе, но со слоями частиц наполнителя, перпендикулярными теплового потока.

О. Кришер также предложил рассматривать слой дискретных частиц как набор пластинок и газовой среды [9]. К сложностям использования метода можно отнести то, что коэффициент теплопроводности определяется в интервале между минимальным и максимальным значениями.

Некоторые исследователи рассматривают композиты на основе дискретных наполнителей как смесь фаз. Так П. Збижек в работе рассматривает пористый материал на основе гидравлического вяжущего как смесь четырех фаз [12].

А. Н. Комяков и А. А. Лукьянов считают, что наиболее удовлетворительно описывается теплопроводность систем «вода-щепа» и «лед-щепа» (теплопроводность воздушных промежутков не учитывалась) моделью Максвелла-Релея-Бургера, так как она дает минимальное и максимальное значения коэффициента теплопроводности [4].

В работах З. Хашина с коллегами уравнения расчета теплопроводности двухфазных систем были также получены в виде верхней и нижней границ (так называемые границы Хашина-Штрикмана). В исследованиях З. Хашина они были распространены на трех- и четырехфазные системы [8].

Все рассмотренные способы определения коэффициента теплопроводности справедливы для дисперсных систем. Однако П. А. Ребиндер рассматривал дисперсность материалов как универсальное состояние материалов в природе и различных технологических процессах [6]. Существуют работы, в которых способы определения коэффициентов обобщенной проводимости, разработанные для дисперсных систем, применяются для композиционных материалов [1].

Методы теории обобщенной проводимости были использованы авторами для оценки коэффициента теплопроводности композиционного материала из невозвратных растительных отходов прядения льняных волокон и синтетических поликонденсационных связующих [10]. Материал получали методом мокрого формования и сушки по технологии мягких дре-

весно-волокнистых плит. Композиционные плитные материалы изготавливались средней плотностью 370...410 кг/м³, расход связующего (КФС – карбамидоформальдегидная смола и отвердитель; ФФС – фенолоформальдегидная резольная смола) составлял 10...30 % от массы растительного наполнителя. Плиты изготавливались мокрым способом, сушились при температуре $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до влажности $8 \pm 0,5\%$. После выдержки определялись физико-механические показатели [10] и коэффициент теплопроводности образцов плит. Значение коэффициента теплопроводности материала определялось с помощью измерителя теплопроводности ИТП-МГ4 в соответствии с ГОСТ 7076-99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме».

Коэффициент теплопроводности двухкомпонентного материала можно определить по формуле В.И. Оделева [5]:

$$\lambda_{\text{эфф}} = \frac{2(1-n)\lambda_1 + (1+2n)\lambda_2}{(2+n) + (1-n)\lambda_2/\lambda_1}, \quad (1)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности непрерывной (большей по объему) фазы, Вт/(м·К); λ_2 – коэффициент теплопроводности диспергируемой фазы, Вт/(м·К); n – массовая доля диспергируемой фазы, $n \leq 0,4$.

Для высоконаполненных композиционных плитных материалов на основе наполнителя из невозвратных отходов прядения льна связующее, точно распределенное между частицами наполнителя, играет роль диспергируемой фазы. Массовая доля связующего была определена по сухому веществу – массовой доле нелетучих остатков. Коэффициент теплопроводности компонентов: наполнителя (отходов льна) – 0,066 Вт/(м·К); карбамидоформальдегидного связующего – 0,400 Вт/(м·К); фенолоформальдегидного связующего – 0,300 Вт/(м·К).

Результаты аналитического и экспериментального определения коэффициента теплопроводности образцов композитов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициент теплопроводности композиционных материалов из отходов льна

Вид наполнителя/вид связующего	Массовая доля компонента		Коэффициент теплопроводности композита, Вт/(м·К)		Различие расчетных и экспериментальных данных, %
	наполнителя	связующего	расчетный	экспериментальный	
Лен/КФС	0,99	0,01	0,067	0,064	4,68
Лен/КФС	0,97	0,03	0,069	0,066	4,54
Лен/КФС	0,95	0,05	0,072	0,069	4,34
Лен/КФС	0,93	0,07	0,075	0,072	4,16
Лен/КФС	0,91	0,09	0,077	0,074	4,05
Лен/КФС	0,88	0,12	0,082	0,078	5,12
Лен/КФС	0,87	0,13	0,083	0,079	5,06
Лен/КФС	0,84	0,16	0,088	0,084	4,76
Лен/ФФС	0,99	0,01	0,067	0,064	4,68
Лен/ФФС	0,98	0,02	0,068	0,065	4,61
Лен/ФФС	0,94	0,06	0,072	0,069	4,34
Лен/ФФС	0,93	0,07	0,073	0,070	4,28
Лен/ФФС	0,91	0,09	0,076	0,073	4,11
Лен/ФФС	0,89	0,11	0,078	0,075	4,00
Лен/ФФС	0,87	0,13	0,080	0,076	5,26

При использовании массовой доли диспергируемой фазы – отвержденного связующего в пределах 0,01...0,13 сходимость теоретических расчетных и

экспериментальных значений коэффициента теплопроводности композитов составляет 4,05...5,26 %. Это подтверждает выдвинутую гипотезу о возможности использования математического описания теплопроводности дисперсных двухкомпонентных систем для расчета коэффициента теплопроводности высоконаполненных композиционных плит из растительных наполнителей и синтетических связующих.

Библиографический список

1. **Алексеев Е. В., Заричняк Ю. П.** Структура и теплопроводность многослойных волоконно-армированных металлокомпозитов // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. СПб. : Университет ИТМО. 2022. С. 10–13.
2. **Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П.** Теплопроводимость смесей и композиционных материалов: Справочная книга. Л. : Энергия, Ленингр. отделение, 1974. 264 с.
3. **Кауфман Б. Н.** Теплопроводность строительных материалов. М. : Государственное издательство литературы по архитектуре и строительству, 1955. 157 с.
4. **Комяков А. Н., Лукьянов А. А.** О теплопроводности дисперсных материалов типа замороженной древесной щепы // Лесной вестник. 2010. № 4. С. 132–135.
5. **Оделевский В. И.** Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем // Журнал технической физики. 1951. Т. 21. Вып. 6. С. 667–685.
6. **Рибиндер П. А.** Поверхностные явления в дисперсных системах // Физико-химическая механика. М. , 1979. 384 с.
7. **Эдвабник В. Г.** К теории обобщенной проводимости смесей // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-2 [Электронный ресурс]. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=19855> (дата обращения: 07.02.2023).
8. **Hashin Z., Shtrikman S. A.** Variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials // Journal of applied physics. 1962. Vol. 33. No. 10. pp. 3125–3131.
9. **Krischer O.** Einfluss der feuchtigkeit, koernung und temperature auf wärmeleitsfähigkeit körnigen körper. Beichefte zum Gesundheits-Ingenieur. 1934. Vol. 33. pp. 1–10.
10. The performance of composites from vegetable raw materials with changes in temperature and humidity / I. V. Susoeva, T. N. Vakhnina, A. A. Titunin, J. A. Asatkina // Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 3(71). pp. 39–50.
11. **Wiener O.** Die theorie des mischkoerper fuer das feld der stationaeren stroemung // Abhandlungen der mathematischen-physischen klasse der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften. 1912. Vol. 32. pp. 509–604.
12. **Zbyšek P.** Application of effective media theory in the determination of thermal conductivity of wet lime-pozzolana renders // Thermophysics. 2008. pp. 131–139.

УДК 544.774.2

Ольга Вячеславовна Федотова, аспирант, младший научный сотрудник,
fedotova.olga.basic@gmail.com

Павел Юрьевич Цыганков, кандидат технических наук, доцент,
научный сотрудник кафедры «Химический и фармацевтический инжиниринг»,
tsygankov.p.i@muctr.ru

Наталья Васильевна Меньшутина, доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Химический и фармацевтический инжиниринг», *menshutina.n.v@muctr.ru*
Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева,
Россия, г. Москва

Суб- и сверхкритические технологии для получения аэрогелей на основе целлюлозы

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования процесса получения аэрогелей на основе целлюлозы с использованием гелеобразования в субкритическом диоксиде углерода и последующей сверхкритической сушкой.

В ходе аналитических исследований было выявлено, что полученные образцы обладали высокими значениями пористости (91...98 %) и удельной площади поверхности (238...355 м²/г). Применение суб- и сверхкритических технологий имеют высокий потенциал для получения высокопористых материалов на основе целлюлозы.

Ключевые слова: аэрогели, целлюлоза, гелеобразование, сверхкритическая сушка.

Olga V. Fedotova, Postgraduate, Research Assistan, *fedotova.olga.basic@gmail.com*

Pavel Yu. Tsygankov, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor, Researcher
of the Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering, *tsygankov.p.i@muctr.ru*

Natalia V. Menshutina, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor,
Head of the Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering, *menshutina.n.v@muctr.ru*
D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Russia, Moscow

Sub- and supercritical technologies for producing cellulose aerogels

Abstract. This paper presents the results of a study of the process of obtaining cellulose aerogels using gelation under subcritical carbon dioxide and subsequent supercritical drying. Analytical studies showed that the obtained samples had high values of porosity (91...98 %) and specific surface area (238...355 м²/g). The use of sub- and supercritical technologies has a high potential for obtaining highly porous materials based on cellulose.

Keywords: aerogels, cellulose, gelation, supercritical drying.

Аэрогели на основе целлюлозы представляют собой высокопористые наноструктурированные материалы, в которых жидкая фаза полностью замещена на газообразную. Они обладают высокой удельной площадью поверхности (100...600 м²/г), высокой пористостью (более 80 %) и низкой плотностью (0,05...0,2 г/см³) [1]. Целлюлозные аэрогели представляют особый интерес за счет использования возобновляемых источников сырья, биоразлагаемости и наличия гидроксильных групп на поверхности, позволяющих провести функционализацию, например, для придания гидрофобных характеристик. Благодаря уникальным свойствам данные аэрогели имеют большой потенциал для применения в качестве сорбирующих материалов, биомедицинских материалов, армирующих каркасов и т. д.

Получение аэрогелей на основе целлюлозы включает следующие этапы: (1) получение суспензии целлюлозы; (2) гелеобразование; (3) замена растворителя; (4) сверхкритическая сушка.

Каждый из этапов в той или иной степени оказывает влияние на структурные характеристики получаемых аэрогелей. Существует несколько способов гелеобразования, позволяющих получать материал различной формы, а также варьировать его механические и структурные свойства. Одним из многообещающих способов является гелеобразование, вызванное введением диоксида углерода под давлением [4]. Данный способ заключается в том, что при повышенном давлении возрастает растворимость CO_2 в воде, в следствие чего образуется угольная кислота, вызывающая процесс гелеобразования. С применением данного способа были получены гели на основе различных биополимеров [4, 3, 2], однако работ с получением гелей на основе целлюлозы представлено крайне мало.

Методика получения

В данной работе для получения аэрогеля на основе целлюлозы в качестве исходного материала применялась микрокристаллическая целлюлоза (МКЦ). На первом этапе осуществлялась гомогенизация МКЦ при 10 000 об/мин в течении 5 мин в предварительно охлажденном (до $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$) водном растворе 7 масс.% гидроксида натрия и 12 масс.% мочевины.

Для проведения процесса гелеобразования полученная суспензия разливается по чашкам Петри и помещается в аппарат высокого давления (рисунок 1). Введением CO_2 в камере создается давление 50 ± 3 бар при комнатной температуре $23 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Давление поддерживается в течение 22 ч, после чего медленно сбрасывается (1-2 бар/мин). Полученный гель целлюлозы сбрасывают в воду для отмывки от непрореагировавших реагентов.

Далее осуществляется подготовка образцов к сверхкритической сушке. Для минимизации усадки образцов и для обеспечения полной замены растворителя в порах геля осуществляется ступенчатая замена растворителя на водный раствор изопропилового спирта (ИПС) с массовым содержанием ИПС 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %, 100 %. Каждую последующую замену проводили не менее чем через 4 ч.

Сушка полученных образцов проводилась в среде сверхкритического CO_2 в несколько этапов: набор давления до 120 бар, смешение сверхкритического CO_2 с растворителем (ИПС), вытеснение растворителя, сушка в течение 4–5 ч при $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 120 бар и постепенный сброс давления.

На рисунке 1 представлена технологическая схема установки для проведения процессов гелеобразования и сверхкритической сушки. Данная установка была разработана на базе кафедры химического и фармацевтического инжиниринга РХТУ имени Д. И. Менделеева.

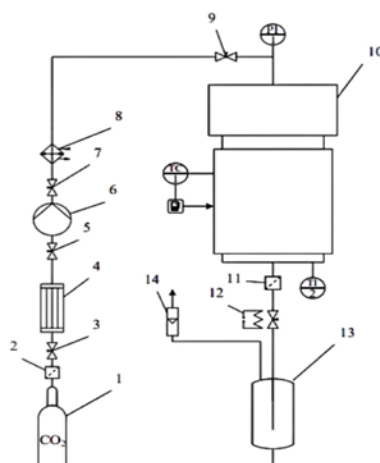


Рисунок 1 – Схема установки для проведения процессов гелеобразования и сверхкритической сушки:

- 1 – баллон с жидким диоксидом углерода (60 атм); 2, 11 – микронные фильтры; 3, 5, 7, 9 – игольчатые вентили; 4 – конденсатор; 6 – поршневой насос с пневмоприводом; 8 – термостат; 10 – сосуд высокого давления объемом 2 л; 12 – декомпрессионный клапан с подогревом; 13 – сепаратор; 14 – ротаметр

Результаты

С использованием вышеописанной методики были получены образцы с различным содержанием целлюлозы. Результаты аналитических исследований приведены в таблице 1, где $w_{\text{мкц}}$ – массовое содержание исходной микрокристаллической целлюлозы, ρ_k – кажущаяся плотность, Π – пористость, $S_{\text{уд}}$ – удельная площадь поверхности, полученная методом азотной порометрии. Пористость Π определялась по формуле (1):

$$\Pi = \left(1 - \frac{\rho_k}{\rho_n}\right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где ρ_k – кажущаяся плотность, г/см³; ρ_n – истинная плотность целлюлозного волокна, равная 1,5 г/см³. Азотная порометрия проводилась на оборудовании лаборатории кафедры химического и фармацевтического инжиниринга РХТУ имени Д.И. Менделеева.

Таблица 1 – Характеристики аэрогелей на основе целлюлозы

$w_{\text{мкц}}$, масс. %	ρ_k , г/см ³	Π , %	$S_{\text{уд}}$, м ² /г
2	0,04	98	355
4	0,07	94	345
6	0,11	91	238

Из полученных данных видно, что с увеличением массового содержания целлюлозы уменьшается пористость и удельная площадь поверхности. Тем не менее все образцы обладают мезопористой структурой, как видно из распределения пор по размерам (рисунок 2).

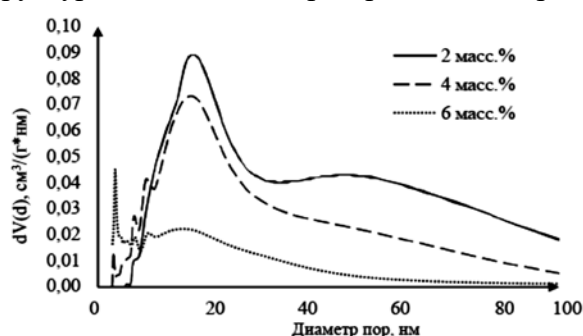


Рисунок 2 – Распределение пор по размерам

Таким образом, введение CO₂ под давлением является эффективным способом гелеобразования для получения аэрогелей на основе целлюлозы. Удельная площадь поверхности полученных материалов сопоставима или превышает удельную площадь поверхности аэрогелей на основе целлюлозы, полученных с использованием альтернативных методов гелеобразования. Следует также отметить возможность совмещения этапов получения аэрогеля в одном аппарате (гелеобразование, замена растворителя, сверхкритическая сушка), что позволит сократить время на осуществление всего процесса.

Библиографический список

1. **Budtova T.** Cellulose II aerogels: A review // Cellulose. 2019. vol. 26. pp. 81–121.
2. **Floren M. L. et al.** Carbon dioxide induced silk protein gelation for biomedical applications // Biomacromolecules. 2012. vol. 13. № 7. pp. 2060–2072.
3. **Ji C. et al.** Fabrication of porous chitosan scaffolds for soft tissue engineering using dense gas CO₂ // Acta Biomaterialia. 2011. vol. 7. № 4. pp. 1653–1664.
4. **Raman S. P., Gurikov P., Smirnova I.** Hybrid alginate based aerogels by carbon dioxide induced gelation: Novel technique for multiple applications // The Journal of Supercritical Fluids. 2015. vol. 106. pp. 23–33.

УДК 674.04

Василий Юрьевич Чернов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Стандартизация, сертификация и товароведение», chernovvy@volgatech.net
Ильшат Гилязтинович Гайсин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Лесопромышленные и химические технологии», gaysinig@volgatech.net
Евгений Сергеевич Шарапов, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и водоснабжения», sharapoves@volgatech.net
 Поволжский государственный технологический университет, Россия, г. Йошкар-Ола

Пути интенсификации сушки неизмельченных древесных отходов для последующей термической модификации или использования в качестве топлива

***Аннотация.** Рассмотрены вопросы интенсификации процесса сушки неизмельченных древесных отходов и разработаны технологические подходы и технические решения ускоренной высокопроизводительной сушки древесного сырья для производства крупного заполнителя термодревбетона. Установлены основные требования к качеству, производительности и эффективности процесса. Разработаны общие технико-технологические решения для интенсификации процесса сушки, основанные на использовании топочных газов. Сформулированы задачи для их реализации.*

***Ключевые слова:** заполнитель термодревбетон, интенсификация процесса сушки древесины, неизмельченные древесные отходы, топочные газы.*

Intensification of drying of non-grinded wood waste for subsequent thermal modification or energy use

Vasilii Yu. Chernov, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of Standardization, Certification and Commodity Science, chernovvy@volgatech.net
Ilshat G. Gaisin, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry and Chemical Technologies, gaysinig@volgatech.net
Evgeny S. Sharapov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor of the Department of Building Structures and Water Supply, sharapoves@volgatech.net
 Volga State Technological University, Russia, Yoshkar-Ola

***Abstract.** The article refers to intensification of the drying process of non-grinded wood waste based on the use of flue gases. New technological approaches and technical solutions for accelerated drying of wood for the production of thermo-wood-concrete as new building material were presented. Basic requirements for the quality, productivity and efficiency of the wood drying process for wood modification were established.*

***Keywords:** thermo-wood-concrete filler, intensification of the wood drying process, non-grinded wood waste, flue gases.*

Процесс сушки древесины является неотъемлемой частью большинства деревообрабатывающих производств. Правильное высушивание пиломатериалов является залогом получения качественной строганной, профильной, клееной и др. продукции. В случае нарушения технологии возникают различные дефекты, наиболее нежелательными и приносящими наибольший экономический ущерб являются трещины и покоробленности.

Наряду с тем, сушка древесины может иметь востребованность, казалось бы, для незначительных, а порой и не нужных, таких как низкосортные пиломатериалы, вторичные материалы лесопиления и деревообработки, являющихся неизмельченными отходами.

В деревообработке отходы зачастую используются в качестве топлива как для отдельных котельных установок, так и для современных конвективных сушильных камер. Например, технология и оборудование для гидротермической обработки Amarant Standard Technology (AST) – термической модификации древесины Научно-производственного объединения «МариТермоДревИндустрия» (НПО «МТДИ») основаны на использовании твердого топлива, в том числе кусковых отходов лесопиления и деревообработки в качестве одного из основных источников энергии для парообразования и нагрева агента обработки [5]. В связи с этим удалось повысить конкурентоспособность путем значительного снижения стоимости термической модификации. При этом возникают проблемы использования увлажненных или сырых отходов. Они связаны с тем, что в основном их получают в процессе продольной распиловки сырых лесоматериалов и пиломатериалов, а также при их складировании на открытых площадках, которые не защищены от воздействия внешних условий.

Эти проблемы выражаются в следующем:

1) снижается количество тепловой энергии выделяемой в процессе горения, как результат процесс замедляется по динамике набора температуры внутренней среды (агента обработки) и по общей длительности;

2) происходит существенное увеличение потребления отходов – до 30 % и выше.

Проблемы могут быть решены путем заблаговременного запаса, складирования и хранения штабелей отходов. Однако исходя из имеющейся практики следует учесть тот факт, что на естественную сушку сырых отходов до необходимой влажности (примерно до 20 %) может потребоваться не менее двух теплых летних месяцев средней полосы России. Отходы, заготовленные с октября по ноябрь и с марта по апрель в виду сочетания низких температур и наличия природных осадков, лишь незначительно подсыхают. В зимние месяцы при отрицательных температурах древесине не высыхает.

Также при таких длительных сроках хранения требуется обеспечение большого запаса материала, что особенно в летние месяцы и в другие теплые и сухие периоды года имеют значительные риски возгорания и пожара.

В-третьих, для защиты от воздействия внешних условий после высушивания требуется постройка закрытых складов (ангаров).

Сегодня на базе ФГБОУ ВО «ПГТУ» за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00098, <https://rscf.ru/project/22-79-00098> осуществляются разработка и исследование проекта создания нового эффективного композитного материала на основе термически модифицированного древесного заполнителя и гидравлических вяжущих веществ, который получил название термодревбетон (ТДБ) [6]. Проект относится к рациональному природопользованию, поскольку в качестве сырья для производства термически модифицированного заполнителя используются отходы лесопиления и низкосортная древесина.

При промышленном внедрении технологии производства данного материала возникают те же проблемы, что и использовании в качестве топлива обычных древесных отходов – повышенная влажность. Однако поскольку здесь это не только топливо, а главным образом это один из основных компонентов получаемого строительного материала, то его потребление будет существенно больше. По предварительным расчетам для производства 1 м³ термодревбетона объем термически модифицированных кусковых отходов в неизмельченном виде потребуется 0,6...0,7 м³ для производства заполнителя, а также в среднем около 0,3 м³ сухой древесины – в качестве топлива. Таким образом суммарно отходов и низкосортной древесины 0,9...1 м³.

При этом конечная влажность сырья для термической модификации должна быть еще ниже и составлять не более 8...10 %, что соответствует естественной сушке до 3-х теплых летних месяцев.

Опираясь на сравнительный анализ продаж и прогнозирование объема коммерческой реализации только в самом начале реализации ежемесячный объем производства тер-

модревбетона может составлять порядка несколько сотен кубических метров и постоянно расти. При таком объеме и закономерности остро встает проблема разработки путей интенсификации сушки неизмельченных древесных отходов со следующими основными требованиями:

- 1) незначительное удорожание всего технологического процесса (до 10...15 %);
- 2) процесс сушки до влажности не более 10 % не должен превышать 2 дня, что соответствует общему времени термической модификации, указанной выше технологии;
- 3) возможность быстрой механизированной перегрузки неизмельченных древесных отходов с использованием различных подъемно-транспортных машин.

При этом в отличие от стандартной сушки пиломатериалов отсутствуют требования:

- 1) по сохранности целостности, форм и размеров, а также наличию трещин и иных пороков максимально интенсивной высокотемпературной сушки;
- 2) по сохранности чистоты поверхности под воздействием различных агентов сушки, за исключением засоренности, не относящейся непосредственно к древесине (загрязнение химическими веществами, маслами и техническим отходами, грязью и т. д.).

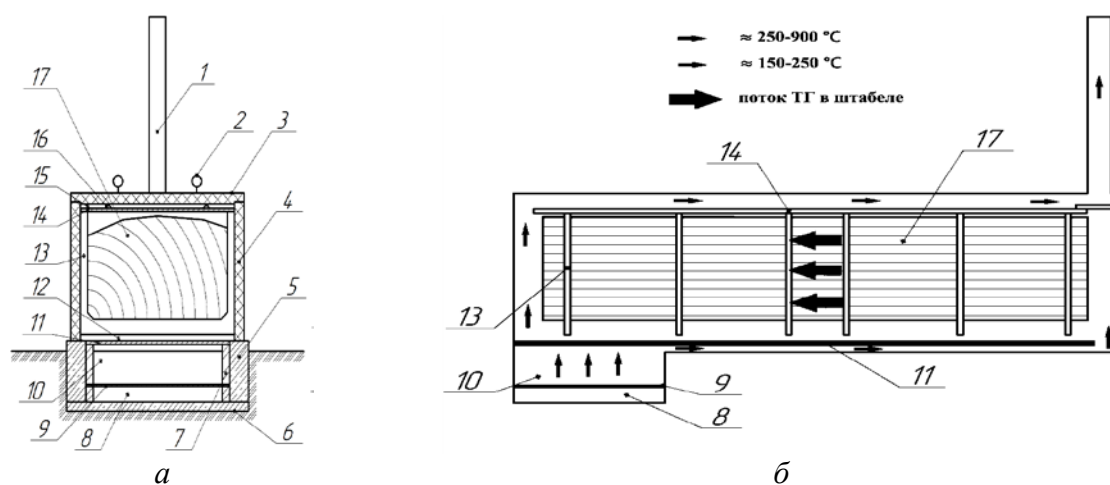


Рисунок 1 – Конструкция сушильной установки (а) и принципиальная схема (б) прохождения потоков топочных газов (ТГ) при работе отдельной сушильной установки:

- 1 – дымоходная труба; 2 – монтажные (подъемные) петли крышки; 3 – съемная верхняя крышка; 4 – двойные металлические стенки установки с минеральным (каменным) утеплителем по середине; 5 – бетонный фундамент; 6 – бетонная фундаментная плита; 7 – огнеупорная каменная кладка; 8 – зольник; 9 – колосниковая стальная плита (колосники); 10 – топка; 11 – дно (экран) стальное листовое; 12 – топочный канал ТГ; 13 – U-образные стойки; 14 – верхний экран; 15 – выходной канал; 16 – монтажные (подъемные) петли верхнего экрана; 17 – штабель неизмельченных древесных отходов

Анализ существующих технологий сушки [1, 3, 4], а также разработок в области повышения их эффективности [2, 7–9] показал, что при всем многообразии имеющиеся технико-технологические решения либо частично, либо вовсе невозможно выполнить установленные выше требования. Однако наиболее подходящими, которые можно взять за прототип являются разработки в области сушки древесины в среде топочных газов. Здесь предлагается использовать принцип равномерного разогрева внутренних стенок камеры теплом от сгорания, реализуемой в технологии и оборудовании AST с дополнительной естественным сквозным прохождением топочных газов через штабель. Принципиальная схема подобной камеры представлена на рисунке 1.

Штабель неизмельченных древесных отходов формируется в этом случае на отдельной площадке обвязывается стальными канатными стропами удавкой так, чтобы при подъ-

еме сдавливался под собственным весом. При этом необходимо при формировании штабеля разделить по высоте прокладками не менее 25 мм толщиной на части с шагом не более 500 мм для лучшей естественной вентиляции внутри него. Загрузка и выгрузка может осуществляться вертикально кран балкой, козловым, мостовым или башенным кранами, также погрузчиками фронтальными или вилочными. При необходимости подъезд с боку к установке может быть оборудован эстакадой.

Также по рекомендациям НПО «МТДИ» применение может найти принцип перенаправления топочных газов после автоклавы для термической модификации в сушильную камеру. Таким образом, остатки тепла после прогрева автоклавной установки, выходящие напрямую в дымоход, не растворятся в окружающей среде, а послужат агентом сушки.

Принципиальная схема технического решения представлена на рисунке 2.

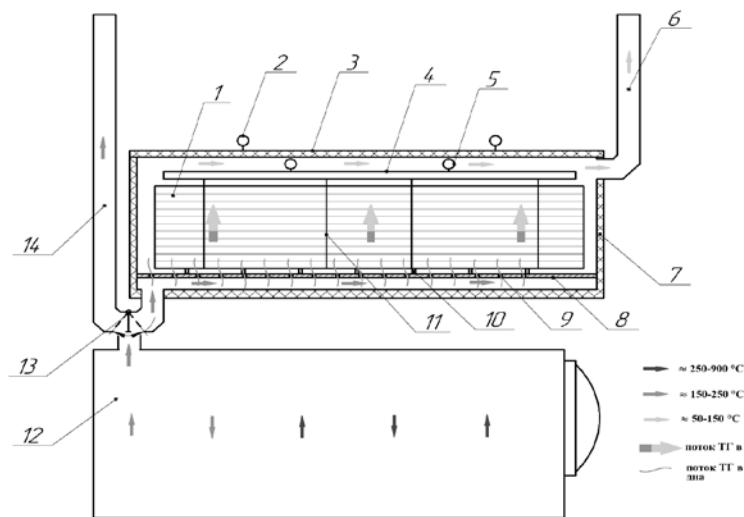


Рисунок 2 – Принципиальная схема прохождения потоков топочных газов (ТГ) при работе сушильной установки совместно с автоклавной установкой для термической обработки древесины АСТ:

- 1 – штабель неизмельченных древесных отходов; 2 – монтажная (подъемная) петля крышки; 3 – съемная верхняя крышка; 4 – траверса; 5 – монтажная (подъемная) петля траверсы; 6 – дымоходная труба; 7 – двойные металлические стенки установки с минеральным (каменным) утеплителем по середине; 8 – дно; 9 – вентиляционные технологические отверстия (щели); 10 – поперечные опоры; 11 – стальные канаты для подъема штабеля; 12 – автоклавная установка термической модификации древесины; 13 – запорно-регулирующая арматура для переключения направления ТГ; 14 – дымоходная труба прямоточного выхода ТГ

Преимущество данной схемы может заключаться в отсутствии дополнительного расхода топлива для работы сушильной установки и как следствие высокой экономической эффективности. Загрузка и выгрузка штабеля осуществляется аналогичными способами, как и у первой схемы. Время сушки может быть больше вследствие меньше температуры топочных газов. Однако температура остается достаточно высокой для «супер-интенсивного» режима сушки, при этом снижается существенно риск возгорания.

Представленные направления интенсификации и технические решения могут найти широкое применения и быть эффективными в случае развития как технологии термической модификации АСТ, так и термической модификации в целом. Эти решения могут послужить для разработки проекта и создания многоступенчатой комбинированной промышленной технологии производства термодревбетона и изделий из него. В данной работе представлены общие принципы повышения производительности сушки неизмельченных древесных

отходов. В перспективе планируется более детальная техническая проработка идей с учетом обеспечения необходимой безопасности, управления и контроля технологическими процессами. Следующими этапами являются разработка опытной установки для сушки и ее внедрение в производство термодревбетона, а также выполнение исследований по определению качественных и технологических показателей ее работы.

Библиографический список

1. **Богданов Е. С., Козлов В. А., Пейч Н. Н.** Справочник по сушке древесины: Изд 3-е, перераб. М. : Лесн. пром-сть, 1981. 192 с.
2. **Горностаев В. Н.** Инновационные решения проблемы сушки и пропитки древесины // В сб. : Новое слово в науке: перспективы развития Сборник материалов XI Международной научно-практической конференции. Главный редактор О. Н. Широков. 2017. С. 266–268.
3. **Расев А. И.** Особенности развития техники и технологии сушки пиломатериалов на современном этапе // Лесной вестник. 1998. № 1.
4. ГОСТ 18867-84. Пиломатериалы хвойных пород. Режимы сушки в противоточных камерах непрерывного действия: Дата введения 01.01.85 – URL: <https://pdf.standartgost.ru/catalog/Data2/1/4294852/4294852247.pdf> (дата обращения: 15.04.2023).
5. Пат. 2724421 Российская Федерация. МПК В 27 К 5/00 (2006.01), F 26 В 3/04 (2006.01). Способ и устройство для подготовки и высокотемпературной обработки древесины / В. Ю. Чернов, Ю. В. Чернов, М. С. Чернова. № 2018130890 ; заявл. 27.08.2018 ; опубл. 23.06.2020, 12 с.
6. Пат. 2790390 Российская Федерация МПК С 04 В 18/26 (2006.01), С 04 В 28/04 (2006.01), С 04 В 40/00 (2006.01), С 04 В 111/20 (2006.01). Способ изготовления термодревбетона / В. Ю. Чернов, Ю. В. Чернов, А. С. Разинов, И. Г. Гайсин, Е. С. Шарапов, Е. М. Мальцева. № 2021139396 ; заявл. 27.12.2021 ; опубл. 17.02.2023, 7 с.
7. Обзор современных технологических решений повышения энергоэффективности в процессах сушки пиломатериалов / Р. Р. Сафин, И. Ф. Хакимзянов, П. А. Кайнов, А. Н. Николаев, А. В. Сафина // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 21. С. 50–52.
8. **Сафин Р.Р., Хасаншин Р. Р., Разумов Е. Ю.** Вакуумно-конвективная сушка пиломатериалов: Монография. Казань : ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2009. 260 с. ISBN 978-5-7882-0770-4.
9. Новые подходы к совершенствованию вакуумно-конвективных технологий сушки древесины / Р. Р. Сафин, Р. Р. Хасаншин, Р. Г. Сафин, П. А. Кайнов // Деревообрабатывающая промышленность. 2005. № 5. С. 16–18.

УДК 664.66

Александр Анатольевич Шевцов, доктор технических наук, профессор кафедры «Общепрофессиональные дисциплины», shevalol@rambler.ru

Военно-воздушной академии имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Россия, г. Воронеж

Алексей Викторович Дранников, доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и аппараты пищевых производств», drannikov@list.ru

Яна Петровна Домбровская, кандидаты технических наук, доцент кафедры «Машины и аппараты пищевых производств», yana_dombrovskaya@mail.ru

Дмитрий Сергеевич Китаев, студент, kitaevdm01@mail.ru

Воронежский государственный университет инженерных технологий», Россия, г. Воронеж

Аппаратурно-технологическая схема комплексной переработки травы зверобоя с применением парозжекторной теплонасосной установки

***Аннотация.** В статье описана разработанная линия для приготовления экстракта травы зверобоя, сброженного молочно-кислыми бактериями, которая имеет ряд преимуществ по сравнению с прототипами: позволяет реализовать технологию с максимальной утилизацией и рекуперацией вторичных энергоносителей в замкнутых термодинамических циклах по материальным и тепловым потокам, обеспечивает подготовку теплоносителей разного температурного потенциала с применением парозжекторного теплового насоса, снижает удельные энергозатраты на 10...15 %, повышает надёжность эксплуатации оборудования, максимально снижает выброс отработанных теплоносителей в окружающую атмосферу и повышает экологическую безопасность.*

***Ключевые слова:** экстрагирование, парозжектор, снижение энергозатрат.*

Aleksander A. Shevtsov, Advanced Doctor in Engineering Sciences,

Professor of the Department of General Professional Disciplines

The Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, Russia, Voronezh

Alexey V. Drannikov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor

of the Department "Machines and apparatuses of food production", drannikov@list.ru

Yana P. Dombrovskaya, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor

of the Department "Machines and apparatuses of food production",

yana_dombrovskaya@mail.ru

Dmitry S. Kitaev, Student, kitaevdm01@mail.ru

Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia

Hardware and technological scheme of integrated processing grass st. steam ejector heat pump unit

***Abstract.** The article describes the developed line for the preparation of an extract of the herb St. ensures the preparation of heat carriers of different temperature potential using a steam jet heat pump, reduces specific energy consumption by 10...15%, increases the reliability of equipment operation, minimizes the emission of waste heat carriers into the environment and increases environmental safety.*

***Keywords:** extraction, steam ejector, reduction of energy costs.*

Существуют различные способы получения экстрактов из растительного сырья, которые отличаются природой экстрагента (водой, водно-спиртовой смесью, молочной сывороткой, сжиженными газами), методами физического воздействия (обработка СВЧ, ультразвуком и т. д.).

Недостатком существующих способов является то, что в них не реализованы основные принципы энергосбережения, связанные с организацией замкнутых термодинамических циклов с возможностью рекуперации и утилизации вторичных энергоресурсов, что не создаёт реальных перспектив в снижении энергозатрат. Высокие теплоэнергетические затраты, связанные с нерациональным использованием отработанных теплоносителей и отсутствием рециклов по материальным и тепловым потокам с применением теплонасосных технологий, в частности, парового теплового насоса не позволяют рассматривать известные технологические линии как энергоэффективные.

Учитывая вышесказанное, была разработана технологическая линия приготовления экстракта из травы зверобоя, представленная на рисунке 1.

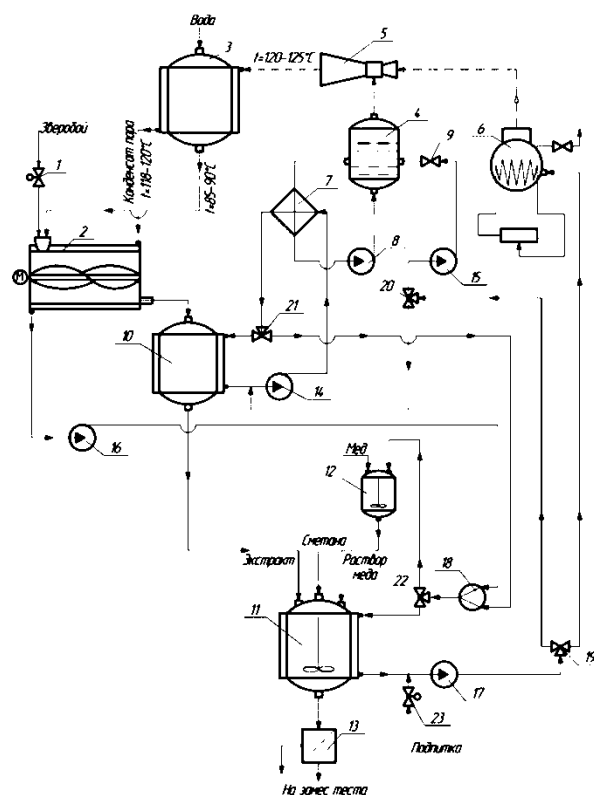


Рисунок 1 – Линия для приготовления экстракта травы зверобоя, сброженного молочно-кислыми бактериями:

- 1, 23 – дозатор; 2 – заварочная машина; 3 – емкость для регулирования горячей воды;
 4 – испаритель; 5 – эжектор; 6 – парогенератор; 7 – холодоприемник;
 8 – рециркуляционный насос; 9 – терморегулирующий вентиль (ТРВ);
 10 – емкость для охлаждения экстракта; 11 – чан для брожения; 12 – смеситель для получения водно-медового раствора; 13 – фильтр готового продукта; 14–17 – насос;
 18 – смеситель потоков; 19–22 – разделитель потоков

Согласно данной схеме предварительно измельченная до размера частиц 100 мкм трава зверобоя через дозатор поступает в заварочную машину куда также поступает предварительно нагретая до 85...90 °С вода в соотношении 1:20. Вода нагревается в емкости с рубашкой, в которую подаётся конденсат пара температурой 118...120 °С из водяной рубашки емкости для приготовления горячей воды.

В заварочной машине в течение 24 ч осуществляется водная экстракция биологически активных веществ. По окончании экстрагирования полученный экстракт подают в емкость для охлаждения экстракта, в которой его охлаждают до температуры 32...34 °С. По окончании охлаждения экстракт перекачивается в чан для брожения, в который из смесителя для получения водно-медового раствора подаётся подогретый до 40 °С раствор меда в количестве 14% к массе воды и сметана 10 жирности в количестве 0,8 % к массе экстракта.

Сбраживание осуществляют при температуре 32...34 °С, при этом процесс сбраживания ведут до достижения значений кислотности 24,0 град и массовой доли сухих веществ 9,7%. По окончании процесса сбраживания полученный экстракт фильтруют через фильтр готового продукта и отправляют на хранение или замес теста.

Для получения горячих и холодных потоков теплоносителей используют парожекторную холодильную установку, работающую в режиме теплового насоса. Высокопотенциальный пар получают в парогенераторе, снабжённом электронагревательными элементами, и под давлением 1,0...1,1 МПа подают в сопло парового эжектора, эжектируя при этом низкопотенциальный пар из испарителя парожекторного теплового насоса, создавая в нем пониженное давление 0,0009...0,001 МПа и температуру воды 5...7 °С.

Кинетическую энергию смеси высокопотенциального и низкопотенциального паров в диффузоре эжектора трансформируют в тепловую энергию рабочего пара, выходящего из эжектора с давлением 0,20...0,22 МПа и температурой 120...125 °С. Полученный рабочий пар подают в паровую рубашку емкости для приготовления горячей воды, которая выполняет функцию конденсатора парожекторного теплового насоса, а образовавшийся конденсат рабочего пара направляют в водяную рубашку заварочной машины. Циркулирующий через холодоприёмник парожекторного теплового насоса, хладагент, посредством рекуперативного теплообмена охлаждает воду до температуры 10 °С, и с помощью разделителя потоков часть её подаётся в водяную рубашку емкости для охлаждения экстракта, а вторая часть с помощью смесителя потоков смешивается с конденсатом из рубашки заварочной машины, перемещаемого насосом с последующей подачей полученной водяной смеси с температурой 40 °С с помощью разделителя потоков в смеситель для получения водно-медового раствора и в рубашку чана для брожения. Отработанную водяную смесь из чана для брожения насосом выводят разделителем потоков по двум потокам, один из которых возвращают в парогенератор, а другой поток делят делителем потоков на две части: одну часть через терморегулирующий вентиль насосом подают в испаритель, а другую часть вместе с отработанной водой после ёмкости для охлаждения экстракта насосом возвращают холодоприёмник.

Представленная линия для приготовления экстракта травы зверобоя, сброженного молочно-кислыми бактериями позволяет решить все поставленные задачи, а именно: реализовать технологию с максимальной утилизацией и рекуперацией вторичных энергоносителей в замкнутых термодинамических циклах по материальным и тепловым потокам; обеспечивает подготовку теплоносителей разного температурного потенциала с применением парожекторного теплового насоса; снижает удельные энергозатраты на 10..15 %; повышает надежность эксплуатации оборудования и максимально снижает выброс отработанных теплоносителей в окружающую атмосферу и повышает экологическую безопасность.

Библиографический список

1. Дранников А. В. Способы получения экстракта травы зверобоя для пищевой промышленности / А. В. Дранников, А. А. Шевцов, Я. П. Домбровская, А. А. Дерканосова, Д. С. Китаев, Н. Л. Клейменова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. Воронеж : Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2022. № 2(92). С. 147–151.

2. Application of water-honey extract of st. John's wort herb to improve biotechnological and rheological properties of wheat dough / A. V. Drannikov, Ya. P. Dombrovskaya, E. V. Belokurova, D. S. Kitaev, A. A. Shevtsov // В сб. : IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials (P2ARM 2021). 2022. С. 012030.

3. Пат. 2779151 Российская Федерация, МПК 7 А 23 L 1/00. Способ приготовления экстракта травы зверобоя, сброженного молочнокислыми бактериями и технологическая линия для его осуществления / Шевцов А. А., Дранников А. В., Дерканосова А. А., Домбровская Я. П., Торшина А. А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий». № 2021128746 ; заявл. 01.10.2021 ; опубл. 31.08.2022.

УДК 664.9.047

Сергей Викторович Шилов, директор, *shilov_hause@mail.ru*

Наталья Алексеевна Орлова, начальник научно-технического отдела, *orlova.tbh@mail.ru*
ООО «Технологии Без Границ», Россия, г. Бийск

Валерий Михайлович Позняковский, заслуженный деятель науки РФ,
доктор биологических наук профессор кафедры «Гигиена», руководитель
НОЦ «Прикладная биотехнология и нутрициология», *pvm1947@bk.ru*
Кемеровский государственный медицинский университет, Россия, г. Кемерово

Технология комбинированной сушки сырья животного происхождения

Аннотация. Рассматривается научно-технический подход при создании продуктов нового формата, который подразумевает использование инновационных технологий, таких как низкотемпературная комбинированная вакуум-импульсная сушка сырья. В работе представлены результаты исследования при подборе технологических режимов комбинированной сушки сырья животного происхождения с определением качественных характеристик разработанных продуктов.

Ключевые слова: вакуум-импульсная сушка, комбинированная сушка, сушильная камера, режимы сушки, характеристики продукта.

Sergey V. Shilov, Director

Natalia A. Orlova, Head of the Scientific and Technical Department
Technologies Without Borders LLC, Russia, Biysk, *orlova.tbh@mail.ru*

Valery M. Poznyakovsky, Honored Scientist of the Russian Federation, Advanced Doctor
in Biological Sciences, Professor of the Department of Hygiene, Head of the Applied
Biotechnology and Nutritional Science Center, *pvm1947@bk.ru*
Kemerovo State Medical University, Kemerovo, Russia

Technology of combined drying of raw materials of animal origin

Abstract. The scientific and technical approach in creating new format products involves the use of technologies such as low-temperature combined vacuum-impulse drying of raw materials. The paper presents the results of a study on the selection of technological modes of combined drying of raw materials of animal origin with the determination of the qualitative characteristics of the products obtained.

Keywords: vacuum impulse drying, combined drying, drying chamber, drying modes, product characteristics.

Использование эксклюзивных способов технологической обработки, которые сохраняют пищевую ценность сырья и улучшают его усвоение организмом, является первостепенной задачей в области переработки сельскохозяйственных ресурсов и производства продуктов здорового питания.

Современные технологии приготовления продуктов здорового питания основаны на использовании принципов современной нутрициологии, в которых отсутствуют консерванты, красители, ароматизаторы, полученные путем химического синтеза. Научно-технический подход при создании продуктов нового формата подразумевает использование новых технологий, таких как низкотемпературная комбинированная вакуум-импульсная сушка сырья.

Предлагаемые ООО «Технологии Без Границ» способы низкотемпературной комбинированной вакуум-импульсной сушки сырья растительного и животного происхождения позволили получать продукты с высокой пищевой ценностью и усвояемостью.

Целью работы является исследование технологии комбинированной сушки сырья животного происхождения с определением качественных характеристик полученных продуктов.

Исследования проводились на оборудовании ООО «Технологии Без Границ» г. Бийск. Технология низкотемпературной комбинированной вакуумной сушки реализована с использованием вакуумно-импульсной сушильной камеры (рисунок 1). Сушильная камера [1] представляет собой герметичную вакуумируемую камеру с крышкой. Технология комбинированной сушки включает комбинацию прогрева продукта снизу кондуктометрическим способом через рубашку рабочей поверхности, и сверху инфракрасным нагревателем, который излучением греет сырье.

Датчики для сбора информации при сушке исследуемых материалов (температуры и давления) располагались на поверхности крышки и на нижней поверхности сушильной камеры. Оборудование, создающее вакуум в камере состоит из вакуумного и водокольцевого насосов, клапанов управления давлением.

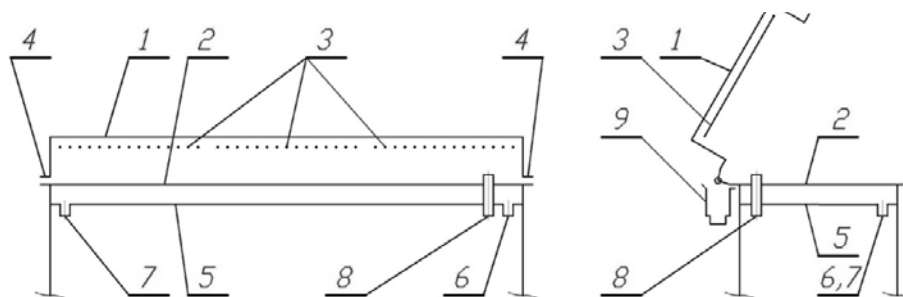


Рисунок 1 – Схематичное изображение сушильной камеры:

1 – герметичная крышка; 2 – рабочая поверхность столешницы; 3 – инфракрасные нагреватели; 4 – прямоугольный фланец с уплотнительной прокладкой; 5 – нагревательная рубашка; 6, 7 – штуцеры подачи теплоносителя; 8 – штуцер вакуумирования

Кондуктивный обогрев сырья, при котором реализуется непосредственный способ передачи энергии от нагревателей к поверхности сырья, является одним из решений повышения эффективности энергоподвода. Показано преимущество этого способа для быстрого прогрева сырья [2]. Установлено, что интенсивный нагрев сырья следует проводить в определенной последовательности изменения параметров. Опытным путем подтверждено, что вакуумная сушка имеет преимущества в уменьшении времени обработки сырья и, как следствие, минимизация потерь активных компонентов в сырье при сушке. Рассматриваемая технология обеспечивает лучшие физико-химические и органолептические показатели [3]. Определяющим фактором в технологии становится контроль параметров обработки при сушке сырья, поэтому необходимо проведение исследований по организации сушильного процесса и разработке алгоритма изменения параметров, влияющих на процесс.

Проведение исследований по определению условий сушки сырья животного происхождения представляется актуальным, поскольку открывает возможности создавать блюда быстрого приготовления на основе продуктов животного происхождения. Исследования проводили на образцах сырого говяжьего фарша с начальной влажностью 70,5 %.

Процесс сушки на выбранном оборудовании изучали при последовательных циклах обработки мясного сырья и определении параметров и циклов управления сушильной камерой. Бланшированное сырье загружали на рабочую поверхность столешницы, далее производился запуск процесса сушки. В процессе сушки последовательно реализуются автоматические операции: закрытие крышки, вакуумирование камеры, кондуктивный нагрев матери-

ала через нагревательную рубашку, инфракрасный нагрев материала сверху, создание дополнительного разрежения и отвод паров влаги в вакуумную магистраль, отключение энергоподвода и выравнивание давления в камере до атмосферного, окончание сушки.

В процессе сушки реализуется метод двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки, предполагающий два этапа процесса обезвоживания. На первом этапе происходит удаление поверхностной влаги конвекцией, температура продукта при этом повышается до установленного значения. После удаления свободной влаги из продукта происходит переключение на вакуумирование, вызывающее градиент давления, который, в свою очередь, приводит к возникновению молярного движения парогазовой смеси внутри продукта, что позволяет снизить температуру продукта и избежать разрушения термолабильных компонентов (в данном случае аминокислот).

Как правило, на практике, один цикл сушки на данном оборудовании занимает до 20 минут в зависимости от свойств продукта. Задачей исследований являлось регулирование времени вакуумирования, мощности и времени инфракрасных нагревателей, глубины вакуума.

В результате подобраны режимы сушки фарша говяжьего с последующим определением показателей качества готового продукта.

Установлены оптимальные режимы работы сушильной камеры для сушки говяжьего фарша: температура рубашки – 75 °С, переход на вакуум – 250 с. Оптимальное количество циклов сушки – 6. При этом варьировали мощность нагревателей и установили следующие параметры (мощность, % – время, с): 80 % – 60 с, 75 % – 240 с, 70 % – 300 с, 65 % – 300 с, 60 % – 240 с.

В результате получен сушеный говяжий фарш, который исследовали на физико-химические показатели и проводили органолептическую оценку полученного продукта. Исследования проведены сотрудниками учебно-научного центра коллективного пользования «Сервисная лаборатория комплексного анализа химических соединений», г. Москва, а также сотрудниками ФГБОУ ВО КемГМУ, г. Кемерово и ФГБОУ ВО БТИ (филиал) АлтГТУ, г. Бийск.

Таблица 1 – Физико-химические и органолептические показатели сушеного говяжьего фарша

Определяемые показатели	Значение
Содержание влаги, %	4,63
Массовая доля общей/ водонерастворимой / водорастворимой золы, %	6,2 / 1,6 / 4,6
Массовая доля жира, %	10,1
Массовая доля белка, %	69,7
Устойчивость к окислению (метод устойчивого окисления) (индукционный период), ч:мин	2:01
Органолептические показатели мяса и продуктов первичного распада белков в бульоне	Мясо – Сумма баллов 35 (макс 45) Бульон сумма баллов 29 (макс 36)
Степени набухания	2,72
Время разваривания	5 мин
Экстрактивность, %	14,17

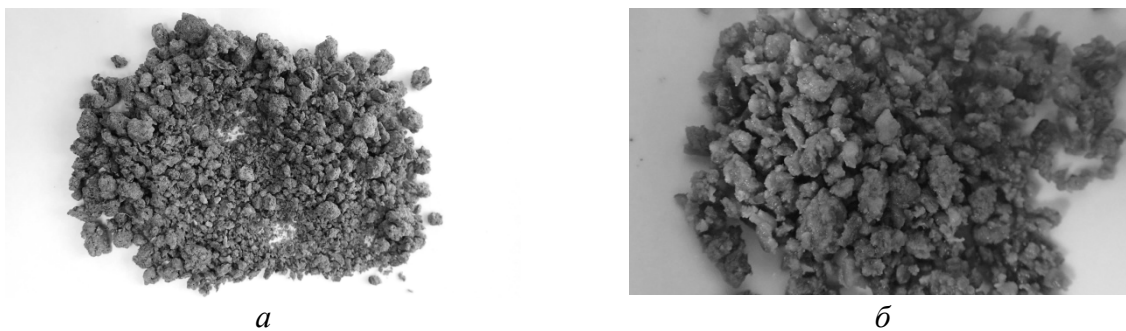


Рисунок 2 – Внешний вид сушеного фарша (а) и разваренного (б)

Результаты исследований физико-химических и органолептических показателей представлены в таблице 1, фото сушеного и разваренного продукта – на рисунке 2.

Предлагаемая комбинированная технология низкотемпературной вакуумно-импульсной сушки продуктов животного происхождения позволяет получить сушеные продукты для блюд быстрого приготовления с высокими качественными характеристиками.

Библиографический список

1. Пат. 202055 РФ, МПК F 26 В 3/04. Сушильная камера для сушки пищевых продуктов / Платицын А. А., Шилов С. В; заявитель и патентообладатель ООО «Технологии Без Границ». № 2020135233 ; заявл. 27.10.2020 ; опубл. 28.01.2021.
2. **Wawrzyniak Pawel, Zbicinski Ireneusz & Sobulska Mariia.** (2017). Applications: Drying of materials. CRC Handbook of Thermal Engineering, Second Edition, 1306–1337. Publisher: CRC Press.
3. **Xu P., Peng X., Yang J., Li X., Zhang H., Jia X., Liu Y., Wang Z. & Zhang Z.** (2021). Effect of vacuum drying and pulsed vacuum drying on drying kinetics and quality of bitter orange (*Citrus aurantium* L.) slices. Journal of Food Processing and Preservation, 45, e16098. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16098>.

УДК 664.8.047

Александр Александрович Платицын, директор по развитию, plantkit@yandex.ru
Наталья Алексеевна Орлова, начальник научно-технического отдела, orlova.tbh@mail.ru
ООО «Технологии Без Границ», Россия, г. Бийск
Валерий Михайлович Позняковский, заслуженный деятель науки РФ,
доктор биологических наук профессор кафедры «Гигиена», руководитель
НОЦ «Прикладная биотехнология и нутрициология», pvm1947@bk.ru
Кемеровский государственный медицинский университет, Россия, г. Кемерово

Разработка циклограммы технологического процесса вакуумно-импульсной сушки

Аннотация. Рассматриваются процессы сушки в вакуумно-импульсных режимах, которые отличаются новизной, поэтому многие вопросы требуют изучения. В статье представлена циклограмма технологического процесса сушки, который проводится в сушильных камерах K1 и K2 двухкамерного вакуум-сушильного комплекса.
Ключевые слова: двухступенчатая сушка, вакуум-импульсная сушка, циклограмма сушки.

Alexander A. Platitsyn, Development Director, plantkit@yandex.ru
Natalia A. Orlova, Head of the Scientific and Technical Department, orlova.tbh@mail.ru
Technologies Without Borders LLC, Russia, Biysk
Valery M. Poznyakovsky, Honored Scientist of the Russian Federation, Advanced Doctor
in Biological Sciences, Professor of the Department of Hygiene, Head of the Applied
Biotechnology and Nutritional Science Center, pvm1947@bk.ru
Kemerovo State Medical University, Kemerovo, Russia

Development of a cyclogram of the technological process of vacuum-pulsed drying

Abstract. The processes of drying in vacuum-pulse modes are considered, which are novel, so many issues need to be studied. The article presents a cyclogram of the technological process of drying, which is carried out in the drying chambers K1 and K2 of a two-chamber vacuum-drying complex.
Keywords: two-stage drying, vacuum impulse drying, drying cycle.

Развитие малых и средних предприятий по производству продукции из овощного сырья требует комплексного подхода к его переработке и сохранению качества. Современные технологии переработки овощной продукции (свеклы, картофеля, тыквы, лука) с сохранением пищевой ценности дают значительный экономический эффект и имеет важное значение для разработки специализированных продуктов здорового питания для различных групп населения. Одним из основных способов переработки овощного сырья является сушка, отвечающая следующим требованиям: высокое качество продукции, низкое энергопотребление производства и доступная стоимость готовой продукции.

Наиболее полно этим требованиям отвечает двухступенчатая сушка, первой ступенью которой является конвективная сушка, второй – вакуумная сушка с чередованием конвективной и вакуумной стадий.

Использование этого способа доминирует над другими видами, так как исключает образование агломератов овощного сырья в первом периоде и позволяет сохранять питательные вещества во втором периоде сушки. При этом уменьшаются время реализации процесса и затраты энергии, сохраняются полезные качества высушиваемого овощного сырья, снижается цена готового продукта. Рассматриваемый способ сушки в настоящее время по-

лучает распространение и требует проведения комплекса научных исследований и промышленных испытаний. Вследствие этого совершенствование технологии и средств двухступенчатой конвективно-вакуумной импульсной сушки (КВИС) овощного сырья является актуальной задачей, представляет научный и практический интерес [1–3].

Продукты, не подвергающиеся стремительной микробиологической порче, желательно высушивать за 24 ч. Если время сушки более 24 часов, то возникают риски изменения структуры, вкуса, цвета и аромата, и сушеный продукт попадает в класс низкого качества.

На основании проведенных исследований установлено, что для получения сушеных продуктов премиум-качества температура сушки должна быть ниже 45 градусов Цельсия. Это возможно, если используется:

- вакуумно-импульсная сушилка (средней длительности, низкотемпературная сушка, 30...45 °С);
- сублимационная сушилка (средней длительности, низкотемпературная сушка, –10 °С).

При оценке характеристик сублимационной сушилки для производства пищевых продуктов необходимо учитывать, что затраты на приобретение этого оборудования до 10 раз выше, а качество продуктов сопоставимо с продуктами, полученными на вакуумно-импульсных сушилках и энергоэффективных камерных атмосферных сушилках.

Таким образом, самые низкие энергозатраты при сушке возможны только при эксплуатации вакуумно-импульсных и камерных конвективных сушилок.

Разработанный комплекс сушильный вакуумно-импульсный КСВИП-2К-5 (далее КСВИП) предназначен для сушки как растительного, так и сырья животного происхождения.

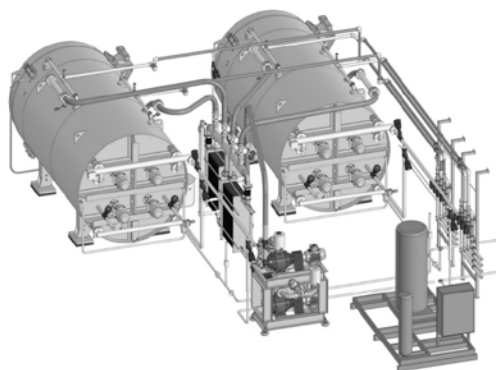


Рисунок 1 – Общий вид комплекса сушильного вакуумно-импульсного

Конструкция сушильной камеры вакуумно-импульсного комплекса защищена патентом РФ №195054 [4].

Циклограмма технологического процесса сушки, который проводится в сушильных камерах К1 и К2 для наглядного представления, формализована и представлена ниже в виде трех формул (1), (2), (3).

Процесс сушки выполняется автоматически по заданному параметрами сценарию. В полном варианте состоит из предварительной процедуры и основного процесса:

$$\text{ПС} = \text{ПП} + \text{ОП}, \quad (1)$$

где ПС – процесс сушки, ПП – предварительная процедура, ОП – основной процесс.

Предварительная процедура описывается условной формулой:

$$\text{ПП} = \langle \text{В Б1} \rangle + \langle \text{В Б2} \rangle + \langle \text{В Б3} \rangle + \langle \text{Б (воздух/пар)} \rangle \quad (2)$$

где «В Б1», «В Б2», «В Б3» – условно называемые «Вакуум перед Бланшированием», этапы стадийного вакуумирования предварительной процедуры; «Б (воздух/пар)» – условно называемый «Бланширование», этап предварительной процедуры, в ходе которого производится нагрев сырья с использованием воздуха, нагреваемого калориферами внутри камеры или подаваемого в сушильную камеру пара и осуществляется бланширование. В зависимости от выбранного технологического режима этапы стадийного вакуумирования и бланширования могут быть включены или пропущены в циклограмме процесса сушки при соответствующих настройках параметров.

Основной процесс описывается условной формулой:

$$\text{ОП} = [\langle \text{В} \rangle + \langle \text{П} \rangle] \times \text{N1} + [\langle \text{В} \rangle + \langle \text{А} \rangle] \times \text{N2} + [\langle \text{В} \rangle + \langle \text{П} \rangle] \times \text{N3} + \langle \text{Вк} \rangle + \langle \text{Ак} \rangle \quad (3)$$

где «В» – условно называемый «Вакуум», этап вакуумирования много раз входит в состав основного процесса; «П» – условно называемый «Пар», этап нагрева сырья с использованием подачи пара в сушильную камеру, N1 – количество повторений последовательности [«В»+«П»]; «А» – условно называемый «Атмосфера», этап нагрева сырья конвективным способом, при помощи воздуха, нагреваемого калориферами внутри сушильной камеры; N2 – количество повторений последовательности [«В»+«А»]; N3 – количество повторений последовательности [«В»+«П»].

В зависимости от выбранного технологического режима блоки [«В»+«П»] и [«В»+«А»] могут быть включены или пропущены в циклограмме процесса сушки.

При любом технологическом режиме завершает основной процесс блок окончания технологического процесса, который состоит из двух этапов: «Вк» условно называемый «Вакуум конечный» – этап удаления остатков пара перед окончанием процесса сушки и «Ак» условно называемый «Атмосфера конечный» – этап сброса вакуума перед окончанием процесса сушки (под вакуумом открыть крышку сушильной камеры не представляется возможным).

Конструктивное и аппаратное оформление сушильного комплекса КСВИП спроектировано с учётом синхронной противофазной работы камер (K1 и K2). Система автоматизации реализует процесс сушки в камерах K1 и K2 синхронно противофазно. Суть вакуумно-импульсного процесса заключается в чередовании этапов (импульсов) вакуумирования, в ходе которых идёт интенсивное удаление влаги и охлаждение сырья и этапов (импульсов) нагрева сырья при атмосферном давлении (конвективно) воздухом либо подаваемым в камеру паром. Синхронный противофазный процесс реализован так, что в K1 вакуум – в K2 атмосфера/пар и наоборот, в K1 атмосфера/пар – в K2 вакуум.

На всем протяжении процесса сушки влага из сырья испаряется, его масса и теплоемкость уменьшаются, поэтому импульсы нагрева и вакуумирования ближе к окончанию процесса становятся всё менее длительными и чередуются всё чаще. Разработанная в рамках данной работы система автоматизации имеет обширный список параметров, предусматривает эту особенность и предлагает широкий выбор возможностей для технологического регулирования процесса.

Этапы нагрева (атмосфера/пар) и вакуумирования определяются соответствующими параметрами и окончание этапов определяется достижением (выполнением) соответствующих условий. В любом случае заранее понятно, что длительности этапов нагрева и вакуумирования не зафиксированы по времени и не равны, следовательно, синхронизация и переключение состояний возможны в момент достижения (выполнения) соответствующих условий окончания этапов в камерах K1 и K2.

Таким образом, в результате проведенных работ по совместным режимам работы двух камер сушильного комплекса установлено, что существует оптимальный уровень вакуумирования, при котором интенсивность испарения влаги из материала, а, следовательно, и производительность сушилки, достигают максимума.

После проведения атмосферной конвективной стадии целесообразно при запуске стадии «В» часть вентиляторов оставить включенными при полной работе вакуумных насосов. На стадии «В + П» периодически, по мере надобности, подается пар в калориферы, чтобы нагреть сырье до требуемой температуры и получить продукт с заданными качественными характеристиками.

Библиографический список

1. **Бурдо О. Г.** Эволюция сушильных установок. Одесса : Полиграф, 2010. 368 с.
2. Перспективы использования порошков фруктов и овощей в общественном питании / Т. А. Джум, Е. В. Щербакова, А. В. Христюк // Научный журнал КубГАУ. 2017. № 128(04). С. 1–14.
3. **Попова И. В.** Совершенствование технологии и средств сушки овощного сырья: Автореф. дис. ... кандидата технических наук / Попова И. В. Мичуринск, 2009. 20 с.
4. Пат. № 195054 РФ, МПК F 26 В 9/06 (2006.01), F 26 В 3/04 (2006.01), F 26 В 5/04 (2006.01) F 26 В 3/04. Камера сушильной установки / Платицын А. А., Шилов С. В.; заявитель и патентообладатель ООО «Технологии Без Границ». № 2019133538, заявл. 22.10.2019 ; опубл. 14.01.2020.

УДК 628.196

Мария Юрьевна Юркина, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Тепломассообменные процессы и установки», YurkinaMY@mpei.ru
Тимур Алексеевич Матухнов, аспирант кафедры
«Тепломассообменные процессы и установки», MatukhnovTA@gmail.com
Национальный исследовательский университет (Московский энергетический институт),
Россия, г. Москва

Экспериментальное исследование влияния турбулизации потока в трубопроводах на образование отложений

Аннотация. В статье рассматривается вопрос влияния турбулизации потока внутри труб на процесс образования отложений в системе горячего водоснабжения теплового пункта и их параметры. В рамках исследования рассматривалось три способа турбулизации потока. Экспериментальный стенд состоял из четырех параллельно соединенных участков труб. Проведены измерения толщины отложений в зависимости от времени, а также изменение гидравлического сопротивления. В работе получены данные о сокращении отложений при сравнении участков с турбулизацией потока с участком без турбулизации, а также представлены графики изменения гидравлического сопротивления по каждому из участков.

Ключевые слова: коррозионные отложения, турбулизация потока, система теплоснабжения, горячее водоснабжение, гидравлическое сопротивление.

Maria Yurkina, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor at Heat and Mass Transfer Processes and Units Department, YurkinaMY@mpei.ru
Timur Matukhnov, Postgraduate at the Department of Heat and Mass Transfer Processes and Units Department, MatukhnovTA@gmail.com
National Research University (Moscow Power Engineering Institute), Russia, Moscow

Experimental study of the effect of flow turbulence in pipelines on the formation of deposits

Abstract. The article discusses the issue of general turbulization of pipe flow within the process of deposit formation in the hot water supply system of a heating point and their parameters. The study considered three ways of flow turbulization. The experimental stand consists of four parallel connected parts of pipes. There is an increase in the thickness of deposits depending on time, as well as a change in hydraulic resistance. The work obtained data on the reduction of deposits in areas with flow turbulization with an area without turbulization, and also presented graphs of changes in hydraulic resistance in each of the areas.

Keywords: corrosion deposits, flow turbulization, heat supply system, hot water supply, hydraulic resistance.

На сегодняшний день проблема образования отложений на теплотехническом оборудовании и трубопроводах остается актуальной, несмотря на имеющийся вклад ученых в изучение данной проблемы. Образование отложений на внутренних поверхностях трубопроводов при их эксплуатации влечет за собой ряд негативных последствий таких как увеличение гидравлического сопротивления, которое приводит к нарушению гидравлического режима работы системы, нехватке напора, нарушению балансировки системы, увеличение термического сопротивления, которое приводит к снижению коэффициента теплопередачи,

разрушение теплообменной поверхности трубопровода за счет коррозии металла, и как следствие утечки теплоносителя и рост потерь тепловой энергии.

В литературных источниках определенное количество работ посвящены изучению влияния турбулизаторов на образование отложений, однако большинство из них в своих работах в качестве интенсификатора теплообмена рассматривают исключительно кольцевые турбулизаторы. Многие авторы, такие как Дрейцер Г. А., Дзюбенко Б. В., Калинин Э. К., Ярхо С. А., Якименко Р. И., Лобанов И. Е., и другие изучали влияние турбулизаторов на гидродинамику и интенсификацию теплообмена [1–3]. В работах [4, 5] проводились исследования по изучению отложения солей в трубах с кольцевыми турбулизаторами. Авторы отмечают, что наличие турбулизаторов в 1,5–5 раз снижают образование солеотложений на теплообменных поверхностях трубопроводов, при этом отложения тем меньше, чем больше высота диафрагм или глубина канавок и меньше шаг. В работе [4] автором сделан вывод, что при течении воды жесткостью до 20 мг×экв/л в трубах с диафрагмами за 100 ч работы гидравлическое сопротивление почти не изменилось, при этом для трубы без турбулизатора сопротивление выросло на 25 %. В результате экспериментальных исследований было показано, что в трубах с кольцевыми турбулизаторами образовалось отложений на 30 % меньше, чем в трубах без турбулизатора, что позволяет увеличить ресурс работы теплообменного аппарата в 2 раза [5].

Таким образом, на текущий момент системных исследований по влиянию на образование отложений различных турбулизаторов потока не проводилось, при этом имеются отдельные данные о влиянии турбулизации на возникновение отложений солей жесткости.

В связи с вышесказанным целью исследования являлось определение влияния турбулизации потока на образование коррозионных отложений путем проведения натурных экспериментов.

Объектом исследования является трубопровод системы горячего водоснабжения (далее – ГВС) центрального теплового пункта, расположенного в городе Москва. В качестве теплоносителя выступает вода. Система ГВС является закрытой и состоит из двух последовательных ступеней подготовки, в качестве которых установлены кожухотрубные теплообменные аппараты.

Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментального стенда

Опытные образцы выполнены из материала марки Сталь 20. Параметры исследуемых образцов приведены ниже (таблица 1). К каждому участку исследуемых трубопроводов последовательно присоединены трубопроводы с аналогичными параметрами без турбулизатора.

Таблица 1 – Параметры исследуемых образцов

Устройство турбулизации	Отсутствует	Пружинный турбулизатор	Ленточный турбулизатор	Винтовая накатка
Гидравлический диаметр, мм	17,00	14,63	13,54	13,85
Толщина стенки, мм	2,20	2,20	2,20	2,20
Шаг турбулизатора, мм	–	5,00	55,00	15,50
Ширина/диаметр турбулизатора, мм	–	14,40	14,40	–
Толщина турбулизатора/канавки, мм	–	3,00	2,50	2,80
Глубина канавки, мм	–	–	–	2,00
Длина, мм	500	500	500	500

Для обеспечения одинакового расхода воды через каждый исследуемый участок предусмотрены балансировочные краны. В рамках исследования осуществлялось измерение и регистрация следующих параметров:

- измерение давления с помощью датчиков избыточного давления СДВ-И-1,6 МПа-0,5-4-20мА-M20x1,5, предел погрешности 0,5 %;
- температура теплоносителя на входе стенда измеряется с помощью датчика температуры Орион-16-100-ГЗМ20-0,5, предел погрешности 0,5 %;
- для определения расхода воды используются расходомеры Itelma WFW24.D080 с импульсным выходом, предел погрешности измерения 2 %.

Общее время работы составило 2 131 ч. Параметры работы системы изменялись во времени, так как экспериментальный стенд являлся элементом действующей системы ГВС. Средневзвешенное значение температуры составило 61 °С, а расхода – 0,13 м³/ч на каждом участке. Характер потока всех исследуемых образцов является переходным или турбулентным.

В завершении работы экспериментального стенда производился отбор проб воды после каждого исследуемого участка трубопровода при обеспечении одинакового расхода, который показал увеличение содержания железа в воде, что указывает на смыв образовавшихся частиц железа со стенок исследуемых трубопроводов. Смыв частиц на участке с ленточным турбулизатором в 2,15 раз больше, чем на участке без турбулизатора, смыв на участке с накаткой больше в 1,84 раза, а на участке с пружинным турбулизатором в 1,13 раз.

Во всех исследуемых образцах отложения имеют одинаковую твердую неоднородную структуру. Толщина отложений представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Толщина отложений

Устройство турбулизации	Участки с турбулизацией	Участки после турбулизации
отсутствует	2,20	2,03
пружинный турбулизатор	2,03	2,71
ленточный турбулизатор	1,58	1,71
винтовая накатка	1,71	1,96

В соответствии с полученными данными, видно, что турбулизации потока способствует сокращению толщины отложений на участке турбулизации, при этом на участках после турбулизации наблюдается не только снижение, но и рост толщины отложений относительно участка без турбулизации.

Для участков после турбулизации была измерена масса отложений, содержащих влагу и сухих, и рассчитан показатель пористости (таблица 3).

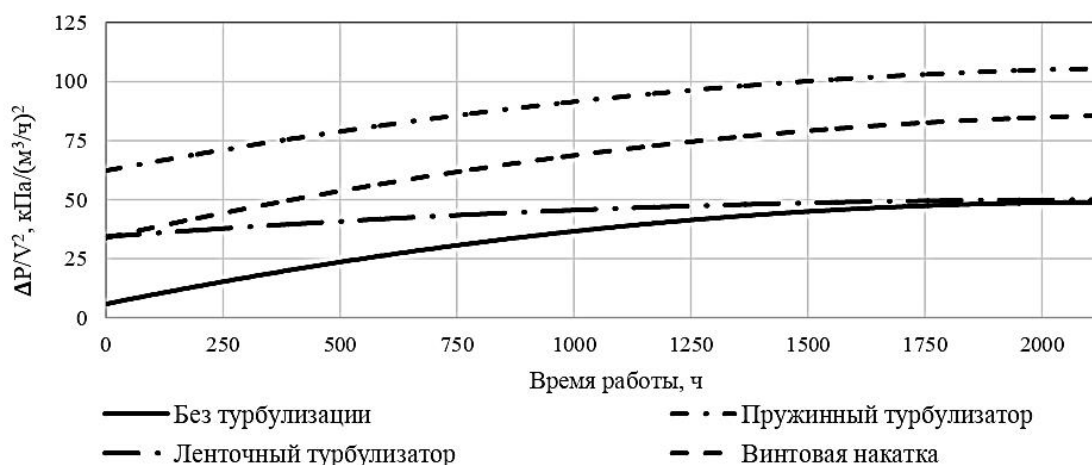
Таблица 3 – Масса и пористость отложений на участках после турбулизации

Показатель	Отсутствует	Пружинный турбулизатор	Ленточный турбулизатор	Винтовая накатка
Масса отложений, содержащих влагу, на единицу поверхности трубы, г/м ²	968,64	1277,30	1084,39	1393,05
Масса сухих отложений на единицу поверхности трубы, г/м ²	659,97	891,47	737,14	1045,81
Коэффициент пористости отложений, %	8%	8%	11%	10%

В связи с изменением расходов через исследуемые участки при образовании отложений график изменения гидравлического сопротивления приведен к квадрату расхода (рисунок 2).

Как видно из графика наибольшее увеличение гидравлического сопротивления происходит на участке без турбулизации в 8,4 раза и к 2 131 часам соответствует сопротивлению на участке с ленточным турбулизатором. Наименьшее увеличение гидравлического сопротивления на участке с ленточным турбулизатором в 1,5 раза, а на участках с пружинным турбулизатором и накаткой увеличение составило 1,7 и 2,5 раз соответственно.

Изучив воздействие различных турбулизаторов потока теплоносителя, можно заключить, что в условиях данного эксперимента применение турбулизаторов приводит к снижению толщины слоя отложений на внутренней поверхности трубопровода, при этом основной причиной является смыв образовавшихся частиц.

**Рисунок 2 – График изменения гидравлического сопротивления**

Таким образом, применение ленточного турбулизатора приводит к уменьшению толщины слоя отложений на 28 % и сокращению роста гидравлического сопротивления в 5,8 раз, относительно трубопровода без турбулизации, применение накатки сокращает толщину на 22 % и в 3,3 раза уменьшает рост сопротивления и пружинный турбулизатор – 7 % и 4,9 раз. При этом после участков турбулизации наблюдается разнонаправленный эффект в части толщины отложений.

Получены значения пористости отложений на участках после турбулизации, которые составляют 8...12 %.

Библиографический список

1. Дрейцер Г. А., Дзюбенко Б. В., Якименко Р. И. Интенсификация теплообмена и анализ методов сравнения теплогидравлической эффективности теплопередающих поверх-

ностей // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. М. : МЭИ. 1998. Т.6, С. 99–102.

2. **Дрейцер Г. А., Лобанов И. Е.** Предельная интенсификация теплообмена в трубах за счет искусственной турбулизации потока // ИФЖ. 2003. Т.76, № 1. С. 46–51.

3. **Калинин Э. К., Дрейцер Г. А., Ярхо С. А.** Интенсификация теплообмена в каналах. М. : Машиностроение, 1990. 200 с.

4. **Дрейцер Г. А.** Исследования солеотложений при течении воды с повышенной карбонатной жесткостью в каналах с дискретными турбулизаторами // Теплоэнергетика. 1996. № 3. С. 30–35.

5. **Муравьев А. В.** Моделирование процесса образования отложений в каналах энергетических установок с кольцевыми турбулизаторами: Дис. ... кандидата технических наук : 01.04.14; 05.14.04 / А. В. Муравьев. Воронеж , 2009. 147 с.

6. **Мерецкий А. М., Белик В. В.** Основы электрохимической термодинамики: учебное пособие. М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2011. 179 с.

СЕКЦИЯ 3.

**ТЕПЛОМАССООБМЕН ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ
И ЭКСПЛУАТАЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

УДК 536.212.3

Сергей Викторович Федосов, академик РААСН, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и организация строительного производства», FedosovSV@mgsu.ru
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, г. Москва

Максим Олегович Баканов, советник РААСН, доктор технических наук, доцент, начальник учебно-научного комплекса «Пожаротушение», mask-13@mail.ru

Илья Александрович Кузнецов, научный сотрудник научно-исследовательского отделения учебно-научного комплекса «Пожаротушение», ikuz1999@list.ru
Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Россия, г. Иваново

**Моделирование нелинейной пространственной
и временной динамики процессов теплопереноса на стадии отжига пеностекла**

***Аннотация.** В настоящей работе рассмотрены вопросы разработки математической модели явлений нелинейной динамики теплопереноса на стадии изотермической выдержки пеностекла с использованием метода «микропроцессов». Излагаются предпосылки, на основе которых построены теоретические зависимости для определения изменений безразмерной температуры от числа Фурье в пеностекле при его быстром остывании с учетом данных, полученных термоэлектрическими преобразователями в различных точках контроля. На основе данных, полученных в ходе экспериментального исследования при быстром остывании пеностекольного блока, представлены зависимости изменения температуры в структуре материала. Показано, что этап отжига в технологии пеностекла целесообразно рассматривать как нестационарный процесс, с учетом решения краевых задач теплопереноса, обусловленных влиянием коэффициентов переноса: теплопроводности от потенциалов переноса. Проведенные исследования позволили определить зависимость, которая обуславливает проведение исследований особенностей распределения показателей температуры в различных точках контроля в блоке пеностекла и оценить сходимость функциональной зависимости между временем и температурой в заданных точках по результатам экспериментальных данных.*

***Ключевые слова:** пеностекло, термическая обработка, теплоперенос, моделирование.*

Sergey V. Fedosov, Academician of the RAASN, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor of the Department Technology and Organization of Construction Production, FedosovSV@mgsu.ru

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia, Moscow

Maxim O. Bakanov, Advisor of the RAASN, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Educational and Scientific Complex Firefighting, mask-13@mail.ru

Илья А. Kuznetsov, Researcher of the Research Department of the Educational and Scientific Complex Firefighting, ikuz1999@list.ru

Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Russia, Ivanovo

**Simulation of nonlinear spatial and time dynamics
of heat transfer processes at the stage of foam glass annealing**

Abstract. *In this paper, the issues of developing a mathematical model of the phenomena of nonlinear dynamics of heat transfer at the stage of isothermal holding of foam glass using the “microprocesses” method are considered. The prerequisites are presented, on the basis of which theoretical dependences are constructed to determine the changes in the dimensionless temperature on the Fourier number in foam glass during its rapid cooling, taking into account the data obtained by thermoelectric converters at various points of control. Based on the data obtained in the course of an experimental study during the rapid cooling of the foam glass block, the dependences of temperature changes in the structure of the material are presented. It is shown that the stage of annealing in foam glass technology should be considered as a non-stationary process, taking into account the solution of boundary problems of heat transfer, due to the influence of transfer coefficients: thermal conductivity from transfer potentials. The conducted studies made it possible to determine the dependence that determines the study of the features of the distribution of temperature indicators at various control points in the foam glass block and to evaluate the convergence of the functional dependence between time and temperature at given points based on the results of experimental data.*

Keywords: *foam glass, heat treatment, heat transfer, modeling.*

Нестационарная теплопередача характеризуется непрерывным изменением температуры нагретого (охлаждаемого) материала во времени. При рассмотрении простых случаев, когда тепловой поток движется в одном направлении, дифференциальное уравнение теплопроводности решается с применением метода конечных разностей [1].

Известны решения уравнения теплопереноса методом разделения переменных в однородных и изотропных телах простой формы, подвергающихся процессам охлаждения или нагрева без изменения фазы и с внутренним источником тепла, который является линейной функцией температуры и подчиняется однородным граничным условиям III-го рода. Решение задается суммой бесконечного ряда Фурье [2, 3].

Ценность решений краевых задач теплопереноса в высокой степени определяется экспериментальными данными по зависимостям коэффициентов переноса и в первую очередь: теплопроводности от потенциалов переноса [4]. Исторически в отечественной науке существуют и развиваются два основных направления: «Зональный» метод и метод «микропроцессов» [5–7].

Для оценки динамики температурных показателей при быстром остывании блока пеностекла необходимо установить допустимые пределы изменения показателей температуры в исследуемых точках контроля и оценить влияние факторов, которые связаны с внешними условиями функционирования отдельных составляющих, что представляет собой суть натурного эксперимента. Мы предполагаем, что с учетом адекватного описания моделью процесса быстрого охлаждения блока пеностекла появятся основания для дальнейшего использования метода при моделировании других стадий процесса [8, 9].

Для проведения вычислительного и натурного эксперимента блок из пеностекла был снят с конвейера на стадии извлечения блоков из форм (станция извлечения) и размещен на поддоне (на воздухе).

Как показано на графиках (рисунок 1), в процессе самопроизвольного остывания пеностеклянного блока показатели температур на поверхности и в центре демонстрируют схожую динамику с наличием устойчивой разностной привязки. Данный факт свидетельствует о том, что имеет место быть сложный процесс переноса тепла [10, 11]. Исходные условия остывания и взаимодействие внешних границ пеностеклянного блока с окружающим воздухом не привели к резкому понижению температуры на его границах вследствие замкнутой структуры пор, что можно сказать и о показателях температуры в центре блока [12–14].

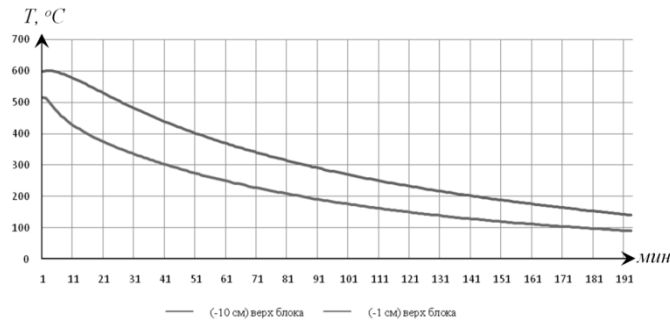


Рисунок 1 – Зависимость температуры в точках № 1 и № 2 от времени в пеностеклянном блоке

В общем случае краевые задачи переноса теплоты могут быть представлены нелинейными неоднородными дифференциальными уравнениями параболического типа в частных производных.

Краевая задача теплопроводности для координаты x :

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

начальное условие:

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

граничные условия, соответственно, первого и второго рода:

$$t(x, \tau)|_{x=0} = t_n, \quad \left. \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\frac{L}{2}} = 0. \quad (3)$$

Начальное условие (2) показывает, что в момент времени, принимаемый за начало отсчета, в структуре пеностекла имеется произвольное распределение температур по координате, которое должно иметь аналитическое описание.

Граничное условие (3) отражает тот факт, что в зоне от которой отсчитывается координата x , температуры одинаковы. Условие (3) показывает, что задача может рассматриваться как симметричная. Требуется найти решение сформулированных задач (1)-(3).

Вводим безразмерные переменные (3). И тогда задача (1)-(3) примет вид (4)-(6):

$$T(\bar{x}, Fo) = \frac{t(x, \tau) - t_0}{t_n - t_0}, \quad Fo = \frac{a\tau}{(L/2)^2}, \quad \bar{x} = \frac{x}{L/2}. \quad (4)$$

Краевая задача теплопроводности для координаты x с учетом безразмерных переменных:

$$\frac{\partial T(\bar{x}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}^2}, \quad Fo > 0, \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1. \quad (5)$$

Начальное условие задачи теплопроводности для координаты x с учетом безразмерных переменных:

$$T(\bar{x}, Fo) = \frac{t(x, \tau) - t_0}{t_n - t_0} = T_0(\bar{x}). \quad (6)$$

Граничные условия задачи теплопроводности для координаты x с учетом безразмерных переменных:

$$T(\bar{x}, Fo) \Big|_{\bar{x}=0} = \frac{t_n - t_0}{t_n - t_0} = 1; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=1} = 0. \quad (8)$$

Решение краевой задачи теплопроводности следует выполнить методом интегрального преобразования Лапласа. Окончательное решение краевой задачи теплопроводности представлено формулой (9):

$$T(\bar{x}, Fo) = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] + \\ + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \bar{x} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right]. \quad (9)$$

Преобразуем уравнение (9) в размерный вид с учетом уравнения (4) и получим уравнение (10):

$$t(x, \tau) = t_n - (t_n - t_0) \cdot \left[\frac{4}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \cdot \bar{x} \right] \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] + \right. \\ \left. + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \cdot \bar{x} \right] \cdot \int_0^1 T_0(\xi) \cdot \sin \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \cdot \xi \right] d\xi \cdot \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 Fo \right] \right]. \quad (10)$$

Для реализации численного моделирования принимаем, что начальная температура пеностеклянного блока 600 ± 10 °С. Температура поверхности 25 ± 5 °С соответствует температуре воздуха в цехе в момент проведения эксперимента.

Расчеты для точки контроля № 1 проводим на момент времени 1 минута, расчетное значение числа Фурье в указанный момент времени принимаем равным 0,001. По результатам расчетов строим графическую зависимость распределения показателей температуры в пеностеклянном блоке.

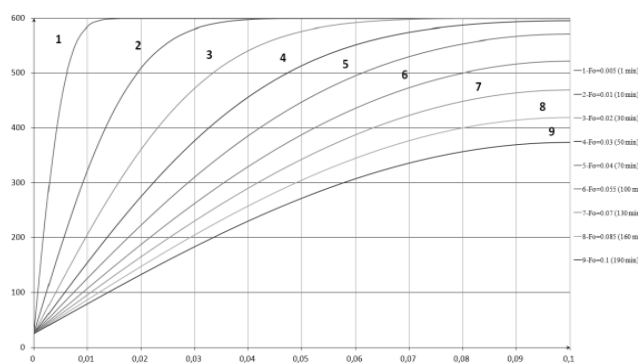


Рисунок 2 – График распределения температурных полей на поверхности пеностекла при его быстром остывании в точке контроля № 1

Для наглядности строим общую функциональную зависимость распределения температурных полей с 1 по 90 мин (рисунок 2).

Расчеты для точки контроля № 2 проводим на момент времени 1 мин, расчетное значение числа Фурье в указанный момент времени равен 0,005. Отличие значений числа Фурье, по сравнению с поверхностью, связано с тем, что градиент температур направлен от центра не только в рассматриваемом направлении, но и еще в трех других направлениях, поэтому, в отличие от поверхности, скорость изменения температуры будет выше. В наших

расчетах мы принимали его выше в 3 раза. По результатам расчета строим график распределения показателей температуры в пеностекляном блоке (рисунок 3).

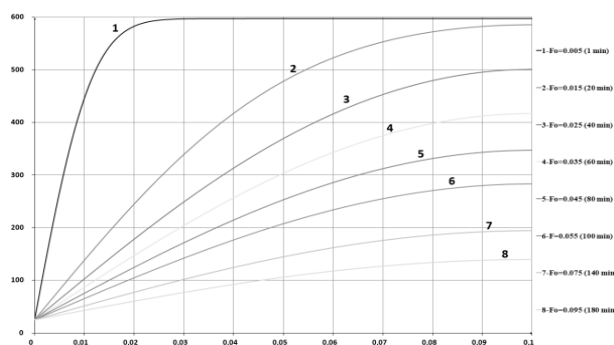


Рисунок 3 – График распределения температурных полей в центре пеностекла при его быстром в точке контроля № 2

Как видно из графиков изменения расчетных и экспериментальных значений показателей температуры, при остывании блока в точке контроля 2 см от поверхности в течение 190 мин (рисунок 4) динамика показателей температуры имеет нелинейный вид, что свидетельствует о наличии области интенсивного остывания и области стабилизации температуры. Наиболее интенсивное остывание наблюдается в промежутках времени от 0 до 50 с, далее наблюдается относительная стабилизация температуры.

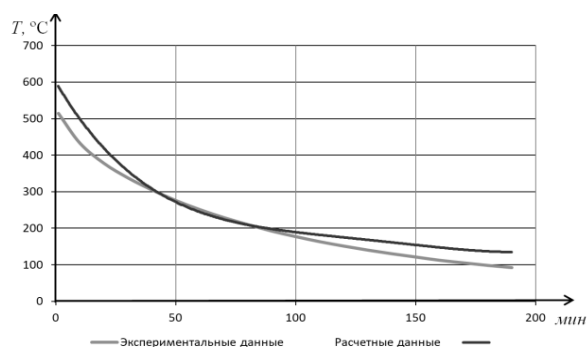


Рисунок 4 – График изменения показателей температуры при быстром остывании пеностекла в точке контроля для центра в течение 190 мин

На графиках изменения расчетных и экспериментальных значений показателей температуры при остывании блока в точке контроля для центра в течение 190 мин (рисунок 5) динамика показателей температуры также носит нелинейный характер, что свидетельствует о сложном теплообмене в центре пеностеклянного блока. Наблюдается передача тепла теплопроводностью (стенки пор), а также конвекцией (газовая фаза внутри пор). Ключевое влияние на особенности теплообмена в центре пеностеклянного блока оказывает замкнутая структура пор внутри материала.

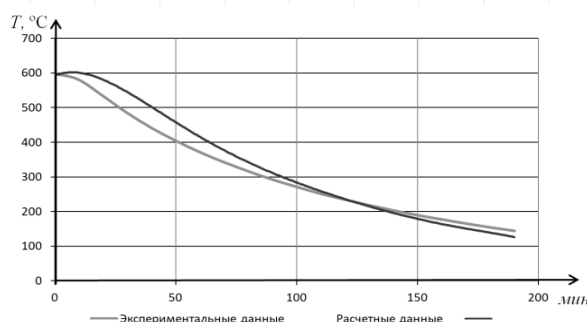


Рисунок 5 – График изменения показателей температуры при быстром остывании пеностекла в точке контроля для поверхности в течение 190 мин

В результате исследования разработана математическая модель теплопереноса на стадии быстрого остывания пеностеклянного блока, которая позволяет провести исследование особенностей распределения показателей температуры блока пеностекла и оценить сходимость функциональной зависимости между временем и температурой в заданных точках контроля по результатам экспериментальных данных. Эффективность процесса отжига в большей степени определяется средним диаметром пор в структуре материала, плотность пеностекла имеет линейную зависимость при формировании остаточных напряжений в материале.

Библиографический список

1. **Кетов А. А., Толмачев А. В.** Пеностекло – технологические реалии и рынок // Строительные материалы. 2015. № 1. С. 17–23.
2. **Баканов М. О.** Моделирование высокотемпературных процессов в технологии пеностекла. Часть 1: Формирование динамики циклических нестационарных двумерных температурных полей // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2021. № 2(18). С. 87–102.
3. **Баканов М. О.** Моделирование высокотемпературных процессов в технологии пеностекла. Часть 2: Формирование пористой структуры на стадии вспенивания // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2021. № 3(19). С. 89–102.
4. **Грушко И. С.** Исследование напряжений пеностекла с учетом тепловых нагрузок при отжиге // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2018. № 2(198). С. 90–95.
5. **Шутов А. И. и др.** Моделирование структуры теплоизоляционного пеностекла // Стекло и керамика. 2007. № 11. С. 22–23.
6. **Tammann V. G., Hesse W.** 2. Anorg. Allgem. Chem., 156,246 (1926); (c) G. S. Fulcher // J. Am. Ceram. Soc. 1925. Т. 8. С. 339.
7. **Chen Y. et al.** Numerical simulation and experimental study of residual stresses in compression molding of precision glass optical components. 2008.
8. **Narayanaswamy O. S.** A model of structural relaxation in glass // Journal of the American Ceramic Society. 1971. Т. 54. № 10. С. 491–498.
9. **Демидович Б. К.** Пеностекло. Минск, «Наука и техника», 1975.
10. **Даувальтер А. Н.** Строение стекла // Стекло и керамика. 1955. № 3. С. 12–17.
11. **Грушко И. С.** Исследование напряжений пеностекла с учетом тепловых нагрузок при отжиге // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2018. № 2(198). С. 90–95.
12. **Федосов С. В., Баканов М. О.** Моделирование процессов теплопроводности и диффузии в телах канонической формы с применением метода «микропроцессов» для области малых значений числа Фурье // Изв. вузов. Химия и хим. Технология. 2021. Т. 64. Вып. 10. С. 78–83.
13. **Рудобашта С. П., Карташов Э. М.** Диффузия в химико-технологических процессах. М. : КолосС. 2013. 478 с.
14. **Федосов С. В.** Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ИПК «ПресСто». 2010. 363 с.

УДК 614.849

Александр Александрович Лазарев, кандидат технических наук, кандидат педагогических наук, доцент, начальник кафедры «Государственный надзор и экспертиза пожаров», kgn@edufire37.ru

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Россия, г. Иваново
Сергей Викторович Федосов, академик РААСН, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и организации строительного производства», FedosovSV@mgsu.ru
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, г. Москва

Алексей Николаевич Мальцев, адъюнкт, malec-37@mail.ru
Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Россия, г. Иваново

О механизме теплопереноса во внешнем слое пластика изделия из стеклопластика РСТ-250 в условиях ландшафтного пожара

***Аннотация.** В рамках исследования с целью создания противопожарной преграды для ограничения распространения ландшафтного пожара построены температурные поля в первом слое пластика в стеклопластике. При этом использовались результаты решения краевой задачи нестационарного теплопереноса в данном слое. Представлены результаты расчета безразмерной температуры по толщине первого слоя пластика в стеклопластике. Данные расчеты позволяют определить срок службы рассматриваемого труднгорючего материала в условиях ландшафтного пожара.*

***Ключевые слова:** математическая модель, пожарная безопасность.*

Alexander Lazarev, Ph. D. of Engineering Sciences, Ph. D. of Pedagogic Sciences, Associate Professor, Head of the Department State Supervision and Expertise of Fires, kgn@edufire37.ru
Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Russia, Ivanovo

Sergey Fedosov, Academician of the RAASN, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor of the Department Technology and Organization of Construction Production, FedosovSV@mgsu.ru

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia, Moscow

Alexey Maltsev, Adjunct, malec-37@mail.ru

Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Russia, Ivanovo

About the mechanism of heat transfer in the outer layer of plastic products made of fiberglass PCT-250 in a landscape fire

***Abstract.** As part of the study, in order to create a fire barrier to limit the spread of landscape fire, temperature fields were built in the first layer of plastic in fiberglass. The results of solving the boundary value problem of nonstationary heat transfer in this layer were used. The results of calculating the dimensionless temperature by the thickness of the first layer of plastic in fiberglass are presented. These calculations allow us to determine the service life of the considered non-combustible material in the conditions of a landscape fire.*

***Keywords:** mathematical model, fire safety.*

Большинство технологических процессов изготовления трудногорючих материалов включают в себя термическую обработку твердых тел [1, 4, 6, 8–9, 10, 12–15]. Аналогичные процессы протекают при пожарах на открытой местности. Из этого следует, что подходы к разработке математических моделей технологических процессов могут быть использованы при разработке технических средств противопожарной защиты. В рамках проводимого исследования особый интерес представляет решение краевых задач нестационарного теплопереноса.

Специальное изделие может быть использовано для ограничения распространения пламени, как показано на рисунке 1а) [6]. При проведении данных огневых испытаний происходит сложный теплообмен за счет излучения и конвекции. На рисунке 1б) представлено изменение температуры с тыльной стороны РСТ-250 при огневом воздействии.

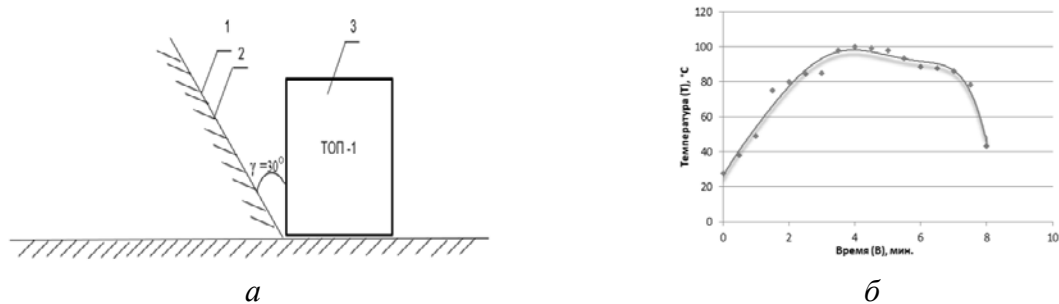


Рисунок 1 – Проведение огневых испытаний при разработке специального изделия:

а – установка: 1 – стеклопластик; 2 – стальная подставка;
3 – тестовый очаг пожара [6]; б – результаты испытаний [6]

Физическая картина процесса воздействия ландшафтного пожара на трудногорючий материал РСТ-250 [17] (стеклопластик) может быть представлена на рисунке 2.

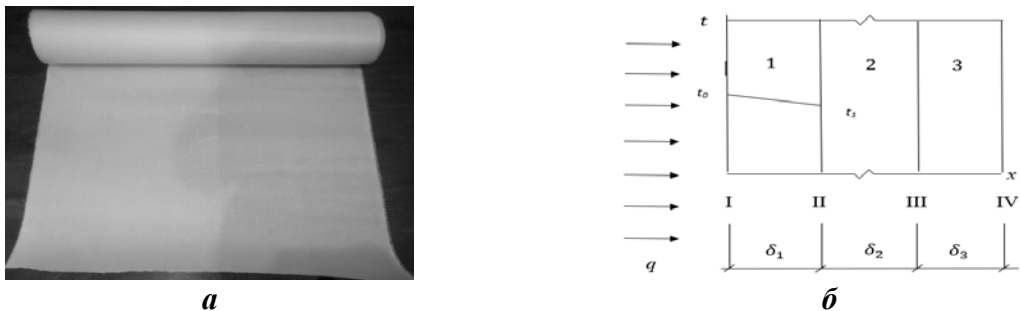


Рисунок 2 – Процесс воздействия пламени на РСТ-250:

а – фотография изделия РСТ-250; б – процесс воздействия теплового потока на образец РСТ – 250 в слоях

Здесь трехслойное полотно стеклопластика РСТ-250 [17] (1, 3 – слой пластика; 2 – слой стеклоткани) находится в стационарном положении. Распределение температур имеет следующий вид: $t_1(x, 0) = t_2(x, 0) = t_3(x, 0) = t_4(x, 0) = t_0$.

В момент времени $\tau = 0$ в результате ландшафтного пожара с левой стороны на стеклопластик РСТ-250 [17] имеет место плотность теплового потока q (кВт/м²). Под влиянием этого потока первый слой (пластик) начинает прогреваться. При этом второй слой (стекловолокно), а также третий (пластик) остаются с температурой t_0 . При достижении тепловой волной границы первого и второго слоев в месте стыка данных слоев возникает градиент температур. После этого момента будет происходить более глубокое проникновение поля температур в трудногорючий материал РСТ-250 [17]. Второй слой имеет температуру t_0 до того момента, как тепловая волна дойдет до места, где стыкуются первый и второй слой. И так далее. Слой 3 граничит с воздушной средой.

Общая задача делится на три автономные, но связанные между собой задачи, в каждой из которых придется определить теплоперенос между слоями стеклопластика РСТ-250 [17].

Задача 1. Теплоперенос в первом слое (пластик) с граничными условиями третьего рода, которые учитывают конвективный обмен на границе I, и первого рода, которые характеризуют постоянство температуры на границе II первого и второго слоев.

Задача 2. Теплоперенос в слое 2 с граничными условиями второго рода, которые характеризуют постоянство плотности теплового потока через границу II, и первого рода, характеризующие постоянство температуры на границе III.

Задача 3. Температура в слое 3 с граничными условиями второго рода на границе III и граничными условиями первого рода, которые характеризуют теплообмен между поверхностью слоя четыре на границе IV с окружающей средой (воздухом).

Рассмотрим задачу 1 для внешнего слоя пластика. Подходы к постановке данной задачи будет существенным образом отличаться от подходов к определению теплопереноса между остальными слоями стеклопластика.

Математическая задача теплопроводности для первого слоя может быть записана следующим образом:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}; \quad (0 \leq x \leq \delta_1); \quad (1)$$

$$\text{Начальное условие:} \quad t(x, 0) = t_0(x) \quad (2)$$

$$\text{Граничные условия:} \quad -\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_{\text{эф}} [t_{\text{пож.}} - t(0, \tau)]; \quad (3)$$

$$t(\delta, \tau) = t_{\delta}; \quad (4)$$

Решение аналогичной задачи описано в монографии [14].

При этом для решения краевой задачи теплопереноса в неограниченной пластине при неравномерном начальном распределении температур получено выражение [16]:

$$T(\bar{x}, Fo) = T_{\delta} \left(\frac{Bi \bar{x} + 1}{Bi + 1} \right) - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Bi \sin \mu_n (\bar{x} - 1)}{Bi + \cos^2 \mu_n} \exp(-\mu_n^2 Fo) \times \\ \times \left[\int_0^1 T_0(\xi) \sin(\mu_n (1 - \xi)) d\xi - \frac{T_{\delta}}{\mu_n} \right] \quad (5)$$

где Fo – число Фурье, $Fo = \frac{a\tau}{R^2}$; Bi – число Био, $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$; \bar{x} – заданная координата, $\bar{x} = \frac{x}{R}$; $\alpha_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи за счет излучения и конвекции, Вт/(м²·К), $t_{\text{пож.}}$ – температура излучающего агента пожара, К, μ_n , ξ – дополнительные переменные, a – коэффициент температуропроводности, м²/с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), R – толщина слоя пластика, м; T_0 , T_{δ} – безразмерные температуры на внешней поверхности и по толщине слоя пластика, τ – время, сек, определено эмпирическим путем и равно 490 сек [6].

Описанная в уравнении (5) зависимость температуры от числа Фурье и координаты позволяет произвести численный эксперимент для определения возможности использования определенного стеклопластика для защиты от ландшафтного пожара. В результате проведенного на основании [1,2,5,14-16] оценочного расчета выражение (5) для внешнего слоя пластика изделия марки РСТ-250 [17] было преобразовано:

$$T(\bar{x}, Fo) = T_{\delta} \left(\frac{Bi \bar{x} + 1}{Bi + 1} \right) - 2 \frac{Bi \sin \mu_n (\bar{x} - 1)}{Bi + \cos^2 \mu_n} \exp(-\mu_n^2 Fo) \times \\ \times \left[\frac{T_0}{\mu_n} [\sin^2 \mu_n - \cos^2 \mu_n + \cos \mu_n] - \frac{T_{\delta}}{\mu_n} \right] \quad (6)$$

Значение числа Фурье для пластика толщиной 0,06 мм при продолжительности нагрева 490 с:

$$Fo = \frac{2,17 \cdot 10^{-5} \cdot 490}{(0,06 \cdot 10^{-3})^2} = 177216 \quad (7)$$

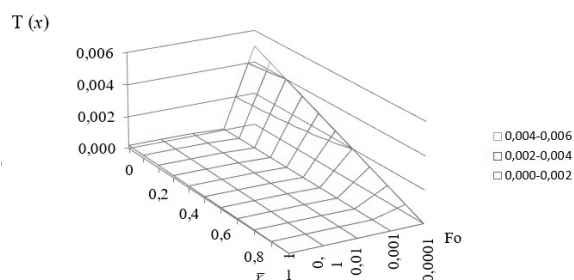


Рисунок 3 – Изменение безразмерной температуры в зависимости от безразмерной координаты в первом слое пластика изделия марки РСТ-250 [17]

Уравнение (6) отражает зависимость безразмерной температуры от толщины слоя пластика изделия марки РСТ – 250 [17]. Результаты расчета представлены на рисунке 3.

Таким образом, при заданных условиях происходит понижение безразмерной температуры при увеличении безразмерной координаты. Это означает, что формула (6) работает адекватно. Следовательно, она может быть рекомендована к использованию при определении температурных полей в первом слое пластика изделия марки РСТ-250 [17].

Библиографический список

1. Жидкометаллические теплоносители / В. М. Боришанский, С. С. Кутателадзе, И. И. Новиков, О. С. Федьинский. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Атомиздат, 1967. 299 с.: ил. Библиогр.: с. 288–296 (234 назв.). – 1-е изд.: Прил. к № 2 к журн. «Атомная энергия» за 1958 г.
2. Исаченко В. П., Осипова В. А, Сукомел А. С. Теплопередача. – М. : Энергия, 1975. 488 с.
3. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М. : Высшая школа, 2001. 480 с.
4. Карташов Э. М., Кудинов В. А. Аналитические методы теории теплопроводности и её приложений. Изд. 4-е, перераб. и сущ. доп. М. : ЛЕНАНД, 2018. 1072 с.
5. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие. М. : Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
6. Лазарев А. А., Мальцев А. Н. О проблеме создания противопожарных преград для защиты от ландшафтных пожаров // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 4 (45). С. 78–85.
7. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория переноса энергии и вещества. Минск : Изд-во Акад. наук БССР, 1959. 332 с.
8. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М. : Высшая школа, 1967. 600 с.
9. Теплоотдача расплавленных металлов / М. А. Михеев, В. А. Баум, К. Д. Воскресенский, О. С. Федьинский // Реакторостроение и теория реакторов: доклады советской делегации. 1955. С. 139–151.
10. Рудобашта С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М. : Химия, 1980. 248 с.
11. Рудобашта С. П., Карташов Э. М. Диффузия в химико-технологических процессах. М. : КолосС, 2013. 478 с.
12. Федосов С. В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии: Монография. Иваново: ИПК «ПресСто», 2010. 363 с.

13. **Федосов С. В., Федосеев В. Н., Воронов В. А.** Численно-аналитический метод сведения задач нестационарной теплопроводности с граничными условиями III рода к задачам с условиями I рода // Строительные материалы. 2022. № 12. С. 59–62.
14. Промерзание влажных грунтов, оснований и фундаментов / С. В. Федосов, Р. М. Алоян, А. М. Ибрагимов, Л. Ю. Гнедина, Л. Н. Аксаковская. М. : Издательство АСВ, 2005. 501 с.
15. **Федосов С. В., Ибрагимов А. М.** Нестационарный тепло- и массоперенос в многослойных ограждающих конструкциях // Строительные материалы. 2006. № 4. С. 86–87.
16. **Шмелев А. Л.** Непрерывный способ получения водорастворимых полимеров на основе полиакрилонитрила с высоким содержанием основного вещества: автореф. дис. ... кандидата технических наук / Шмелев А. В. Иваново, 1998.
17. Сайт Екатеринбургского завода изоляционных материалов // Рулонные стеклопластики: [Электронный ресурс]. URL: https://www.zavod-izol.ru/catalog/k-167250-rulonnyye_stekloplastiki (дата обращения: 22.02.2023).

УДК 674.048.5

Артем Альбертович Гирфанов, аспирант кафедры «Архитектура и дизайн изделия из древесины», girfanovaa@mail.ru

Руслан Рушанович Сафин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Архитектура и дизайн изделия из древесины», sfabu@mail.ru

Альбина Валерьевна Сафина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделия из древесины», alb_saf@mail.ru

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, г. Казань

Интенсификация процессов пропитки термомодифицированной древесины посредством предварительной ультрафиолетовой обработки

***Аннотация.** Рассмотрены вопросы интенсификации процессов пропитки термомодифицированных древесных материалов, характерной чертой которых являются низкие показатели впитываемости составов и адгезии к связующим. Рассмотрена возможность повышения эффективности пропитки термодревесины при различных вариантах ее предварительной обработки. Проведены экспериментальные исследования и определены значения пропиточных коэффициентов по поглощению для четырех групп древесных образцов: термомодифицированной древесины; древесины, обработанной ультрафиолетом; древесины термомодифицированной с последующей УФ-обработкой и контрольного образца необработанной древесины. Установлено, что дополнительная обработка ультрафиолетом значительно увеличивает пропитывающую способность термически обработанной древесины. Полученные результаты имеют практическое значение для комплексного улучшения технологических характеристик древесного сырья в производстве композиционных материалов за счет модификации микро- и наноструктуры тела, а также в вопросах повышения эффективности пропитки с целью огне биозащиты деревянных строительных конструкций.*

***Ключевые слова:** пропитка, древесина, термомодификация, ультрафиолетовое излучение, эффективность.*

Artem A. Girfanov, Postgraduate of the Department of Architecture and Design of Wood Products

Ruslan R. Safin, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Architecture and Design of Wood Products

Albina V. Safina, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products

Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan

Intensification of the processes of impregnation of thermomodified wood by means of pre-ultraviolet treatment

***Abstract.** The issues of intensification of the processes of impregnation of thermomodified wood materials, a characteristic feature of which are low rates of absorbency of compounds and adhesion to binders, are considered. The possibility of increasing the efficiency of impregnation of thermal wood with various variants of its pretreatment is considered. Experimental studies were carried out and the values of the impregnation absorption coefficients for four groups of wood samples were determined: thermomodified wood; wood*

treated with ultraviolet light; thermomodified wood with subsequent UV treatment and a control sample of untreated wood. It has been found that additional UV treatment significantly increases the impregnating ability of heat-treated wood. The results obtained are of practical importance for the comprehensive improvement of the technological characteristics of wood raw materials in the production of composite materials by modifying the micro- and nanostructure of the body, as well as in improving the efficiency of impregnation for the purpose of fire and biosecurity of wooden building structures.

Keywords: *impregnation, wood, thermal modification, ultraviolet radiation, efficiency.*

Модификации древесины изучались с начала 1900-х годов и за последнее десятилетие эта тема стала доминирующей областью исследований в науке о древесине. Модификация становится популярным способом повышения эксплуатационных характеристик древесины, либо придания ей новых функциональных возможностей в качестве многофункционального или интеллектуального материала [7, 9].

Особого внимания заслуживают процессы термической модификация древесины в безвоздушной среде при температурах 180...300 °С. Термическая обработка вызывает изменение физических свойств и химического состава древесного сырья, позволяет снизить гигроскопичность и развитие давления набухания [2, 3].

Не смотря на очевидные достоинства, при термомодифицировании древесины снижаются ее адгезионные свойства, что негативно отражается на процессах последующего склеивания, смешения со связующим или пропитки защитными составами. Пониженное свойство впитываемости древесины влечет за собой увеличение расхода связующих или пропитывающих композиций, повышение технологических параметров процесса (рабочего давления и времени прессования), что в конечном счете повышает себестоимость готового изделия [8].

Существующие теоретические и экспериментальные исследования ученых по модификации свойств древесины [4,6] явились предпосылкой для поиска решений по интенсификации процессов пропитки термомодифицированной древесины.

Целью настоящей работы является исследование эффективности ультрафиолетовой обработки древесных материалов в процессах термического модифицирования.

Объектами исследования процесса пропитки являлись образцы древесины сосны с влажностью от 5...10 %. Образцы получены путём распиловки и обработки на фуговальном станке и представляли собой прямоугольные бруски с поперечным сечением 20×20 мм и длиной вдоль волокон 100 мм. Отклонения размеров образцов не превышали ±1 мм. Перед началом проведения эксперимента все образцы взвешивались с погрешностью не более 0,02 г.

Подготовленные образцы были разбиты на группы, соответствующие разным способам обработки. Так, первая группа образцов была подвержена термомодифицированию (ТМ) в среде «уходящих» газов котла-утилизатора с отсутствием кислорода при температуре от 173 °С до 207 °С.

Вторая группа древесных образцов была подвергнута облучению ультрафиолетом типа С (УФ-С) с спектральным излучением 253 nm и в течении 90 мин бактерицидной ртутно-дуговой лампой мощностью 380 Вт.

Третья группа образцов сосны была термомодифицирована в среде «уходящих» газов с последующим облучением ультрафиолетом (ТМ+УФ-С). Таким образом, третья группа образцов сочетала в себе первые два способа обработки.

Четвертая группа образцов представляла собой необработанную древесину и использовалась в качестве контрольной (К).

После соответствующей обработки древесные образцы выдерживались в комнатных условиях в течении суток для выравнивания их влажности.

Для оценки глубины и эффективности пропитки все образцы были покрыты составом для огнебиозащиты древесины фирмы Н, который переводит древесину трудновоспламеняемый и трудногорючий материал. Средство пропитки было выбрано с учетом цветового решения, позволяющего наглядно оценить глубину пропитки, и с целью последующих исследований в направлении повышения эффективности огнезащитных свойств деревянных конструкций. Метод покрытия образцов – погружение в рабочий раствор в течение 5-ти минут при температуре окружающей среды (20 ± 2) °С.

По окончании пропитки поверхность образцов древесины сушили фильтровальной бумагой, а сами бруски взвешивали с погрешностью не более 0,02 г. По изменению массы до и после обработки рассчитывалась величина пропиточного коэффициента по поглощению. Методика расчетов осуществлялась в соответствии с руководящими материалами [1]. Результаты проведенных исследований по определению проникающей способности в древесину отражены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний проникающей способности защитного средства в древесину

Показатели	№ группы образцов			
	1	2	3	4
Способ обработки образцов древесины	ТМ	УФ-С	ТМ+УФ-С	К
Пропиточный коэффициент по поглощению	0,65	0,81	0,72	0,51
Относительная проникающая способность защитного средства	Средняя	Высокая	Высокая	Низкая

Как видно из представленных данных, контрольный образец, соответствующий необработанной древесине, имеет самую низкую пропитывающую способность. Средняя проникающая способность защитного средства у термомодифицированных образцов древесины обусловлена увеличивающейся пористостью материала, что, с свою очередь обеспечивает механическое проникновение состава. Необходимо отметить, что пропитывающая способность термомодифицированных образцов после обработки УФ-облучения, значительно возрастает. То есть, благодаря ультрафиолетовой обработке возрастает эффективность пропитки образцов древесины. Это объясняется тем, что при ультрафиолетовом воздействии происходит изменение в строении поверхности древесины благодаря еще большему открытию пор, а также, в определенной степени, происходит изменение химического состава поверхности, что усиливает межфазное взаимодействие на границе древесина-минеральное вяжущее [5].

Проведенные исследования показали эффективность воздействия ультрафиолетового излучения на впитывающую способность термомодифицированной древесины. Процесс может быть оптимизирован путём регулирования мощности облучения, а также за счет изменения расстояний между источником излучения и обрабатываемыми деревянными поверхностями.

Результаты данных исследований могут быть использованы при термомодификации древесного сырья, интегрированной в технологический процесс производства различных композиционных материалов с повышенными физико-механическими характеристиками, например, арболита.

Библиографический список

1. ГОСТ 27014-2021. Межгосударственный стандарт. Средства защитные для древесины. Метод определения проникающей способности в древесину: утвержден и введен в действие Приказом Росстандарта от 19.05.2021 № 399-ст. М. : Стандартинформ. 8 с.

2. **Разумов Е. Ю., Белякова Е. А., Сафин Р. Р.** Математическая модель процесса термомодифицирования древесины труднопропитываемых пород в жидкости // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 16. С. 233–239.
3. **Сафин Р. Г., Ахметова Д. А., Сафина А. В., Степанова Т. О.** Термомодификация древесных материалов // Вестник технологического университета. 2015. Т18. № 22. С. 112–118.
4. **Сафин Р. Р., Сафин Р. Г., Галяветдинов Н. Р., Иманаев Р. М.** Исследование совмещенной сушки-пропитки массивных капиллярно-пористых коллоидных материалов // Вестник Казанского технологического университета. 2006. № 6. С. 73–78.
5. **Сафин Р. Р., Хасаншина Р. Т., Сабирова Г. А., Илалова А. Ф.** Исследование изменения свойств поверхности древесины после ультрафиолетовой обработки // Деревообрабатывающая промышленность. 2019. № 3. С. 47–53.
6. **Хасаншина Р. Т.** Создание влагостойких видов композитных материалов на основе древесины для строительной отрасли // В сборнике научных статей 3-й Международной молодежной научной конференции: Поколение будущего: Взгляд молодых ученых – 2014, в 2-х томах. Ответственный редактор Горохов А. А., 2014. С. 217–219.
7. **BEH G., BOLLMUS S., GELLERICH A., MILITZ H.** 2018. Improvement of mechanical properties of thermally modified hardwood through melamine treatment. In Wood Material Science and Engineering, 2018, vol. 13. Issue 5.
8. **Khasanshin R, Safin R, Kainov P, Safina A, Valeev I** 2019 Effect of process pressure on the yield of products and the duration of the process of thermochemical processing of wood waste Int. Multidisciplinary Sci. GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM 19 th) pp. 145–53.
9. **René Herrera-Díaz, Víctor Sepúlveda-Villarroel, Natalia Pérez-Peña, Linette Salvo-Sepúlveda, Carlos Salinas-Lira, Rodrigo Llano-Ponte, Rubén A. Ananías.** Effect of wood drying and heat modification on some physical and mechanical properties of radiata pine. Drying Technology, Volume 36, 2018. Issue 5.

УДК 691.175

Фандасовна Илалова Гузель, аспирант кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», achtung.guzik@mail.ru

Равилевич Галаяветдинов Нур, кандидат технических наук, доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», nour777@mail.ru

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, г. Казань

Исследование тепло и массообменных процессов при разработке технологии получения древесно-наполненных композиционных материалов

***Аннотация.** На сегодняшний день одним из основных источников лигноцеллюлозного сырья является древесина. Лигноцеллюлозное сырье имеет широкий спектр применения при производстве древесно-наполненных композитов. В зависимости от вида необходимого наполнителя способы обработки древесного сырья могут отличаться, однако повышенный интерес в данном направлении имеет гидролизная обработка. В работе проанализирован химический состав древесного сырья, а также процессы гидролиза древесного сырья и процессы протекающие в результате высокотемпературной обработки.*

***Ключевые слова:** гидролиз, древесно-наполненные композиционные материалы, древесное сырье, лигнин, гемицеллюлоза.*

Guzel F. Ilalova, Postgraduate of the Department of Architecture and Design of Wood Products of wood, achtung.guzik@mail.ru

Nur R. Galyavetdinov, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the of the Department of Architecture and Design, nour777@mail.ru

Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan

Study of heat and mass transfer processes during the development of technology for obtaining wood-filled composite materials

***Abstract.** To date, one of the main sources of lignocellulosic raw materials is wood. Lignocellulosic raw materials have a wide range of applications in the production of wood-filled composites. Depending on the type of filler required, the methods of processing wood raw materials may differ, however, hydrolysis treatment has increased interest in this area. The paper analyzes the chemical composition of wood raw materials, as well as the processes of hydrolysis of wood raw materials and the processes occurring as a result of high-temperature processing.*

***Keywords:** hydrolysis, wood-filled composite materials, wood raw materials, lignin, hemicellulose.*

Введение

В связи с истощением невозобновляемых ископаемых ресурсов (нефти, газа и угля) в последние годы продолжают интенсивные поиски альтернативных источников энергии и химикатов для органического синтеза. Возобновляемое растительное сырье, в том числе древесина, рассматривается как такая альтернатива. Концепция биопереработки включает использование компонентов древесной биомассы [1]. Поскольку сельскохозяйственные растения, такие как кукуруза, сахарная свекла, сорго, маниока и сахарный тростник, необходимы для производства продуктов питания, кажется логичным использовать древесину вместо сельскохозяйственных растений [2].

Лигноцеллюлоза, основной компонент биомассы, состоит из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Гемицеллюлоза – это гетерогенный полимер глюкозы, маннозы, галактозы, ксилозы и арабинозы. Манноза и глюкоза являются основными компонентами гемицел-

люлозы в мягкой древесине, тогда как ксилоза в большом количестве содержится в лиственной древесине. Химическая структура гемицеллюлозы может быть разрушена химическим гидролизом легче, чем целлюлоза. Лигнин – сложное химическое соединение, которое служит связующим в растениях. Лигнин образуется из ароматического соединения, соединенного алифатическими цепями.

Гидролиз лигноцеллюлозных материалов, таких как растительные остатки, древесина лиственных и хвойных пород, отходы целлюлозы имеет в последние годы очень активное развитие. Важными этапами производства древесно-наполненных композиционных материалов являются: высокотемпературная обработка – гидролиз для превращения гемицеллюлозы и целлюлозы в ферментируемые сахара, ферментация сахаров для получения биопластика и сушка лигнина для использования его в качестве наполнителя [3]

Процессы, проходящие при обработке древесного сырья

Процесс гидролиза древесного сырья представляет собой тепло и массообменные, а также диффузионные процессы в гетерогенных средах.

Технологический процесс гидролиза древесного сырья проводят в герметичном резервуаре, в качестве теплоносителя является реактор с кольцевым обогревателем, оснащенный датчиками температуры, для регулирования температуры, а также конденсатором. В предварительно измельченном, капиллярно-пористом материале в результате помещения его в водный раствор сернистой кислоты начинает происходить перенос вещества в капилляры древесины. В гетерогенной среде, в результате процесса гидролиза макромолекулы полисахаридов рвутся на части, а образовавшиеся продукты переходят в раствор. Параллельно с этим происходит гидролиз растворившихся полисахаридов до моносахаридов.

Известно, что гемицеллюлозы делятся на легко- и трудногидролизуемые. Для извлечения трудногидролизуемых сахаров существует несколько решений, одним из которых является высокотемпературный многоступенчатый гидролиз (при $t =$ до 180°C). Осуществление высокотемпературного гидролиза позволяет обеспечивать сравнительно высокую эффективность даже при использовании слабой сернистой кислот. Однако не во всех случаях применение высокотемпературного гидролиза является эффективным и экономически выгодным. В некоторых вариантах эффективней использование многоступенчатого гидролиза.

Исходя из вышесказанного, в работе целесообразным является двухстадийная схема обработки сырья для интенсификации процесса гидролиза. На первой ступени происходит гидролиз более легкогидролизуемых полисахаридов: гемицеллюлоза (пентозаны, гексозаны), крахмал. После того, как удаляются легкогидролизуемые сахара, извлечение трудногидролизуемых сахаров упрощается. В итоге при двухступенчатой варке выход сахара из древесины мог бы увеличиться с 26 до 35...45 % от абсолютно сухой древесины. Проведение обеих ступеней гидролиза также может быть осуществлено в аппаратах непрерывного действия, причем отмывка образующегося сахара может быть организована как внутри, так и вне аппарата.

Лигнин, содержащийся в древесном сырье, не поддается гидролизу, поскольку устойчив к действию химических веществ. Его содержание после обработки остается неизменным. Для возможности дальнейшего использования древесного остатка в виде лигнина в качестве наполнителя, необходимо произвести сушку для избавления от влаги после процесса гидролиза.

Библиографический список

1. Галяветдинов Н.Р., Сабилова Г.А., Хайруллин Р.З., Сафин Р.Р., Илалова Г.Ф. Исследование скорости деградации древесно-наполненных PLA композитов в кислых и щелочных растворах // Деревообрабатывающая промышленность. – 2019. – № 4. – 62-68 с.
2. Нуретдинова Э.И., Ананьева О.В., Гайфуллина Э.Р., Исламгулов И.Р., Валеева Р.Т. Переработка отходов деревоперерабатывающей промышленности - одно из направлений защиты окружающей среды // Повышение эффективности использования и воспроизводства природных ресурсов. Материалы научно-практической конференции. – 2016. – 276-279 с.
3. Саерова К.В., Илалова Г.Ф., Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р., Сафиуллина А.Х. Высокотемпературный гидролиз соснового опила сернистой кислотой с целью выявления концентрации редуцирующих веществ // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2020. – № 57. – 54-59 с.

УДК 691.1115:123:674.8

Руслан Ромелевич Хасаншин, доктор технических наук, профессор кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», rusl2881@mail.ru

Ильяс Идрисович Сахипов, аспирант кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», olambis@rambler.ru

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, г. Казань

Применение проэкстрагированной древесной массы лиственницы в строительных композиционных материалах

Аннотация. В данной работе представлена технология получения древесно-цементного композиционного материала из экстрагированных отходов лиственницы. Приведены исследования образцов композита на прочность при сжатии. Предлагается оптимальный фракционный состав экстрагированной измельченной древесины лиственницы для производства древесно-цементного композита. В ходе проведения эксперимента было выявлено, что композит, изготовленный из проэкстрагированной древесной массы фракцией 5/2 мм, является оптимальным вариантом, так как в древесной массе, прошедшей экстракцию практически отсутствуют цементные яды, что способствует лучшей адгезии цемента с древесиной.

Ключевые слова: древесное сырье, жмых, отходы, водорастворимые легкогидролизуемые вещества, экстракция, арболит, композиционный материал.

Ruslan Khasanshin, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products of wood, rusl2881@mail.ru

Ilyas Sakhipov, Postgraduate of the Department of Architecture and Design of Wood Products of wood, olambis@rambler.ru

Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan

Application of extracted larch wood in composite materials

Abstract. This paper presents the technology of obtaining wood-cement composite material from extracted waste of larch. Studies of composite samples for compressive strength are given. The optimal fractional composition of extracted crushed larch wood for the production of wood-cement composite is proposed. During the experiment, it was revealed that a composite made of extracted wood pulp with a fraction of 5/2 mm is the best option, since there are practically no cement poisons in the wood pulp that has been extracted, which contributes to better adhesion of cement with wood.

Keywords: wood raw materials, cake, waste, water-soluble easily hydrolyzable substances, extraction, arbolite, composite material.

В настоящее время на лесозаготовительных предприятиях остается множество отходов древесины после их переработки [1]. Например, ежегодно на деревообрабатывающих предприятиях после обработки (распиловка, строгание) древесины лиственницы образуется более 20 млн м³ отходов. При этом, лиственница содержит комплекс ценных элементов с большой биологической активностью. Из лиственницы в процессе экстракции получают: лиственничную смолу, арабиногалактан, дигидрокверцетин, масло. Полученные вещества имеют большой спрос в фармацевтической, косметической, пищевой отраслях. Однако, по-

сле процесса извлечения ценных компонентов из лиственничной массы образуется большое количество отработанного лигноцеллюлозного сырья жмыха (около 60% объема жмыха древесины) которое может использоваться при производстве строительных композиционных материалов [2, 3].

Достоинством применения древесного вещества в композитах, это легкость его обработки и в результате меньшее изнашивание режущего инструмента. Недостатком является органическое происхождение, специфические свойства материала: большая химическая активность, разбухание, не большая адгезия к связующему цементу [4, 5].

Одним из наиболее перспективных направлений переработки экстрагированной древесины лиственницы является создания строительных композиционных материалов из древесины. В связи с этим в данной работе поставлена задача исследования древесно-цементного композиционного материала из экстрагированного древесного сырья.

Из всех недостатков древесного вещества наиболее хорошо изучена в литературе – это агрессивность древесины к цементу. Известно, что древесина лиственницы в меньшей степени пригодна для получения высококачественных материалов из цемента. В настоящее время существует несколько методов борьбы с «цементными ядами» (веществами, задерживающими твердение): варка древесины, выдержка древесины на воздухе с целью окисления сахаров и перехода их в нерастворимое состояние, обработка древесных частиц растворами хлорида кальция, жидкого стекла, извести [4–6].

После завершения процесса экстракции, полученный жмых лиственницы сушился в камере до влажности 8...10 %.

Далее осуществлялось фракционирование древесного сырья. Фракционирование производилось на лабораторном стенде ситовым методом с отверстиями сит 1 мм, 5 мм, 10 мм и 20 мм. В процессе встряхивания, продолжительность которого 50...60 с, происходит просеивание частиц через отверстия сит и разделение взятой пробы на отдельные фракции.

После стадии фракционирования происходил этап получения древесно-цементного композита. Для изготовления образцов легкого бетона использовались следующие компоненты: цемент марки М500; древесное сырье (не обработанное и проэкстрагированное); химические добавки (хлористый кальций, жидкое стекло).

В исследованиях рецептура древесно-цементного композита была принята классическая, согласно литературе [6]: наполнитель (щепа) – 25 %, портландцемент – 30 %, вода – 35 %. Количество химических компонентнов принимали исходя из 3 % по массе жидкости-воды [6].

Для решения поставленной задачи были взяты 3 наиболее распространенные фракции щепы: 20/10, 10/5 и 5/2 мм.

Для получения образцов были подготовлены металлические цилиндрические формы с диаметром 100 мм, в которые загружалась древесно-цементная смесь. Формы были установлены на вибростол. При помощи вибростола происходило формование древесно-цементного полуфабриката в течение 7–10 мин.

После набора прочности и распалубки образцы выдерживались еще 30 суток при комнатных условиях (рисунок 1).



Рисунок 1 – Образцы древесно-цементного композита

Далее у образцов измеряли линейные размеры, замеряли массу и испытывали их на сжатие на испытательной машине. Полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний композитный образцов

Фракционный состав щепы, мм	Прочность на сжатие, МПа (контрольный образец)	Прочность на сжатие, МПа (экстрагированный древесный наполнитель)
20/10	0,354	0,543
10/5	0,441	0,788
5/2	0,689	0,947

Проведенные исследования показали, что образцы, изготовленные из древесины лиственницы, прошедшее процесс водно-спиртовой экстракции, оказались прочнее на 8–10%, что говорит о том, что у данного вид наполнителя лучше адгезия, чем у классического древесного сырья. Влияние размеров фракций щепы, также сыграла свою роль в прочности образцов. Из таблицы 1 видно, что оптимальный фракционный состав древесного наполнителя среди рассмотренных будет фракция 5/2 мм. В данном случае зафиксирована наибольшая прочность материала на сжатие.

Библиографический список

1. Хасаншин Р. Р., Кайнов П. А. Нетрадиционный способ подготовки древесного наполнителя в производстве композиционных материалов // Деревообрабатывающая промышленность. 2016. № 2. С. 30–36.
2. Валеев К. В., Абдуллина Д. Р. Переработка отходов деревообрабатывающей промышленности с целью получения биологически активного вещества – бетулина // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции «Лесозэксплуатация и комплексное использование древесины». 2021. С. 4–7.
3. Сафина А. В., Губернаторов В. В., Хасаншин Р. Р. Обзор мирового опыта в области оптимизации процессов извлечения целевых компонентов из сырья растительного происхождения. // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 4. С. 47–63.
4. Кайнов П. А., Хасаншина Р. Т. Древесный наполнитель и его влияние на качество композиционного материала // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т.17. № 22. С. 169–171.
5. Наназашвили И. Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции: 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Стройиздат, 1990. 415 с.

УДК 691.11

Регина Викторовна Салимгараева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделия из древесины», reginka.danilova@mail.ru

Анатолий Алексеевич Прокопьев, ассистент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», prokorev.anatolij@mail.ru

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, г. Казань

Модификация древесного сырья ацетилизацией в производстве композиционных материалов

Аннотация. В статье рассмотрен способ ацетилирования древесной муки березы ледяной уксусной кислотой. Древесную муку выдерживали в ледяной уксусной кислоте в течении 72 часов, после чего высушили до постоянной массы и изготовили образцы ДПК с ПВД в качестве полимерного связующего. Образцы композита с модифицированной древесной мукой показали лучший результат при испытании на водопоглощение по сравнению с контрольными образцами. Описан метод испытания образцов и используемое оборудование. Результаты исследований доказывают целесообразность применения данной технологии предварительной обработки.

Ключевые слова: ацетилирование, ледяная уксусная кислота, древесная мука, композит, водопоглощение.

Regina R. Salimgaraeva, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor, of the Department of Architecture and Design of Wood Products of wood, reginka.danilova@mail.ru

Anatoly A. Prokopyev, Assistant of the Department of Architecture and Design of Wood Products of wood, prokorev.anatolij@mail.ru

Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan

Modification of wood raw materials by acetylation in the production of composite materials

Abstract. The article discusses the method of acetylation of birch wood flour with glacial acetic acid. Wood flour was kept in glacial acetic acid for 72 hours, after which it was dried to a constant weight and samples of WPC with LDPE were made as a polymer binder. Composite samples with modified wood flour showed a better result when tested for water absorption compared to control samples. The method of testing samples and the equipment used is described. The research results prove the feasibility of using this pretreatment technology.

Keywords: acetylation, glacial acetic acid, wood flour, composite, water absorption.

Вступление

Модификация древесного сырья ацетилизацией позволяет решать сразу несколько проблем: во-первых, решается вопрос с утилизацией отходов (в России в результате деятельности предприятий лесоперерабатывающего комплекса ежегодно образуется около 80 млн м³ древесных отходов, и лишь 48...58 % из них перерабатывается), во-вторых, ацетилирование позволяет получать наполнитель с улучшенными характеристиками (повышенная стабильность размеров, меньшее влагопоглощение) с целью дальнейшего производства композиционных материалов [1–4].

В работе [5] для изучения характеристик водопоглощения и механических свойств композитов с использованием древесной муки, макулатуры и очищенной целлюлозы было

проведен испытания на водопоглощение. Результаты показали, что с увеличением содержания наполнителя водопоглощение было максимальным, что в свою очередь можно решить с помощью различных способов обработки наполнителей: ацетилирование, фурфулирование, пропитка смолами и т. д.

По мнению Roger M. Rowell [6] микроорганизмы, термиты, тепло, влага, ультрафиолетовая энергия и химические вещества отрицательно сказываются на эксплуатационных свойствах древесины. Ацетилирование древесины приводит к снижению равновесного содержания влаги и повышает стабильность размеров. Механизм заключается в простом увеличении объема клеточной стенки почти до предела ее упругости и замене менее гидрофильной группы на гидроксильные группы в полимерах клеточной стенки, тем самым повышается биологическая устойчивость.

Методы и материалы

Для испытания были получены 10 различных композиционных составов (Полиэтилен высокого давления (ПВД): Древесная мука (ДМ)), из которых 5 составов изготовлены из ацетилированной древесной муки (путем выдержки в уксусной кислоте в течение 72 ч), а еще 5 – с необработанной древесной мукой.

Испытание образцов на водопоглощение по массе проводилось на 1, 2, 3 и 8 сутки согласно ГОСТ 4650-2014 [7]. Образцы ДПК выдерживались в дистиллированной воде, высушивались и взвешивались на лабораторных весах.

Результаты

Результаты исследования на водопоглощение образцов ДПК представлены в таблицах 1, 2 и на графике (рисунок 1).

Таблица 1 – Значения водопоглощения (по массе, г) для различных составов композита

Контрольный состав					
№ состава	1	2	3	4	5
Соотношение компонентов (ПВД:ДМ), %	80:20	70:30	60:40	50:50	40:60
Масса, г:					
$m_{\text{после сушки}}$	2,92	2,86	2,58	2,12	0,88
$m_{1 \text{ сут}}$	2,92	2,88	2,66	2,20	1,10
$m_{2 \text{ сут}}$	2,92	2,88	2,66	2,20	1,10
$m_{3 \text{ сут}}$	2,92	2,88	2,66	2,20	1,12
$m_{8 \text{ сут}}$	2,94	2,88	2,68	2,22	1,14
Состав с ацетилированной древесной мукой					
№ состава	1	2	3	4	5
Соотношение компонентов (ПВД:ДМ), %	80:20	70:30	60:40	50:50	40:60
Масса, г:					
$m_{\text{после сушки}}$	2,84	3,0	2,42	2,04	0,72
$m_{1 \text{ сут}}$	2,84	3,0	2,46	2,10	0,80
$m_{2 \text{ сут}}$	2,84	3,0	2,46	2,10	0,80
$m_{3 \text{ сут}}$	2,84	3,0	2,46	2,10	0,80
$m_{8 \text{ сут}}$	2,84	3,0	2,46	2,10	0,82

Таблица 2 – Значения водопоглощения (по массе, %) для различных составов композита

Контрольный состав					
№ состава	1	2	3	4	5
Соотношение компонентов (ПВД:ДМ), %	80:20	70:30	60:40	50:50	40:60
Масса образцов, %:					
$m_{\text{после сушки}}$	—	—	—	—	—
$m_{1 \text{ сут}}$	0	0,69	3,1	3,77	25,0
$m_{2 \text{ сут}}$	0	0,69	3,1	3,77	25,0
$m_{3 \text{ сут}}$	0	0,69	3,1	3,77	27,27
$m_{8 \text{ сут}}$	0,68	1,39	3,87	4,71	29,54

Продолжение таблицы 1

Состав с ацелированной древесной мукой					
№ состава	1	2	3	4	5
Соотношение компонентов (ПВД:ДМ),%	80:20	70:30	60:40	50:50	40:60
Масса образцов, %:					
$m_{\text{после свинки}}$	—	—	—	—	—
$m_{1 \text{ с\у\т}}$	0	0,1	0,82	2,94	11,11
$m_{2 \text{ с\у\т}}$	0	0,1	0,82	2,94	11,11
$m_{3 \text{ с\у\т}}$	0	0,1	0,82	2,94	11,11
$m_{8 \text{ с\у\т}}$	0	0,1	0,82	2,94	13,88

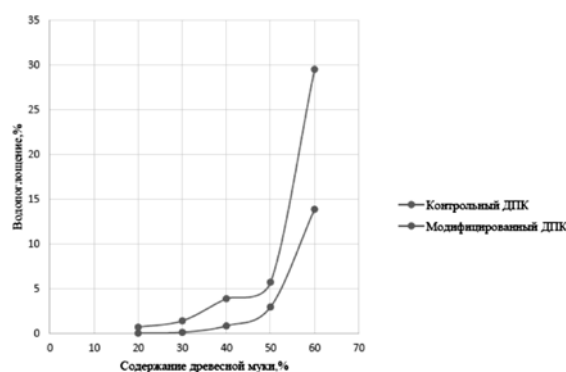


Рисунок 1 – Определение значения водопоглощения (по массе) на 8 суток

Из графика видно, что при увеличении содержания древесной муки в составе композита растет и водопоглощение образцов, однако для ДПК с ацелированной древесной мукой показатель водопоглощения ниже в 2 раза, что доказывает эффективность ацелирования как способа модификации древесины.

Библиографический список

1. Прокопьев А. А., Салимгараева Р. В., Сафин Р. Р. Обзор современных исследований в области ацелирования древесины // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 2. С. 106–114.
2. Сафин Р. Р., Салимгараева Р. В., Прокопьев А. А. Исследование гигроскопичности ацелированного древесного шпона // Новые материалы и перспективные технологии лесопромышленного комплекса. Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов. Воронеж, 2022. С. 86–91.
3. Прокопьев А. А., Салимгараева Р. В., Сафин Р. Р. Снижение смачиваемости древесины путем ацелирования // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. Труды XVII Международного Евразийского симпозиума. Екатеринбург, 2022. С. 60–65.
4. Прокопьев А. А., Саерова К. В., Сафин Р. Р. Древесина как наполнитель для композиционных материалов, способы ее предварительной обработки // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2022. № 62. С. 321–324.
6. Dhruv Rathod, Mihir Rathod, Ronak Patel, S.M. Shahabaz, S. Divakara Shetty & Nagaraja Shetty | (2021) A review on strengthening, delamination formation and suppression techniques during drilling of CFRP composites, Cogent Engineering, 8:1, 1941588, DOI: 10.1080/23311916.2021.1941588.
7. Roger M. Rowell USDA FS (2006) Chemical modification of wood: A short review, Wood Material Science & Engineering, 1:1, 29-33, DOI: 10.1080/17480270600670923.
8. ГОСТ 4650-2014 Пластмассы. Методы определения водопоглощения. <https://docs.cntd.ru/document/1200110854> (Дата обращения 20.03.2023).

УДК 674.047

Анатолий Геннадиевич Поздеев, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и водоснабжение», PozdeevAG@volgatech.net

Виталий Геннадьевич Котлов, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и водоснабжение», KotlovVG@volgatech.net

Юлия Анатольевна Кузнецова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и водоснабжение», KuznecovaYA@volgatech.net

Поволжский государственный технологический университет, Россия, г. Йошкар-Ола

Автоматизация расчета источников теплоснабжения сушильной камеры

Аннотация. Цель работы состоит в автоматизации расчетов источников теплоснабжения малогабаритных сушильных камер. В качестве методов разработки используются положения теории тепломассообмена, теории горения и информационных технологий. Для теплоснабжения сушильной камеры рекомендуется вариант теплоснабжения от печи для сжигания отходов древесины. Разработанный в среде MathCad автоматизированный расчет позволяет последовательно вычислить количество воздуха необходимое для полного сгорания топлива, выделяемого водяного пара и топочных газов, теплотворную способность топлива, теплосодержание и содержание углекислоты и кислорода в топочных газах. В результате выводятся температура и скорость топочных газов, затраты топлива на сушку и весовое напряжение колосниковой решетки.

Ключевые слова: сушильная камера, тепломассообмен, отходы древесины, MathCad, воздух, водяной пар, топочные газы, теплотворная способность, теплосодержание, топливо, весовое напряжение, колосниковая решетка.

Anatoly G. Pozdeev, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor of the Department of Building Structures and Water Supply, PozdeevAG@volgatech.net

Vitaly G. Kotlov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor of the Department of Building Structures and Water Supply, KotlovVG@volgatech.net

Yulia A. Kuznetsova, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures and Water Supply, KuznecovaYA@volgatech.net

Volga State Technological University, Russia, Yoshkar-Ola

Automation of calculation of heat supply sources of drying chamber

Abstract. The purpose of the work is to automate calculations of heat supply sources for small-sized drying chambers. The provisions of the theory of heat and mass transfer, gorenje theory and information technologies are used as methods of development. For the heat supply of the drying chamber, a heat supply option from a wood waste incinerator is recommended. The automated calculation developed in the MathCad environment allows you to consistently calculate the amount of air required for the complete combustion of fuel, the released water vapor and flue gases, the calorific value of fuel, the heat content and the content of carbon dioxide and oxygen in flue gases. As a result, the temperature and speed of the flue gases, the cost of fuel for drying and the weight stress of the grate are displayed.

Keywords: drying chamber, heat and mass transfer, wood waste, MathCad, air, water vapor, flue gases, calorific value, heat content, fuel, weight voltage, grate.

В качестве базового варианта теплофикационной установки сушильной камеры выбрана теплоэнергетическая установка «Прометей-60», работающая на сыпучих древесных и кусковых отходах длиной до 0,7 м (рисунок 1).

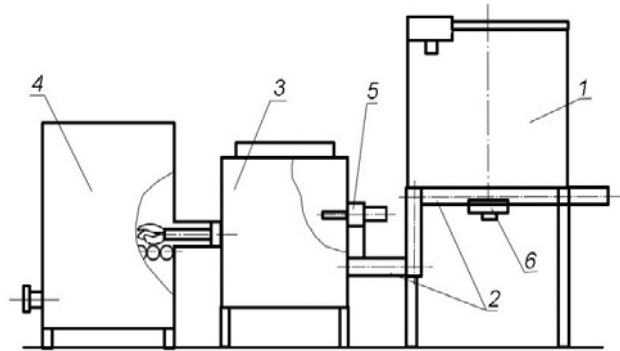


Рисунок 1 – Схема энергетического комплекса «Прометей-60»:

1 – бункер; 2 – транспортер шнековый механизма подачи топлива; 3 – газогенератор; 4 – котел водяной; 5 – вентилятор наддува; 6 – контроллер управления двигателем редуктора

«Прометей-60» как и прочие современные газогенераторные установки все еще остаются сравнительно дорогостоящей, энергетически недостаточно эффективной, сложной в эксплуатации и требующей привлечения высококвалифицированной рабочей силы [3].

В этой связи предлагается разработка упрощенной теплофикационной установки с печью для сжигания отходов. Представленный ниже автоматизированный расчет на основе среды MathCad [2] позволяет последовательно вычислить количество воздуха для полного сгорания топлива, количество выделяемого водяного пара и топочных газов, получаемых при сгорании топлива, теплотворную способность топлива, теплосодержание топочных газов, содержание углекислоты и кислорода в топочных газах. В результате определяются температура и скорость топочных газов, затраты топлива на сушку и весовое напряжение колосниковой решетки [4].

Начальная влажность древесины $W_n = 100 \%$.

Конечная влажность древесины $W_k = 6 \%$.

Средняя влажность древесины $W = (W_n + W_k) / 2, \%$.

Углеродная составляющая с учетом влажности $C_p = 49,2 \cdot (100 - W) / 100 = 23,124$.

Элементарный состав древесины: водород $H_p = \frac{6,1}{49,2} \cdot C_p = 2,867$; кислород

$$O_p = \frac{42,0}{49,2} \cdot C_p = 19,74.$$

Масса сухого воздуха, теоретически необходимого для сгорания 1 кг топлива, не имеющего серы $G_0 = 0,115 \cdot C_p + 0,342 \cdot H_p - 0,043 \cdot O_p = 2,791$ кг/кг.

Объемный расход воздуха при нормальных условиях ($p = 10^5$ Па и $t = 0^\circ\text{C}$) $V_0 = 0,0596 \cdot (100 - W) = 2,801$ м³/кг.

Объемный расход воздуха $V_0 = 0,0477 \cdot (100 - W) = 2,242$ м³/кг.

Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 2,5$.

Поступающая масса воздуха $G_a = \alpha \cdot G_0 = 6,977$ кг/кг.

Поступающий объем воздуха $V_a = \alpha \cdot V_0 = 7,003$ м³/кг.

Приведенная плотность водяного пара $\rho_n = 0,804$ кг/м³.

Масса водяного пара в топочных газах $G_n = 0,549 + 0,00451 \cdot W = 0,788$ кг/кг.

Объем водяного пара в топочных газах $V_n = G_n / \rho_n = 0,98$ м³/кг.

Влагосодержание пара, поступающего с воздухом $d_0 = 10$ г/кг.

Количество пара в топочных газах по массе $G_{\text{пт}} = 0,0000596 \cdot \alpha \cdot d_0 \cdot (100 - W) = 0,07$ кг/кг.

Общее количество пара по массе $G_{\text{по}} = G_{\text{п}} + G_{\text{пт}} = 0,858$ кг/кг.

Общее количество по объему $V_{\text{по}} = V_{\text{п}} + G_{\text{пт}} / \rho_{\text{п}} = 1,067$ м³/кг.

Вес сухих топочных газов на 1 кг древесного топлива складывается из количества сгоревшего топлива (1 кг) и поступившего в топку воздуха αG_0 за вычетом золы и отдельно учитываемого водяного пара $G_{\text{сг}} = (0,00431 + 0,0595 \cdot \alpha) \cdot (100 - W) = 7,194$ кг/кг.

Влагосодержание продуктов сгорания $d = \frac{9210 + 72,7}{(0,072 + \alpha) \cdot (100 - W)} + d_0 = 86,79$ г/кг.

Различают высшую $Q_{\text{в}}^{\text{п}}$ и низшую $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ теплотворную способность древесного топлива, различающиеся на скрытую теплоту водяного пара [1].

Низшая теплотворность, $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 18436 - 208 \cdot W = 7,412 \times 10^3$ кДж/кг.

Высшая теплотворность, $Q_{\text{в}}^{\text{п}} = 196 \cdot (100 - W) = 9,212 \times 10^3$ кДж/кг.

Энтальпия воздуха, поступающего в топку $J_0 = 40$ кДж/кг.

Теплосодержание топочных газов $J = (3270 + \alpha \cdot J_0) / (0,072 + \alpha) = 1,31 \times 10^3$ кДж/кг.

Содержание углекислого газа в процентах от объема абсолютно сухих топочных газов $CO_2 = 20,2 / \alpha = 8,08$ %.

Свободный кислород в топочных газах при $\alpha > 1$ в процентах к объему газов $O_2 = 21 - 1,04 \cdot CO_2 = 12,597$ %.

Удельная теплоемкость топочных газов $C_{\text{сг}} = 1,089$ кДж/(кг·°C).

Теплоемкость водяного пара, $C_{\text{п}} = 2,133$ кДж/(кг·°C).

Температура топочных газов $t_{\text{гр}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}} + \alpha \cdot G_0 \cdot J_0}{G_{\text{сг}} \cdot C_{\text{сг}} + G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}}} = 808,318$ °C.

Часовой теоретических расход топлива при тепловой мощности источника $Q_{\text{ист}} = 148,859$ кг/час равен $G_{\text{т}} = \frac{3600 \cdot Q_{\text{ист}}}{G_{\text{сг}} \cdot J} = 56,9$ кг.

Кпд топки (с учетом кпд теплообменника) $\xi_{\text{т}} = 0,3$.

Часовой теоретический расход топлива $G_{\text{т}} = G_{\text{т}} / \xi_{\text{т}} = 189,512$ кг/ч.

Плотность дымовых газов $\rho_{\text{г}} = 0,25$ м³/ч.

Объемный часовой расход дымовых газов $V_{\text{тч}} = (G_{\text{сг}} / \rho_{\text{г}} + V_{\text{п}}) \cdot G_{\text{т}} = 5,639 \times 10^3$ м³/ч.

Объемный секундный расход дымовых газов $V_{\text{тс}} = V_{\text{тч}} / 3600$ м³/ч.

Рекомендуемое значение скорости движения дымовых газов лежит в пределах $\omega = 1 \dots 10$ м/с. Рекомендуется обеспечить скорость не менее 8 м/с, чтобы избежать загрязнения поверхности труб.

Диаметр условного прохода трубы дымохода $d_{\text{уд}} = 0,5$ м.

Живое сечение дымохода $F_{\text{г}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{уд}}^2}{4} = 0,196$ м².

Скорость движения дымовых газов $\omega := V_{\text{тс}} / F_{\text{г}} = 7,978$ м/с.

Количество сжигаемого топлива $G_{\text{т}} = 189,512$ кг/ч.

Весовое напряжение колосниковой решетки $R = \begin{cases} 250 & \text{if } W < 25 \\ 200 & \text{if } 25 \leq W < 40, \\ 150 & \text{otherwise} \end{cases} \quad R = 150$

кг/(ч·м²).

Площадь колосниковой решетки $F_p = G_t/R = 1,263 \text{ м}^2$.

Живое сечение колосниковой решетки $F_{\text{ржс}} = 0,18 \cdot F_p = 0,227 \text{ м}^2$.

Ниже приводится характеристика топки для сжигания древесных отходов.

Печь для сжигания отходов (рисунок 2) работает следующим образом: через топочную дверцу 5 отходы загружаются на колосниковую решетку 7, а очаговые остатки сбрасываются в зольник 6.

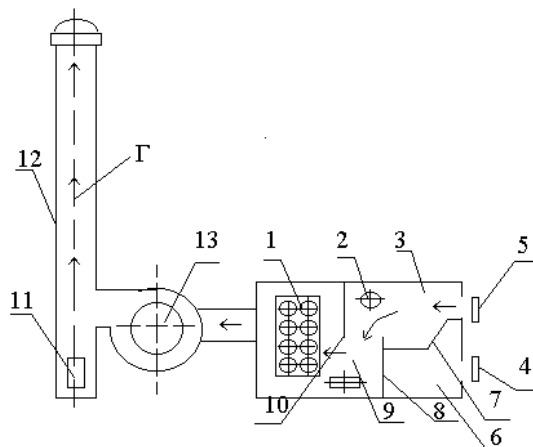


Рисунок 2 – Печь для сжигания отходов древесины

Воздух для горения поступает через дверцу 4. Уходящие газы с остатками несгоревшего топлива через камеру сгорания 3 поступают в камеру дожигания 9, отделенную перегородкой 8 от зоны основного горения. В верхней части камеры дожигания может быть установлена горелка 2 для устойчивого дожигания мелких частиц. Перегородка 10 отделяет камеру дожигания от теплообменника 1. С помощью вентилятора 13 дымовые газы просасываются сквозь теплообменник и поступают в дымовую трубу 12, снабженную дверцей 11 для уборки сажи.

Библиографический список

1. Бретшайдер С. Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета. Л. : Химия, 1966. 536 с.
2. Семененко М. Г. Математическое моделирование в MathCad. М. : Альтекс-А, 2003. 208 с.
3. Поздеев А. Г., Котлов В. Г., Кузнецова Ю. А. Автоматизация расчетов процесса сушки древесины: монография. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2017. 128 с.
4. Хзмалян Д. М., Каган Я. А. Теория горения и топочные устройства. Под ред. Д. М. Хзмаляна. Учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений. М. : Энергия, 1976. 488 с.

УДК 674.047

Виталий Геннадьевич Котлов, доктор технических наук, профессор кафедры
«Строительные конструкции и водоснабжение», KotlovVG@volgatech.net

Анатолий Геннадиевич Поздеев, доктор технических наук, профессор кафедры
«Строительные конструкции и водоснабжение», PozdeevAG@volgatech.net

Юлия Анатольевна Кузнецова, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Строительные конструкции и водоснабжение», KuznecovaYA@volgatech.net

Поволжский государственный технологический университет, Россия, г. Йошкар-Ола

Информационно-технологическое обеспечение расчета сушильной установки

***Аннотация.** Целью исследования является разработка средств автоматизированного расчета параметров сушильных камер, использующих отходы переработки древесины для производства тепловой энергии, адаптированных к условиям деятельности предприятий лесного комплекса [1]. В качестве методов расчета используются положения аэродинамики и информационных технологий. В проектном варианте сушильной камеры, расчеты которой выполнены расчеты в среде MathCad [2], применен принцип эжекции с реверсированием подачи теплоносителя через сопла. Предложена методика аэродинамического расчета сушильной камеры в среде MathCad. На основе схемы циркуляционной системы в автоматическом режиме вычисляются величины потерь напора на трение и местные сопротивления.*

***Ключевые слова:** сушильная камера, автоматизированный расчет, эжекционно-реверсивная камера, каналы, сопло, потери напора, MathCad.*

Vitaly G. Kotlov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor
of the Department of Building Structures and Water Supply, KotlovVG@volgatech.net

Anatoly G. Pozdeev, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor
of the Department of Building Structures and Water Supply, PozdeevAG@volgatech.net

Yulia A. Kuznetsova, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor
of the Department of Building Structures and Water Supply, KuznecovaYA@volgatech.net
Volga State Technological University, Russia, Yoshkar-Ola

Information technology support for the calculation of the drying plant

***Abstract.** The purpose of the study is to develop means for automated calculation of parameters of drying chambers using waste wood processing for thermal energy production, adapted to the conditions of forest complex enterprises [1]. Aerodynamics and information technology positions are used as calculation methods. In the design version of the drying chamber, calculations of which were performed in MathCad medium [2], the principle of ejection with the reversal of the coolant supply through the nozzles is applied. Proposed method of aerodynamic calculation of drying chamber in MathCad medium. Values of head losses for friction and local resistances are calculated on the basis of circuit of circulation system in automatic mode.*

***Keywords:** drying chamber, automated calculation, ejection-reversing chamber, channels, nozzle, head loss, MathCad.*

В распространенных сушильных установках, сжигающих древесные отходы, на высушивание 1 м³ древесины расходуется в среднем 0,4 м³ древесного топлива. Уменьшение теплотерь в сушильной установке может быть осуществлено за счет сокращения звеньев преобразования теплоты, например, путем сушки непосредственно дымовыми газами (рисунок 1).

Удельный расход влажного древесного топлива при таких схемах преобразования теплоты составляет около 0,2 м³ на 1 м³ высушиваемых пиломатериалов. Общий КПД сушильной установки по приведенной схеме составляет 0,4.

В качестве базового объекта выбрана мобильная сушильная камера ЛСК-ТГ-10, наиболее пригодная в условиях малых предприятий лесного комплекса.

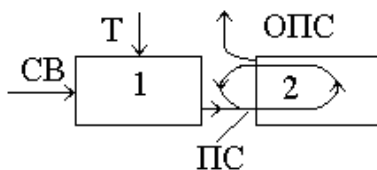


Рисунок 1 – Структурная схема сушильной установки с прямым использованием теплоты:

СВ – свежий воздух; Т – топливо; ПС – продукты сгорания; ОПС – отработанные продукты сгорания; 1 – топка; 2 – материал

В проектом варианте сушильной камеры, для которого выполнены расчеты в среде MathCad [2], для улучшения равномерности сушки применен принцип эжекции с нижней реверсируемой подачей дымовых газов (рисунок 2).

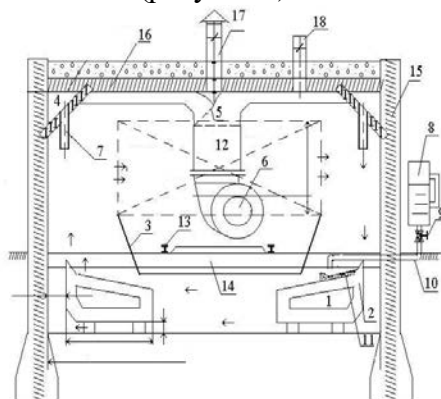


Рисунок 2 – Проектный вариант сушильной камеры (поперечный разрез) [5]:

1 – газоходы; 2 – рассекаТЕЛЬ струи; 3 – экран; 4 – напорный канал; 5 – шибер; 6 – центробежный вентилятор; 7 – насадки; 8 – бачок с водой; 9 – запорный кран; 10 – трубка; 11 – смачивающий канал; 12 – штабель; 13 – рельсы; 14 – несущие балки; 15 – ограждения; 16 – перекрытие; 17 – вытяжная труба; 18 – приточная труба

При аэродинамическом расчете сушильной камеры в первую очередь определяется площадь сечений каналов на участках циркуляции агента сушки [3].

Участок 1 – циркуляционно-смесительный канал. Внутренний размер камеры по длине $L_k = 7,5$ м. Высота циркуляционного канала $h_1 = 0,3$ м. Площадь циркуляционно-смесительного канала $f_1 = h_1 \cdot L_k = 2,25$ м².

Участки 2, 10 – повороты под углом 135°. Минимальное расстояние между экраном и наклонной стенкой распределительного канала с насадками $h_{\min} = 0,5$ м. Площадь сечения распределительного канала $f_{2-10} = h_{\min} \cdot L_k = 3,75$ м².

Участки 3, 9 – боковые каналы. Высота бокового канала $h_{3-9} = 0,5$ м. Площадь сечения бокового канала $f_{3-9} = h_{3-9} \cdot L_k = 3,75$ м².

Участки 4, 8 – повороты под углом 90°. Высота поворота под углом 90° $h_{4-8} = 0,5$ м. Площадь сечения поворота под углом 90° $f_{4-8} = h_{4-8} \cdot L_k = 3,75$ м².

Участок 5 – вход в штабель. Высота входа в штабель $h_5 = 0,5$ м. Площадь сечения поворота под углом 90° $f_5 = F_{\text{жсещшт}} = 3,0$ м².

Участок 6 – штабель $f_6 = F_{\text{жсещшт}} = 3,0$ м².

Участок 7 – выход из штабеля $f_7 = F_{\text{жсечшт}} = 3,0 \text{ м}^2$.

По объему циркулирующего воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$, находим скорости циркуляции воздуха по участкам: $V_{\text{ц}} = V_{\text{ц}}/3600 = 3,0 \text{ м/с}$, $U_1 = V_{\text{ц}}/f_1 = 1,35 \text{ м/с}$, $U_{2-10} = V_{\text{ц}}/f_{2-10} = 0,81 \text{ м/с}$, $U_{3-9} = V_{\text{ц}}/f_{3-9} = 0,81 \text{ м/с}$, $U_{4-8} = V_{\text{ц}}/f_{4-8} = 0,81 \text{ м/с}$, $U_5 = V_{\text{ц}}/f_5 = 1 \text{ м/с}$, $U_6 = V_{\text{ц}}/f_6 = 1 \text{ м/с}$, $U_7 = V_{\text{ц}}/f_7 = 1 \text{ м/с}$.

Участок 1 является внезапным сужением на входе в эжекционную камеру и внезапным расширением на выходе из нее с отношением площадей $f_{1\text{вс}} = f_1/F_{\text{жсечшт}}$. Сплайн-аппроксимация коэффициента сопротивления при внезапном сужении имеет вид:

$$\text{tab}_f = (0,01 \quad 0,1 \quad 0,2 \quad 0,4 \quad 0,6 \quad 0,8 \quad 1,0)^T,$$

$$\text{tab}_{\xi_{\text{вс}}} = (0,5 \quad 0,46 \quad 0,42 \quad 0,34 \quad 0,25 \quad 0,15 \quad 0)^T, \quad \xi_{\text{вс}} = \text{pspline}(\text{tab}_f, \text{tab}_{\xi_{\text{вс}}}),$$

$$\xi_{\text{вс}}(f_{1\text{вс}}) := \text{interp}(\xi_{\text{вс}}, \text{tab}_f, \text{tab}_{\xi_{\text{вс}}}, f_{1\text{вс}}), \quad \xi_{1\text{вс}} = \xi_{\text{вс}}(f_{1\text{вс}}) = 0,183.$$

Коэффициент сопротивления при внезапном расширении равен $\xi_{1\text{расш}} = (1 - f_{1\text{вс}})^2 = 0,067$. Суммарное значение коэффициента местных сопротивлений участка 1 $\xi_1 = \xi_{1\text{вс}} + \xi_{1\text{расш}} = 0,249$. Коэффициенты сопротивления трения равны: для металлических каналов – 0,03; для неоштукатуренных каналов – 0,04. Для участка 1 коэффициент потерь на трение $\lambda_1 = 0,03$. Длина участка 1 равна $L_1 = 2 \text{ м}$. Периметр канала перпендикулярно потоку воздуха $\Pi_1 = 2 \cdot h_1 + 2 \cdot L_k$. Для расчета используется эквивалентный диаметр участка 1 $d_{\text{эк1}} = 4 \cdot f_1 / \Pi_1 = 0,577 \text{ м}$. Относительная длина участка 1 равна $l_1 = L_1 / d_{\text{эк1}} = 3,47$.

На участках 2 и 10 потерь по длине нет ($\lambda_{2,10} = 0$), а сопротивления на повороты на 135° определяются сплайном:

$$\text{tab}_{\alpha_{\text{пов}}} = (90 \quad 120 \quad 135 \quad 150)^T, \quad \text{tab}_{\xi_{\text{пов}}} = (1,1 \quad 0,55 \quad 0,25 \quad 0,2)^T,$$

$$\xi_{2-10\text{пов}} = \text{pspline}(\text{tab}_{\alpha_{\text{пов}}}, \text{tab}_{\xi_{\text{пов}}}),$$

$$\xi_{2-10\text{пов}}(\alpha_{\text{пов}}) = \text{interp}(\xi_{2-10\text{пов}}, \text{tab}_{\alpha_{\text{пов}}}, \text{tab}_{\xi_{\text{пов}}}, \alpha_{\text{пов}}),$$

$$\alpha_{\text{пов}} = 135, \quad \xi_{2-10} = \xi_{2-10\text{пов}}(\alpha_{\text{пов}}) = 0,25.$$

Участки 3, 9 представляют собой боковые каналы, не имеющие местных сопротивлений $\xi_{3-9} = 0$. Коэффициент сопротивления трения участков равен $\lambda_{3-9} = \lambda_1 = 0,03$. Длина участков 3, 9 равна $l_{3-9} = 2 \text{ м}$. Периметр канала в плоскости, перпендикулярной потоку воздуха $\Pi_{3-9} = 2 \cdot h_{3-9} + 2 \cdot L_k$. Для расчета используется эквивалентный диаметр участка 1 $d_{\text{эк3-9}} = 4 \cdot f_{3-9} / \Pi_{3-9} = 0,938 \text{ м}$. Длина участков 3, 9 в безразмерной форме равна $l_{3-9} = l_{3-9} / d_{\text{эк3-9}} = 2,133$.

Участки 4, 8 являются местными сопротивлениями поворотов на 90° . По таблицам их значение равно $\xi_{4-8} = 1,1$. Потерь по длине нет ($\lambda_{4-8} = 0$).

Участок 5 является входом в штабель (внезапное сужение потока). Площадь бокового сечения штабеля $F_{\text{шт}} = H \cdot L$, м^2 . Отношение площадей $f_{5\text{вс}} = f_5 / F_{\text{шт}} = 0,404$. Величина местного сопротивления $\xi_{5\text{вс}}(f_{5\text{вс}}) = \text{interp}(\xi_{\text{вс}}, \text{tab}_f, \text{tab}_{\xi_{\text{вс}}}, f_{5\text{вс}})$, $\xi_5 = \xi_{5\text{вс}}(f_{5\text{вс}}) = 0,338$. Потерь на трение нет $\lambda_5 = 0$.

На участке 6 при толщине досок $S_1 = 40 \text{ мм}$ и толщине прокладок $S_{\text{пр}} = 25 \text{ мм}$ коэффициент сопротивления штабеля равен $\eta_{\text{таб}} = 20$. Скорость агента сушки перед штабелем

$U_{\text{таб}} = V_{\text{ц}} / F_{\text{шт}} = 0,4 \text{ м/с}$. Плотность горячего воздуха $\rho_{\text{в}} = \rho_{\text{в}}(t_{\text{с}}) = 4,48 \text{ кг/м}^3$. Сопротивление одного ряда штабелей $\Delta h_{\text{шт}} = \eta_{\text{таб}} \cdot \frac{\rho_{\text{в}} \cdot U_{\text{таб}}^2}{2} = 7,491 \text{ Па}$. На участке 6 потерь по длине нет ($\lambda_6 = 0$).

Участок 7 – выход из штабеля – является только местным сопротивлением ($\lambda_7 = 0$). Отношение площадей равно $f_{7\text{вс}} = f_7 / F_{\text{шт}} = 0,404$. Местное сопротивление $\xi_{7\text{вс}}(f_{7\text{вс}}) = \text{interp}(\xi_{\text{вс-}}, \text{tab}_f, \text{tab}_\xi, f_{7\text{вс}})$, $\xi_7 = \xi_{7\text{вс}}(f_{7\text{вс}}) = 0,338$.

Потери напора участках равны:

$$\Delta h_1 = \frac{\rho_{\text{в}} \cdot U_1^2}{2} \cdot (\xi_1 + \lambda_1 \cdot l_{1-}) = 1,47 \text{ Па}; \Delta h_{2-10} = \frac{\rho_{\text{в}} \cdot U_{2-10}^2}{2} \cdot \xi_{2-10} \cdot 2 = 0,749 \text{ Па};$$

$$\Delta h_{3-9} = \frac{\rho_{\text{в}} \cdot U_{3-9}^2}{2} \cdot \lambda_{3-9} \cdot l_{3-9} \cdot 2 = 0,192 \text{ Па}; \Delta h_{4-8} := \frac{\rho_{\text{в}} \cdot U_{4-8}^2}{2} \cdot \xi_{4-8} \cdot 2 = 3,296 \text{ Па};$$

$$\Delta h_5 = \frac{\rho_{\text{в}} \cdot U_5^2}{2} \cdot \xi_5 \cdot 2 = 1,55 \text{ Па}; \Delta h_6 = \Delta h_{\text{шт}} = 7,49 \text{ Па}; \Delta h_7 = \frac{\rho_{\text{в}} \cdot U_7^2}{2} \cdot \xi_7 = 0,77 \text{ Па}.$$

Сумма сопротивлений по участкам равна

$$\sum h_i = \Delta h_1 + \Delta h_{2-10} + \Delta h_{3-9} + \Delta h_{4-8} + \Delta h_5 + \Delta h_6 + \Delta h_7 = 15,52 \text{ Па}.$$

Кратность эжекции $m = V_{\text{ц}} / V_{\text{эж}} = 3...5$, где $V_{\text{эж}}$ – количество эжектирующего агента сушки, перемещаемого вентилятором $m_{\text{эж}} = 3,5$.

При скорости воздуха в циркуляционно-смесительном канале $U_1 = V_{\text{ц}} / f_1 = 1,35 \text{ м/с}$, динамическое давление равно $h_1 = \rho_{\text{в}} \cdot U_1^2 / 2 = 4,16 \text{ Па}$.

Расчет эжектора камеры проводится по номограмме [5]. Коэффициент противодействия равен $\varepsilon = \sum h_i / h_1 = 3,73$. Из номограммы определяется относительный размер циркуляции канала $\delta = 8$. Суммарная площадь насадок составляет $f_{\text{нас}} = f_1 / \delta^2 = 0,035 \text{ м}^2$. Выходное сечение прямоугольной насадки имеет размеры $f_{\text{вых}} = 0,05 \cdot 0,1 = 5 \times 10^{-3}$. Число насадок равно $n_{\text{нас}} = f_{\text{нас}} / f_{\text{вых}} = 7,031$, $n_{\text{нас}} = \text{trunc}((n_{\text{нас}} + 1)) = 8$. Крайние насадки рекомендуется располагать на расстоянии 1...1,25 м от торцевых стен. Распределительный канал имеет длину $L_{\text{р}} = L_{\text{к}} - 2 \cdot 1,25 = 5 \text{ м}$. Шаг насадок $l_{\text{нас}} = L_{\text{р}} / (n_{\text{нас}} - 1) = 0,71 \text{ м}$.

Количество эжектирующего агента сушки $V_{\text{эж}} = V_{\text{ц}} / m_{\text{эж}} = 0,867 \text{ м}^3/\text{с}$. Скорость выхода агента сушки из насадок $V_{\text{нас}} = V_{\text{эж}} / f_{\text{нас}} = 24,65 \text{ м/с}$. Эта скорость должна быть не ниже 25...30 м/с, что удовлетворяется. Скорость в распределительном канале $V_{\text{кан}} = V_{\text{нас}} / 3 = 8,22 \text{ м/с}$. Площадь распределительного канала $f_{\text{раскан}} = V_{\text{эж}} / V_{\text{кан}} = 0,105 \text{ м}^2$.

При установке центробежного вентилятора рассчитывается сопротивление входа в вентилятор $\Delta h_{\text{вх}}$, сопротивление на начальном участке распределительного канала $\Delta h_{\text{кан}}$ и сопротивление от вентилятора до распределительного канала $\Delta h_{\text{возд}}$ [4].

Библиографический список

1. Болдырев П. В. Сушка древесины. СПб. : Профи-Информ, 2005. 168 с.
2. Кирьянов Д. В. Mathcad 14. СПб. , 2007. 682 с.
3. Вентиляторы и воздушно-отопительные агрегаты. (1 часть). Каталог-справочник. М. : Объединение Матмир, 1992. 220 с.
4. Вентиляторы и воздушно-отопительные агрегаты. (2 часть). Каталог-справочник. М. : Объединение Матмир. 1992. 190 с.
5. Поздеев А. Г., Котлов В. Г., Кузнецова Ю. А. Автоматизация расчетов процесса сушки древесины: монография. Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2017. 128 с.

УДК 674.047

Анатолий Геннадиевич Поздеев, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и водоснабжение», PozdeevAG@volgatech.net

Виталий Геннадьевич Котлов, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и водоснабжение», KotlovVG@volgatech.net

Юлия Анатольевна Кузнецова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и водоснабжение», KuznecovaYA@volgatech.net

Поволжский государственный технологический университет, Россия, г. Йошкар-Ола

Автоматизированные расчеты конструктивных элементов сушильной камеры

Аннотация. Целью работы является автоматизация расчетов теплофизических параметров газохода сушильной камеры. В качестве методов расчета используются положения теории тепломассообмена и информационных технологий. Программа в среде MathCad позволяет на основании аэродинамического расчета сушильной камеры определить геометрические, кинематические и теплофизические характеристики дымовых газов используемых в качестве греющего агента. Вычислены расходы и скорости воздуха, циркулирующего внутри камеры. На основании гидравлических и теплофизических критериев вычислен коэффициент теплопередачи от дымовых газов к нагреваемому воздуху и определены параметры газохода, используемого в качестве рекуперативного теплообменника.

Ключевые слова: теплофизические параметры, газоход, сушильная камера, MathCad, аэродинамический расчет, дымовые газы, греющий агент, воздух, коэффициент теплопередачи рекуперативный теплообменник.

Anatoly G. Pozdeev, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor of the Department of Building Structures and Water Supply, PozdeevAG@volgatech.net

Vitaly G. Kotlov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor of the Department of Building Structures and Water Supply, KotlovVG@volgatech.net

Yulia A. Kuznetsova, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures and Water Supply, KuznecovaYA@volgatech.net
Volga State Technological University, Russia, Yoshkar-Ola

Automated calculations of structural elements of the drying chamber

Abstract. The purpose of the work is to automate calculations of thermophysical parameters of the gas duct of the drying chamber. As calculation methods, the provisions of the theory of heat and mass exchange and information technologies are used. The program in the MathCad environment allows you to determine the geometric, kinematic and heating characteristics of flue gases used as a heating agent based on the aerodynamic calculation of the drying chamber. Flow rates and velocities of air circulating inside the chamber are calculated. Based on hydraulic and thermophysical criteria heat transfer coefficient from flue gases to heated air is calculated and parameters of gas duct used as recuperative heat exchanger are determined.

Keywords: thermophysical parameters, gas duct, drying chamber, MathCad, aerodynamic calculation, flue gases, heating agent, air, recovery heat exchanger heat transfer factor.

В стационарном варианте сушильной камеры может быть применен существенно более экономичный по сравнению с газогенераторной установкой вариант теплоснабжения камеры от печи для сжигания отходов древесины.

Процесс нагрева сушильного агента в схеме, представленной на рисунке (рисунок 1) осуществляется с помощью стационарного кирпичного газохода (борова), по которому воз-

дух движется поперек наружной поверхности газохода в сушильной камере, проходя последовательно две его ветви и нагревается от исходной температуры в камере до температуры заданной по технологическим условиям сушки. По внутреннему каналу трубы газохода движется дымовой газ (состав $\bar{P}_{CO_2} = 0,13$; $\bar{P}_{H_2O} = 0,11$; $\bar{P}_{N_2} = 0,76$) и охлаждается до температуры отработанных газов [4].

Ниже представлен уточненный расчет теплообменника, выполненный в прикладной программной среде MathCad [2].

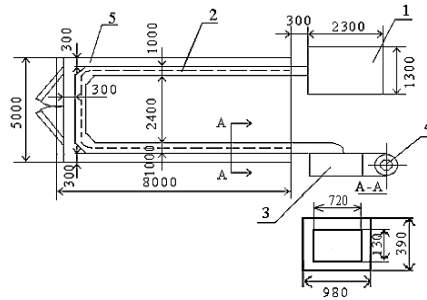


Рисунок 1 – Схема расположения печи и газохода:

1 – печь; 2 – газоход; 3 – дымосос; 4 – труба; 5 – сушильная камера

Наружная высота сечения газохода $h_{сгн} = 0,39$ м. Наружная ширина сечения газохода $b_{сгн} = 0,98$ м. Длина продольных участков оси газохода $L_{прт} = 8$ м. Длина поперечного участка оси газохода $L_{шт} = 5$ м.

Расход циркулирующего воздуха $V_{ц} = 1,092 \times 10^4$ м³/ч.

Температура по сухому термометру $t_1 = 75$ °С. Температура среды в камере $t_c = 72,8$ °С. Начальная температура дымового газа $t_{1г} = 808,3$ °С. Конечная температура дымового газа $t_{2г} = 400$ °С.

Коэффициент теплопередачи $k_t = 19,8$ Вт/(м²·К).

Соппротивление проходу воздуха для одной ветви дымохода $\Delta_{рв} = 28,9$ Па.

Полная потеря напора на участке теплообмена $\sum \Delta_{рв} = 57,9$ Па.

Средняя температура воздуха $t_c = 72,8$ °С. Параметры воздуха в теплообменнике, определяемые по средней температуре воздуха: плотность $\rho_{вт} = 1,01$ кг/м³; теплоемкость $c_{рвт} = 1,009 \times 10^3$ Дж/(кг·К); коэффициент теплопроводности $\lambda_{вт} = 0,03$ Вт/(м·К); кинематическая вязкость $\nu_{вт} = 2,032 \times 10^{-5}$ м²/с; число Прандтля $Pr_{вт} = 0,698$ [1].

Тепловой приток к воздуху $Q_{вт} = 27,23$ кВт. Температурные напоры $\Delta t_t = 329,4$ °С, $\Delta t_\delta = 733,3$ °С. Температурный напор при противотоке $\Delta t_{српрот} = 504,7$ °С.

Значения параметров к номограмме [3] зависимости $\varepsilon = f(P, R)$ $P_b = 0,557$, $R_b = 0,011$. По номограмме принимаем $\varepsilon = 1$, тогда средняя температура теплообменника $\Delta t_{ср} = 504,7$ °С.

Коэффициент теплоотдачи от дымовых газов стенке $\alpha_1 = 50$ Вт/(м²·К) [5]. Коэффициент теплоотдачи от стенки воздуху $\alpha_2 = 14$ Вт/(м²·К). Толщина стенки $\delta_c = 0,13$ м. Коэффициент теплопроводности кирпича $\lambda_k = 0,6$ Вт/(м·К).

$$\text{Коэффициент теплопередачи равен } k_{тг} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_2}} = 3,246 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}.$$

Плотность теплового потока $q_{0r} = k_{tr} \cdot \Delta t_{cp} = 1,638 \times 10^3 \text{ Вт/м}^2$.

Температура стенки со стороны воздуха $t_{w1r} = t_1 + q_{0r} / \alpha_2 = 192,0^\circ\text{C}$.

Температура стенки со стороны дымовых газов $t_{w2r} = t_{w1r} + q_{0r} \cdot \delta_r / \lambda_k = 547,0^\circ\text{C}$.

Внутренняя площадь сечения газохода $F_{гвн} = 0,13 \cdot 0,72 = 0,094 \text{ м}^2$.

Смоченный внутренний периметр газохода $\chi_{вн} = 2 \cdot 0,13 + 2 \cdot 0,72 = 1,7 \text{ м}$.

Характерный внутренний размер сечения по ходу газов $d_{вн} = F_{гвн} / \chi_{вн} = 0,055 \text{ м}$.

Число Рейнольдса для воздуха $Re_{в1r} = U_{в} \cdot d_{вн} / \nu_{вт} = 1,705 \times 10^4$.

Число Прандтля для воздуха $Pr_{вн} = 0,698$.

Число Нуссельта $Nu_{в1r} = 0,021 \cdot Re_{в1r}^{0,8} \cdot Pr_{вт}^{0,43} = 43,702$

Теплопроводность воздуха $\lambda_{1в} = 0,03 \text{ Вт/(м·K)}$.

Коэффициент теплоотдачи от стенки воздуху $\alpha_{1вr} = Nu_{в1r} \cdot \lambda_{1в} / d_{вн} = 23,718 \text{ Вт/(м}^2\text{·K)}$.

Средняя температура дымовых газов $t_{гср} = 604,16^\circ\text{C}$.

Физические константы дымовых газов: плотность $\rho_{г2} = 0,525 \text{ кг/м}^3$; теплоемкость $C_{pг2} = 1,151 \text{ кДж/(кг·K)}$; теплопроводность $\lambda_{г2} = 5 \times 10^{-2} \text{ Вт/(м·K)}$; вязкость $\nu_{г2} = 60,38 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; число Прандтля $Pr_{г2} := 0,64$.

Наружная площадь сечения газохода $F_{сгн} = h_{сгн} \cdot b_{сгн} = 0,382 \text{ м}^2$.

Смоченный наружный периметр газохода $\chi_{н} = 2 \cdot (h_{сгн} + b_{сгн}) = 2,74 \text{ м}$.

Характерный внутренний размер сечения по ходу воздуха $d_{н} = F_{сгн} / \chi_{н} = 0,139 \text{ м}$.

Число Рейнольдса для газов $Re_{2r} = \omega \cdot d_r / \nu_{г2} = 7,927 \times 10^3$.

Число Нуссельта для газов $Nu_{2r} = 0,22 \cdot Re_{2r}^{0,65} \cdot Pr_{г2}^{0,36} = 64,133$

Коэффициент теплоотдачи газов стенке $\alpha_{2r} = Nu_{2r} \cdot \lambda_{г2} / d_{н} = 22,989 \text{ Вт/(м}^2\text{·K)}$. Ко-

эффициент теплопередачи по формуле $k_{гk} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1в}} + \frac{\delta_r}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_{2r}}} = 1,342 \text{ Вт/(м}^2\text{·K)}$. Поверхность

теплообмена $\sum F_{трг} = \frac{Q_{вт} \cdot 1000}{k_{гk} \cdot \Delta t_{cp}} = 40,2 \text{ м}^2$. Длина оси газохода $L_r = 2 \cdot L_{трг} + L_{пнг} = 21 \text{ м}$.

Наружная площадь газохода $F_{гн} = \chi_{н} \cdot L_r = 57,54 \text{ м}^2$.

Поскольку площадь газохода превосходит площадь поверхности теплообмена, то следует считать теплообменник согласованным.

В качестве источника тепла для сушилки может быть использована кирпичная печь с колосниковой решеткой и газоходом (боровом), расположенным в сушильной камере.

Библиографический список

1. Бретшайдер С. Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета. Л. : Химия, 1966. 536 с.
2. Гурский Д. А. Вычисления в MathCAD. М. : Новое знание, 2003. 814 с.
3. Кречетов И. В. Сушка древесины. М. : Лесная промышленность, 1980. 432 с.
4. Поздеев А. Г., Котлов В. Г., Кузнецова Ю. А. Автоматизация расчетов процесса сушки древесины: монография. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2017. 128 с.
5. Хзмалян Д. М., Каган Я. А. Теория горения и топочные устройства. Под ред. Д. М. Хзмаляна. Учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений. М. : Энергия, 1976. 488 с.

УДК 691.175.5/8:699.82

Дмитрий Рудольфович Низин, кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эколого-метеорологического мониторинга, строительных технологий и экспертиз, nizindi@yandex.ru

Татьяна Анатольевна Низина, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции», nizinata@yandex.ru

Владимир Павлович Селяев, академик РААСН, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Строительные конструкции», ntorm80@mail.ru

Илья Петрович Спирин, магистрант института архитектуры и строительства spirinil2000@yandex.ru

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, Россия, г. Саранск

Анализ влияния климатических факторов на изменение физико-механических характеристик полимерных материалов с учетом их влагосодержания

***Аннотация.** Приведены результаты исследования изменения сорбционных и упруго-прочностных характеристик полимерных образцов на основе модифицированной эпоксидной смолы и отвердителей различных видов в условиях натурального климатического старения. Установлено влияние длительности экспонирования на изменение характера зависимости предела прочности при растяжении и относительного удлинения при максимальной нагрузке. Проанализировано влияние сорбированной влаги на изменение упруго-прочностных свойств эпоксидных полимеров, а также сформулированы основные критерии оценки процесса натурального климатического старения полимерных образцов с точки зрения их влагосодержания.*

***Ключевые слова:** эпоксидные полимеры, натурное климатическое старение, влагосодержание, высушенное и влагонасыщенное состояния.*

Dmitry R. Nizin, Ph. D. of Engineering Sciences, Senior Researcher at the Research Laboratory of Ecological and Meteorological Monitoring, Construction Technologies and Expertise, nizindi@yandex.ru

Tatiana A. Nizina, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor of the Department of Building Structures, nizinata@yandex.ru

Vladimir P. Selyaev, Academician of the RAASN, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Head of the Department of Building Structures, ntorm80@mail.ru

Ilya P. Spirin, Master's Degree of the Institute of Architecture and Construction, spirinil2000@yandex.ru

N.P. Ogarev Mordovian State University, Russia, Saransk

Analysis of the climate factors impact on change of the physical and mechanical characteristics of polymer materials in consideration of their moisture*

***Abstract.** The article provides the results of studying changes in the sorption and elastic-strength characteristics of polymer samples based on modified epoxy resin and various types of hardeners exposed to field climatic aging. The effect of the exposure time on the change in the dependence of tensile strength and relative elongation at maximum load was established. We analyzed the effect of sorbed moisture on the change in elastic-strength properties of epoxy polymers, and stated the main criteria for evaluating the process of field climatic aging of polymer samples in terms of their moisture content.*

Keywords: *epoxy polymers, field climatic aging, moisture content, dried and moisture saturated states.*

Климатическое воздействие, представляя собой самую распространенную агрессивную среду, требует достоверных и воспроизводимых методов оценки стойкости строительных материалов, изделий и конструкций, в то числе на полимерной основе [1, 2, 5]. Наряду с температурой и интенсивностью актинометрических воздействий, наиболее значимыми климатическими факторами, оказывающими влияние на свойства полимерных композитов в процессе эксплуатации, являются влажность окружающего воздуха, а также интенсивность атмосферных осадков [3, 4, 6, 8]. Сорбируемая полимерными композитами влага активизирует процессы структурной релаксации, оказывает частично обратимое пластифицирующее воздействие, а также участвует в реакциях гидролиза и доотверждения [7]. В естественных климатических условиях эксплуатации предельное влагонасыщение полимерного материала практически не достигается вследствие нестабильности самого климатического воздействия, присутствия конкурирующих процессов сушки и десорбции влаги, изменения атмосферного давления и т.д. Однако необходимость учета влияния влагосодержания полимеров, в том числе в их предельных равновесно-влажностных состояниях (высушенном и влагонасыщенном), крайне важна для понимания работы полимеров в натурных климатических условиях.

В качестве объектов исследования выступали образцы полимерных материалов на основе эпоксидной смолы Этал-247 и четырех отвердителей производства АО «ЭНПЦ ЭПИТАЛ» – Этал-45М, Этал-1460, Этал-1472, Этал-45TZ2. Эпоксидная смола Этал-247 (ТУ 2257-247-18826195-07) представляет собой низковязкую модифицированную смолу с вязкостью по Брукфилду при 25°C 650÷750 СПз. Массовая доля эпоксидных групп для Этал-247 составляет не менее 21,4÷22,8 %. Этал-1460 и Этал-1472 представляют собой отвердители аминного типа; Этал-45М – смесь ароматических и алифатических ди- или полиаминов, модифицированную салициловой кислотой; Этал-45TZ2 – отвердитель полиамидного типа.

Экспонирование образцов проводилось на испытательных стендах научно-исследовательской лаборатории эколого-метеорологического мониторинга, строительных технологий и экспертиз Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва (г. Саранск, умеренно континентальный климат). Механические испытания образцов эпоксидных полимеров (ЭП) осуществлялась через 2, 5, 10 и 18 месяцев от начала натурального экспонирования. Испытания образцов исследуемых полимеров на растяжение проводились с помощью разрывной машины серии AGS-X с программным обеспечением TRAPEZIUM X при температуре 23±2 °C и относительной влажности воздуха 50±5 %. Параллельно для каждого состава испытывалось не менее 10 образцов (тип 2, ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение»). Прочностные и деформативные характеристики образцов исследуемых полимеров определяли в трех различных влажностных состояниях – равновесно-влажностном (сразу после снятия с испытательной площадки и контроля массы), высушенном и влагонасыщенном. Сушка образцов осуществлялась при температуре 60±2 °C, увлажнение – в эксикаторах над водой при температуре 23±2 °C в соответствии с ГОСТ Р 56762-2015 «Композиты полимерные. Метод определения влагопоглощения и равновесного состояния».

Количественные значения влагосодержания образцов ЭП в равновесно-влажностном и влагонасыщенном состояниях в зависимости от длительности натурального экспонирования в условиях умеренно континентального климата приведены в таблице 1. Установлено, что наибольшее значение предельного влагонасыщения (вне зависимости от длительности экспонирования), достигающее 3,686 – 5,088 % по массе, зафиксировано для образцов на основе полиамидного отвердителя Этал-45TZ₂. При этом для образцов на основе исследуемых отвердителей аминного типа предельное влагонасыщение образцов как в контрольном состоянии, так и после экспонирования не превышает 3 % по массе.

Таблица 1 – Среднее влагосодержание полимерных образцов исследуемых составов в зависимости от длительности натурального экспонирования в равновесно-влажностном и влагонасыщенном состояниях, % по массе

Вид отвердителя	Длительность натурального экспонирования, месяц				
	0	2	5	10	18
равновесно-влажностное состояние / влагонасыщенное состояние					
Этал-45М	<u>0,804</u> 2,414	<u>0,673</u> 2,100	<u>0,691</u> 2,464	<u>1,087</u> 2,124	<u>0,796</u> 2,169
Этал-1460	<u>0,864</u> 3,015	<u>0,983</u> 2,512	<u>0,819</u> 2,710	<u>1,409</u> 2,631	<u>0,939</u> 2,483
Этал-1472	<u>0,689</u> 2,164	<u>0,681</u> 1,970	<u>0,641</u> 2,424	<u>0,903</u> 1,960	<u>0,616</u> 2,147
Этал-45TZ2	<u>1,494</u> 5,088	<u>0,890</u> 3,686	<u>0,884</u> 4,607	<u>1,583</u> 4,201	<u>1,010</u> 4,471

Согласно полученным данным, натурное климатическое старение ЭП в большинстве случаев сопровождается снижением предельного значения влагонасыщения образцов. При этом, максимальное снижение значения предельного влагонасыщения варьируется от 9 % для состава на основе отвердителя Этал-1472 до 27 % для состава на основе Этал-45TZ₂. В качестве возможной причины снижения уровня предельного влагонасыщения образцов исследуемых составов можно рассматривать необратимую потерю массы образцов.

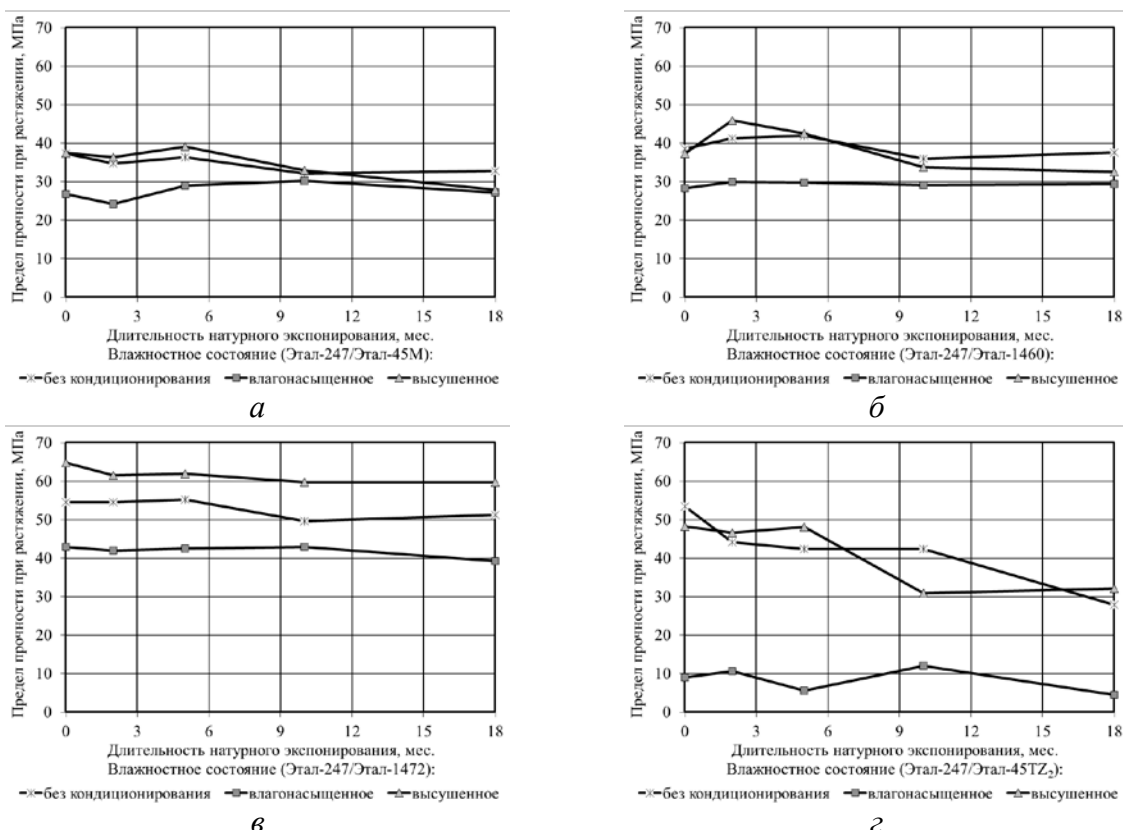


Рисунок 1 – Изменение предела прочности при растяжении серий образцов полимеров на основе эпоксидной смолы Этал-247, отвержденных Этал-45М (а), Этал-1460 (б), Этал-1472 (в) и Этал-45TZ₂ (г), в процессе натурального экспонирования в условиях умеренно континентального климата (с учетом влажностного состояния)

На основе анализа результатов изменения предела прочности образцов исследуемых составов в высушенном, влагонасыщенном и равновесно-влажностном состояниях в зависимости от длительности натурального экспонирования установлено (рисунок 1), что в контрольном состоянии для всех составов наблюдается непрерывное снижение механической

прочности в зависимости от влагосодержания. Однако, для ряда составов для сроков экспонирования свыше 10 месяцев наблюдается изменение характера зависимости предела прочности при растяжении образцов от их влагосодержания. Так, механическая прочность образцов в высушенном и влагонасыщенном состояниях оказывается меньше аналогичного показателя в равновесно-влажностном состоянии для составов на основе отвердителей Этал-45М, Этал-1460 и Этал-45TZ₂. Следует отметить, что временной период с 5 до 10 месяцев экспонирования соответствует месяцам с июня по октябрь включительно, что, в свою очередь, соответствует наибольшему в масштабах календарного года уровню суммарной солнечной радиации и ультрафиолетового излучения диапазонов А и В. Это позволяет предположить, что именно действие актинометрических факторов делает сорбированную влагу основным пластификатором ЭП, эксплуатируемых в условиях действия природных климатических факторов. Дальнейшее экспонирование (в т.ч. «повторное» воздействие высоких уровней актинометрических факторов) не приводит к восстановлению исходной зависимости механической прочности от влагосодержания образцов ЭП. Исключением является состав на основе отвердителя Этал-1472. Для него исходный характер зависимости между пределом прочности при растяжении и влагосодержанием сохраняется на всем протяжении экспонирования.

Для составов на основе отвердителей аминного типа механическая прочность в предельном влагонасыщенном состоянии практически не меняется, либо меняется незначительно, в отличие от образцов на основе полиамидного отвердителя Этал-45TZ₂. В свою очередь, предел прочности при растяжении образцов в высушенном состоянии для сроков экспонирования свыше 10 месяцев снижается вне зависимости от исследуемого состава. Наибольшее снижение зафиксировано для отвердителя Этал-45TZ₂, наименьшее – для отвердителя Этал-1472.

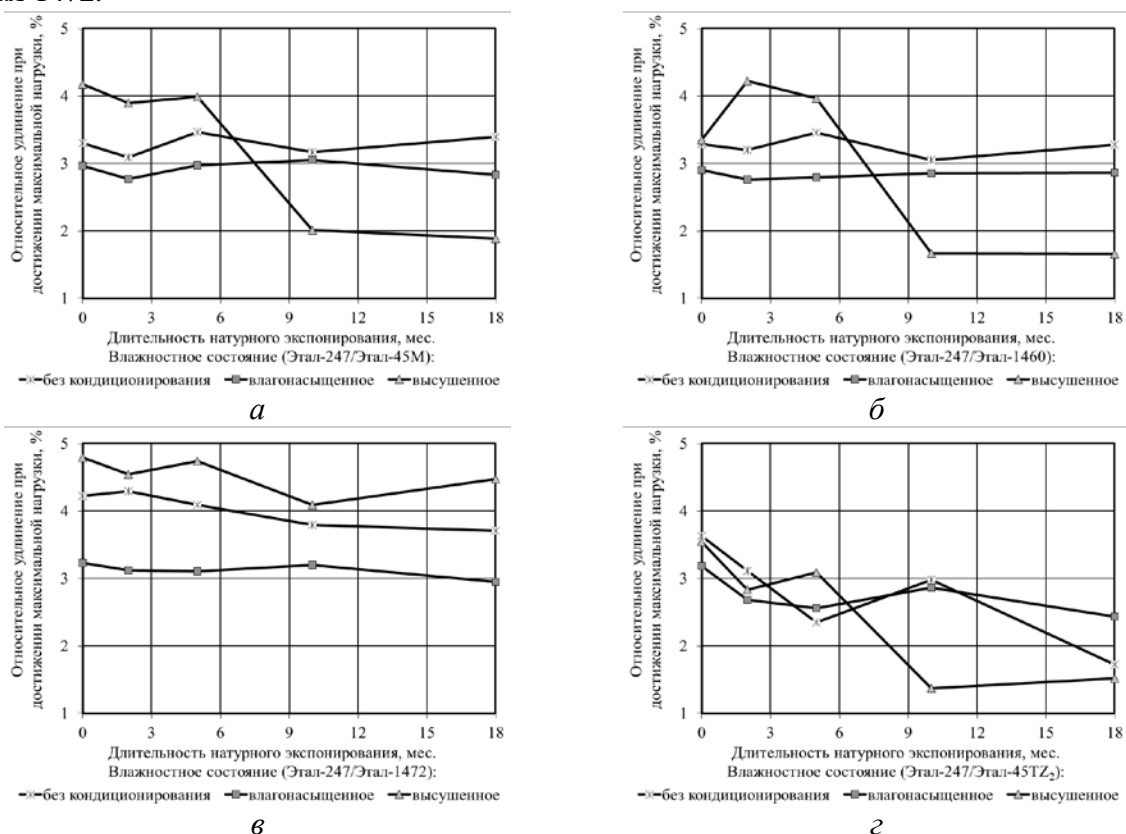


Рисунок 2 – Изменение относительного удлинения при достижении максимальной растягивающей нагрузки серий образцов полимеров на основе эпоксидной смолы Этал-247, отвержденных Этал-45М (а), Этал-1460 (б), Этал-1472 (в) и Этал-45TZ₂ (г), в процессе натурального экспонирования в условиях умеренно континентального климата (с учетом влажностного состояния)

Аналогичная картина наблюдается и для показателя относительного удлинения образцов при максимальной нагрузке. Для экспериментальной точки, соответствующей 10 месяцам натурального экспонирования, для образцов, отверждаемых Этал-45М, Этал-1460 и Этал-45TZ2 наблюдается резкое падение относительного удлинения при максимальной нагрузке в высушенном состоянии (рисунок 2). При этом, в отличие от показателя механической прочности, относительное удлинение в высушенном состоянии оказывается меньше аналогичного показателя во влагонасыщенном состоянии в 1,5–2 раза.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о важности оценки и контроля показателя влагосодержания для эпоксидных полимеров, эксплуатируемых в условиях действия натуральных климатических факторов. При этом значимыми критериями оценки эксплуатационных показателей ЭП в процессе климатического старения становятся необратимая потеря массы, а также изменение характера зависимости механической прочности от влагосодержания.

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-79-00206.*

Библиографический список

1. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения / Е. Н. Каблов, О. В. Старцев, А. С. Кротов, В. Н. Кириллов // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 11. С. 19–27.
2. **Каблов Е. Н., Старцев В. О.** Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2. С. 47–58.
3. Изменение влагосодержания образцов эпоксидных полимеров в условиях натурального климатического старения / Д. Р. Низин, Т. А. Низина, В. П. Селяев, Д. А. Климентьева, Н. С. Канаева // Климат-2021: Современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы. Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции. М., 2021. С. 41–52.
4. Влияние влажностного состояния на кинетику накопления повреждений в структуре образцов эпоксидных полимеров под действием растягивающих напряжений / Т. А. Низина, Д. Р. Низин, Н. С. Канаева, Д. А. Климентьева, А. А. Порватова // Эксперт: теория и практика. 2022. № 1. С. 37–45.
5. **Низина Т. А., Селяев В. П., Низин Д. Р.** Климатическая стойкость эпоксидных полимеров в умеренно континентальном климате: монография. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2020. 188 с.
6. **Старцев В. О., Панин С. В., Старцев О. В.** Сорбция и диффузия влаги в полимерных композитных материалах с ударными повреждениями // Механика композитных материалов. 2015. № 6. С. 1081–1094.
7. **Старцев В. О., Плотников В. И., Антипов Ю. В.** Обратимые эффекты влияния влаги при определении механических свойств ПКМ при климатических воздействиях // Труды ВИАМ. 2018. № 5. С. 110–118.
8. **Maxwell A.S., Broughton W.R., Dean G., Sims G.D.** Review of accelerated ageing methods and lifetime prediction techniques for polymeric materials // NPL Report DEPC MPR 016. 2005.

УДК 614.849

Александр Александрович Лазарев, кандидат технических наук, кандидат педагогических наук, доцент, начальник кафедры «Государственный надзор и экспертиза пожаров», kgn@edufire37.ru

Мария Владиевна Торопова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Естественные науки и техносферная безопасность», mators@mail.ru

Вячеслав Геннадиевич Маличенко, соискатель кафедры «Естественные науки и техносферная безопасность», mvg84@bk.ru

Ивановский государственный политехнический университет, Россия, г. Иваново

Математическая модель теплового воздействия пожара на двухслойный термочувствительный элемент специального стенового изделия

***Аннотация.** Целью исследования является построение температурных полей в системе «стеклянный диск-стальной диск» при создании строительного изделия для обнаружения пожара вне здания. Для этого предлагается использовать решение краевой задачи нестационарного теплопереноса в двухслойной пластине. Оценочный расчет показал повышение безразмерной температуры при увеличении числа Фурье при заданных условиях. Предложенный метод рекомендуется к применению в инженерных методах расчета технических средств противопожарной защиты.*

***Ключевые слова:** математическая модель, пожарная безопасность.*

Alexander A. Lazarev, Ph. D. of Engineering Sciences, Ph. D. of Pedagogic Sciences, Associate Professor, Head of the Department of State Supervision and Expertise of Fires, kgn@edufire37.ru

Maria V. Toropova, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Natural Sciences and Technosphere Safety, mators@mail.ru

Vyacheslav G. Malichenko, Applicant at the Department of Natural Sciences and Technosphere Security, mvg84@bk.ru

Ivanovo State Polytechnic University, Russia, Ivanovo

Mathematical model of the thermal effect of a fire on a two-layer thermosensitive element of a special wall product

***Abstract.** The purpose of the study is to construct temperature fields in the "glass disk-steel disk" system when creating a construction product for detecting a fire outside a building. To do this, it is proposed to use the solution of the boundary value problem of unsteady heat transfer in a two-layer plate. The estimated calculation showed an increase in the dimensionless temperature with an increase in the Fourier number under given conditions. The proposed method is recommended for use in engineering methods of calculation of technical means of fire protection.*

***Keywords:** mathematical model, fire safety.*

Многие технологические процессы производства строительных материалов, создания строительных изделий или конструкций, включают в себя термическую обработку твердых тел [1–8]. Однако аналогичные процессы протекают при пожаре в здании или вне здания. Следовательно, разработка математических моделей указанных процессов, а также разработка инженерных методов расчетов технических средств противопожарной защиты пред-

ставляется целесообразной при постановке и решении краевых задач нестационарного теплового переноса в системе «газ–твёрдое тело».

Примером такой разработки строительного изделия для обнаружения пожара вне здания служит создание специального бетонного блока [9–11]. В одном из вариантов конструкции данного изделия предлагается для защиты стального диска термочувствительного элемента от негативного воздействия окружающей среды использовать стеклянный диск (рисунок 1).

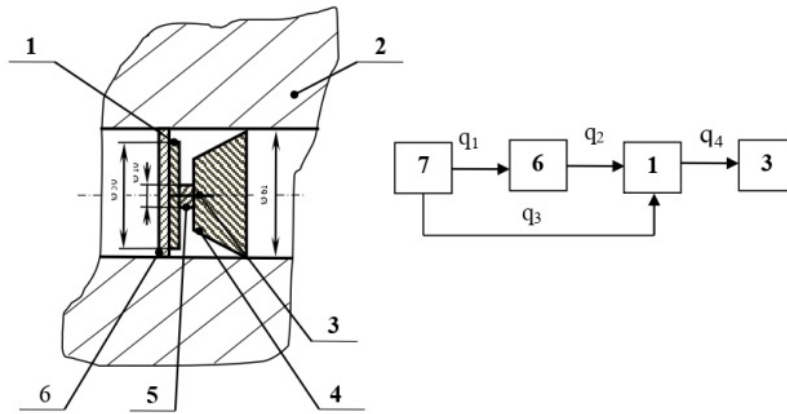


Рисунок 1 – Эскизный чертеж совмещенного с пожарным извещателем бетонного блока:

1 – стальной диск; 2 – бетонный блок; 3 – термочувствительный стержень пожарного извещателя; 4 – пожарный извещатель; 5 – крепление к пожарному извещателю; 6 – стеклянный диск; 7 – источник излучения [9]

Для рассматриваемого варианта строительного изделия, внутри которого имеет место система двух тел (рисунок 2), стеклянного и стального дисков, общая задача теплопереноса будет представлена следующей системой дифференциальных уравнений с соответствующими краевыми условиями:

$$\frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 t_1(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (\tau > 0; 0 \leq x \leq \delta_1) \quad (1)$$

$$\frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 t_2(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (\tau > 0; \delta_2 \leq x \leq 0) \quad (2)$$

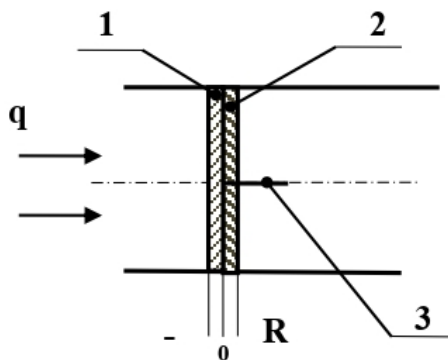


Рисунок 2 – Расчетная схема:

1 – стеклянный диск; 2 – стальной диск; 3 – термочувствительный стержень пожарного извещателя [9]

Начальное условие:

$$t_1(x, 0) = t_{1.0}(x) \quad (3)$$

$$t_2(x, 0) = t_{2.0}(x) \quad (4)$$

Граничные условия:

На левой границе:

$$q_n = -\lambda_2 \frac{\partial t_2(\delta_2, \tau)}{\partial x} \quad (5)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1(0, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial t_2(0, \tau)}{\partial x} \quad (6)$$

$$t_1(0, \tau) = t_2(0, \tau) \quad (7)$$

$$\frac{\partial t_1(\delta_1, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

Далее, следует привести задачу к безразмерному виду, обозначить безразмерные переменные, затем привести решения и значение безразмерных температур при $x = 0$. А затем привести формулу в размерном виде.

$$t_1(x, \tau)|_{x=0} = t_{\text{изл}} - (t_{\text{изл}} - t_0) \cdot T_1(\bar{x}, Fo) \Big|_{x=0} \quad (9)$$

В приведенной постановке краевая задача (1)-(8) идентична краевой задаче нестационарного теплопереноса, решение которой приведено в исследовании Н. К. Анисимовой [8].

Система уравнений (1)-(8) приводится к безразмерному виду:

$$\bar{x} = \frac{x}{\delta_1}; \quad K_a = \frac{a_2}{a_1}; \quad K_\lambda = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}; \quad K_\delta = \frac{\delta_2}{\delta_1} \quad (10)$$

$$T_1(\bar{x}, Fo) = \frac{t_{\text{изл}} - t_1(\bar{x}, \tau)}{t_{\text{изл}} - t_0}; \quad T_2(\bar{x}, Fo) = \frac{t_{\text{изл}} - t_2(\bar{x}, \tau)}{t_{\text{изл}} - t_0} \quad (11)$$

$$Ki = \frac{q_n \delta_1}{\lambda_2 (t_{\text{изл}} - t_0)}; \quad Fo = \frac{a_1 \tau}{\delta_1^2} \quad (12)$$

$$T_1(0, Fo) = \frac{1}{1 + K_a K_\lambda K_\delta} \left\{ 1 - K_\lambda K_\delta - Ki K_\lambda [Fo + 0,5 - \frac{1 + K_a K_\delta (3K_\delta + 3K_\lambda + K_a K_\lambda K_\delta^2)}{6(1 + K_a K_\lambda K_\delta)}] \right\} +$$

$$+ 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2 \cos \mu_n \cos(\mu_n \sqrt{K_a K_\delta}) (1 + K_a K_\lambda K_\delta) - \sin \mu_n \sin(\mu_n \sqrt{K_a K_\delta}) \sqrt{K_a} (K_\lambda + K_\delta)} \times$$

$$\times \{ \mu_n \sin \mu_n \cos(\mu_n \sqrt{K_a K_\delta}) - \frac{K_\lambda}{\sqrt{K_a}} \cos \mu_n \} \exp(-\mu_n^2 Fo) \quad (13)$$

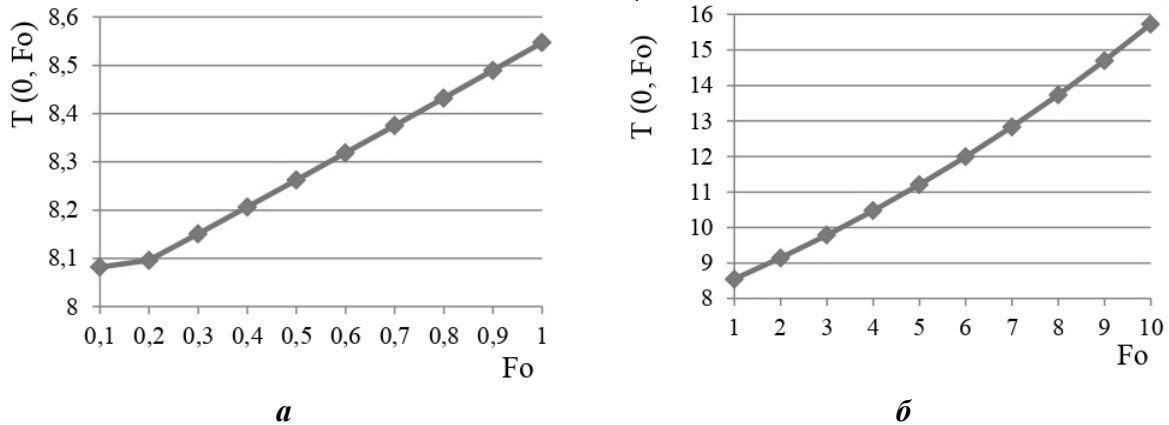


Рисунок 3 – Изменение безразмерной температуры в зависимости от числа Фурье:

a – в диапазоне 0,1...1; *б* – в диапазоне 1...10 [10,11]

Уравнение (13) отражает зависимость безразмерной температуры от числа Фурье в точке отсчета при размещении стального диска непосредственно рядом со стеклянным диском. Результаты расчета представлены на рисунке 3.

Таким образом, при заданных условиях происходит повышение безразмерной температуры при увеличении числа Фурье. Это означает, что формула (13) работает адекватно. Следовательно, она может быть рекомендована к использованию при разработке строитель-

ного изделия для обнаружения пожара вне здания, в котором для защиты стального диска термочувствительного элемента от негативного воздействия окружающей среды предлагается использовать стеклянный диск.

Библиографический список

1. **Лыков А. В., Михайлов Ю. А.** Теория переноса энергии и вещества. Минск : Изд-во Акад. наук БССР, 1959. 332 с.
2. **Лыков А. В.** Теория теплопроводности. М. : Высшая школа, 1967. 600 с.
3. **Рудобашта С. П.** Массоперенос в системе с твердой фазой. М. : Химия, 1980. 248 с.
4. **Рудобашта С. П., Карташов Э. М.** Диффузия в химико-технологических процессах. М. : КолосС, 2013. 478 с.
5. **Карташов Э. М.** Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М. : Высшая школа, 2001. 480 с.
6. **Федосов С. В.** Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии: Монография. Иваново: ИПК «ПресСто», 2010. 363 с.
7. **Федосов С. В., Федосеев В. Н., Воронов В. А.** Численно-аналитический метод сведения задач нестационарной теплопроводности с граничными условиями III рода к задачам с условиями I рода // Строительные материалы. 2022. № 12. С. 59–62.
8. **Анисимова Н. К.** Процессы высокотемпературной отделки бетонов с фазовыми превращениями в декорирующем слое: дис. ... кандидата технических наук : 05.02.13 / Анисимова Наталья Константиновна. Иваново, 2009. 141 с.
9. **Лазарев А. А.** Наружные стеновые изделия для дистанционной диагностики пожарной безопасности малоэтажных зданий: дис. ... кандидата технических наук : 05.23.05, 05.26.03 / Лазарев Александр Александрович. Иваново, 2021. 181 с.
10. Противопожарный контроль соседних зданий при помощи сенсоров «умного дома» / С. В. Федосов, Н. И. Ватин, А. А. Лазарев, М. В. Торопова, В. Г. Маличенко // Современные проблемы гражданской защиты. 2020. № 3(36). С. 125–135.
11. Определение основных параметров нагреваемого сегмента диска термочувствительного элемента специального строительного изделия для обнаружения пожара / С. В. Федосов, А. А. Лазарев, М. В. Торопова, В. Г. Маличенко, Д. Е. Цветков // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 2(43). С. 115–122.

УДК 614.849

Дмитрий Евгеньевич Цветков, инженер филиала Восточно-Сибирская военизированная часть, cvetkov-dmitrii@mail.ru

ООО «Газпром газобезопасность», Россия, г. Красноярск

Андрей Юрьевич Комлев, аспирант, mchs04@mail.ru

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, г. Москва

Сопоставление температурных полей монослойных противопожарных преград

Аннотация. В рамках исследования с целью выбора материалов для создания противопожарной преграды предложен подход на основе теории тепломассопереноса. При этом использовались результаты решения краевой задачи нестационарного теплопереноса в рассматриваемой пластине. Оценочный расчет позволяет сравнить результаты и обосновать свой выбор негорючего материала.

Ключевые слова: математическая модель, пожарная безопасность.

Dmitry E. Tsvetkov, Engineer of the Branch of the East Siberian Paramilitary Unit, cvetkov-dmitrii@mail.ru

Gazprom Gazobezопасnost LLC, Russia, Krasnoyarsk

Andrey Yu. Komlev, Postgraduate, mchs04@mail.ru

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia, Moscow

Comparison of temperature fields of monolayer fire barriers

Abstract. As part of the study, an approach based on the theory of heat and mass transfer is proposed in order to select materials for creating a fire barrier. In this case, the results of solving the boundary value problem of non-stationary heat transfer in the plate under consideration were used. The evaluation calculation allows you to compare the results and justify your choice of non-combustible material.

Keywords: mathematical model, fire safety.

Федеральным законом [1] введена пожарно-техническая классификация зданий, сооружений и пожарных отсеков по степени огнестойкости. Основной целью данной классификации является установление требований пожарной безопасности к системам обеспечения пожарной безопасности зданий, сооружений в зависимости от их функционального назначения и пожарной опасности. В целом здания, сооружения и пожарные отсеки по степени огнестойкости подразделяются на здания, сооружения и пожарные отсеки I, II, III, IV и V степеней огнестойкости. Таблицей № 21 Федерального закона [1] определено соответствие степени огнестойкости и предела огнестойкости строительных конструкций зданий, сооружений и пожарных отсеков.

Наступление пределов огнестойкости несущих и ограждающих строительных конструкций устанавливается по времени достижения одного или последовательно нескольких из следующих признаков предельных состояний:

- потеря несущей способности (R);
- потеря целостности (E);
- потеря теплоизолирующей способности вследствие повышения температуры на обогреваемой поверхности конструкции до предельных значений (I);

• достижения предельной величины плотности теплового потока на нормируемом расстоянии от необогреваемой поверхности конструкции (W) [1].

Наибольшие показатели по времени достижения признаков предельных состояний имеют здания I степени огнестойкости. Несущие стены, колонны и другие несущие элементы данных зданий имеют показатели по потери несущей способности (R) 120 мин. Наименьший показатель по потери несущей способности стен, колонн и других несущих элементов имеют здания IV степени огнестойкости (R) 15 мин. При этом в зданиях V степени огнестойкости данный показатель не нормируется.

Как правило, у зданий, относящихся в I степени огнестойкости несущие стены, колонны и другие несущие элементы выполнены из искусственного или естественного камня, бетона, кирпичной кладки и т.п. В зданиях IV степени огнестойкости аналогичные строительные конструкции выполнены из металла не имеющего дополнительную защиту (огнезащитная краска, обмазка, конструктивная защита) от воздействия опасных факторов пожара (огонь, высокая температура и т.п.). Зданиях V степени огнестойкости выполнены полностью из деревянных конструкций.

В современных зданиях при выборе материалов, из которых возводят несущие элементы зданий, противопожарные перегородки, стены, перекрытия и т.п., как правило, применяется бетон различных марок, металлические конструкции, кирпич, либо комбинацию двух и более различных строительных материалов, перечисленных выше.

В связи с чем предлагается использовать математические модели для проведения расчетов с целью определения материалов проектируемых противопожарных преград на основе теории теплопереноса.

Первичными опасными факторами пожара, оказывающими разрушающие воздействие на строительную конструкцию, являются огонь, высокая температура. Сопоставим температурные поля monослойных противопожарных преград, выполненных из наиболее распространенных строительных материалов металла и бетона.

Рассмотрим металлическую пластину.

Для математических выкладок будем использовать безразмерные функции и величины вида:

$$\bar{x} = \frac{x}{R}; \quad Fo = \frac{a\tau}{R^2}; \quad Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}; \quad (1)$$

Процесс теплопереноса будет определяться краевой задачей теплопроводности, в основе которой лежит дифференциальное уравнение параболического типа нестационарной теплопроводности с соответствующими граничными условиями и начальными условиями, отражающими в общем случае неравномерное распределение температур по толщине соответствующей пластины.

Необходимо провести оценочный расчет значения Био для стали по формуле (1). Для определения коэффициента теплоотдачи необходимо использовать формулу для определения критерия Нуссельта для вертикальной пластины [4, 5]:

$$Nu = 0,55(Ar \cdot Pr)^{0,25}, \quad (2)$$

где Ar, Pr – соответственно критерии Архимеда и Прандтля.

$$Ar = \frac{g l^3 \Delta \rho}{\rho_c \nu^2}, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с², l – характерный размер, м, Δρ – разность плотности среды (ρ_c) и тела, кг/м³, ν – кинематическая вязкость среды, м²/с.

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (4)$$

где ν – кинематическая вязкость среды, м²/с, a – коэффициент температуропроводности, м²/с; для воздуха: $Pr \approx 0,72$.

Решение для аналогичной задачи для неограниченной пластины получено в [2]:

$$T(\bar{x}, Fo) = \frac{t_c - t(\bar{x}, \tau)}{t_c - t_0} = 2Bi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(\mu_n \bar{x}) \exp(-\mu_n^2 Fo)}{\mu_n [\sin \mu_n (1 + Bi) + \mu_n \cos \mu_n]}, \quad (5)$$

где μ_n – переменная, получаемая при помощи характеристического уравнения:

$$ctg \mu_n = \frac{\mu_n}{Bi} \quad (6)$$

Для значения числа Фурье свыше 0,1 определяется число членов ряда на основании условия:

$$\pi^2 n^2 Fo \geq 8 \Rightarrow n \geq \sqrt[0]{\frac{8}{\pi^2 \cdot Fo}} \quad (7)$$

Из условия (8) следует, что для числа Фурье в диапазоне 0,1..7032 с момента начала нагрева число членов ряда для стали $n \geq 3$.

С учетом этого получим выражение:

$$T(\bar{x}, Fo) = 2Bi \left[\frac{\cos(\mu_1 \bar{x}) \exp(-\mu_1^2 Fo)}{\mu_1 [\sin \mu_1 (1 + Bi) + \mu_1 \cos \mu_1]} + \frac{\cos(\mu_2 \bar{x}) \exp(-\mu_2^2 Fo)}{\mu_2 [\sin \mu_2 (1 + Bi) + \mu_2 \cos \mu_2]} + \frac{\cos(\mu_3 \bar{x}) \exp(-\mu_3^2 Fo)}{\mu_3 [\sin \mu_3 (1 + Bi) + \mu_3 \cos \mu_3]} \right] \quad (8)$$

После подстановки числа Био и значений μ_n , полученных из уравнения (6) для первых трех членов ряда, а также проведения расчета по уравнению (8) получим выражение для стальной пластины:

$$T_1(\bar{x}, Fo) = 1,01 \cos(0,077\bar{x}) \exp(-0,006Fo) - 0,001 \cos(3,14\bar{x}) \times \exp(-9,86Fo) + 0,003 \cos(6,28\bar{x}) \exp(-39,43Fo) \quad (9)$$

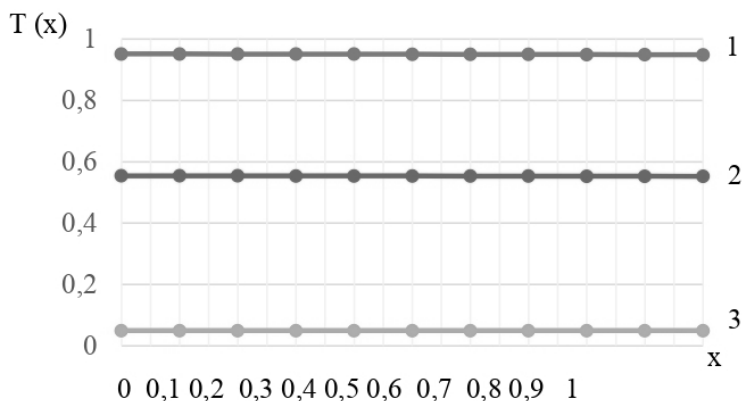


Рисунок 1 – Распределение безразмерных температур по толщине стальной пластины в зависимости от числа Фурье ($Bi = 0,006$)

Уравнение (9) отражает зависимость безразмерной температуры от толщины стальной пластины. Результаты расчета представлены на рисунке 1.

Таким образом, при заданных условиях через 10 мин с начала нагрева температура в разных частях стальной пластины будет практически одинаковой, так как $Bi \rightarrow 0$. Это означает, что формула (9) работает адекватно.

Рассмотрим противопожарную преграду, выполненную из бетона.

Для бетонной пластины преобразуем уравнение (8) аналогично получению уравнения (9):

$$T_2(\bar{x}, Fo) = 1,09 \cos(0,79\bar{x}) \exp(-0,62Fo) - 0,16 \cos(3,14\bar{x}) \times \exp(-9,86Fo) + 0,04 \cos(6,28\bar{x}) \exp(-39,43Fo) \quad (10)$$

Уравнение (11) описывает зависимость безразмерной температуры от толщины бетонной пластины. Результаты расчета по этому уравнению иллюстрируются на рисунке 2.

$$q_2 = c_{1-2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{1-2}, \quad (11)$$

где q_2 – тепловой поток, Вт/м²; T_1, T_2 – абсолютные температуры факела, К; c_{1-2} – приведенный коэффициент излучения; φ_{1-2} – угловой коэффициент излучения.

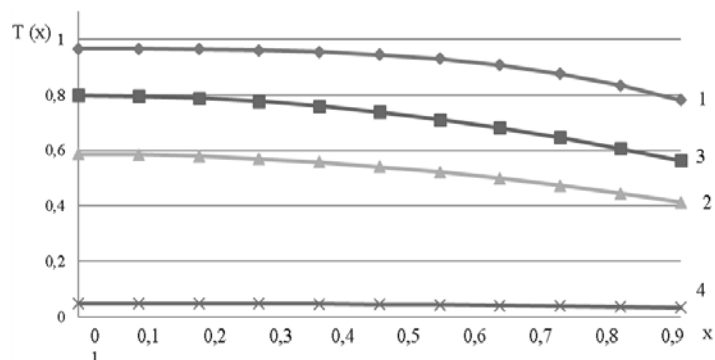


Рисунок 2 – Распределение безразмерных температур по толщине бетонной пластины в зависимости от числа Фурье ($Bi = 0,79$) Fo :
1) 0,1; 2) 0,5; 3) 1; 4) 5

Полученные результаты расчета (рисунки 1, 2) позволяют сделать вывод, что применение стальных пластин для создания противопожарных преград без дополнительной защиты материалами с низкой теплопроводностью является нецелесообразным.

Библиографический список

1. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 N 123-ФЗ.
2. Федосов С. В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии: монография. Иваново : ИПК «ПресСто», 2010. 364 с.
3. Карташов Э. М., Кудинов В. А. Аналитические методы теории теплопроводности и ее приложений. Изд. 4-е, перераб. и суц. доп. М. : ЛЕНАНД. 2018. 1072 с.
4. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие. М. : Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
5. Исаченко В.П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М. : Энергия, 1975. 488 с.

СЕКЦИЯ 4.

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ПРОЦЕССАХ СУШКИ, В ТЕПЛОВЫХ И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

УДК 66.011

Михаил Константинович Захаров, доктор технических наук, профессор кафедры
«Процессы и аппараты химической технологии имени Н. И. Гельперина»,
mkzakharov@gmail.com

Евгений Андреевич Губкин, аспирант кафедры «Процессы и аппараты
химической технологии имени Н. И. Гельперина», ugeakon@yandex.ru

МИРЭА – Российский технологический университет
(Институт тонких химических технологий имени М. В. Ломоносова), Россия, г. Москва

Влияние энергетического уровня исходной смеси на затраты теплоты при ректификации

***Аннотация.** Рассмотрена сущность теории внутреннего энергосбережения, которая учитывает многократную конденсацию пара на тарелках ректификационной колонны. Продемонстрирована количественная оценка внутреннего энергосбережения при ректификации и представлен вывод формулы для расчета внутреннего энергосбережения при различном агрегатном состоянии исходной смеси. Проведено сравнение тепловых затрат на разделение в зависимости от доли пара в исходной смеси на основе теории внутреннего энергосбережения.*

***Ключевые слова:** ректификация, внутреннее энергосбережение, конденсация, испарение.*

Mikhail K. Zakharov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor of the Department
of Processes and Devices of Chemical Technology named after N. I. Gelperin,
mkzakharov@gmail.com

Evgeny A. Gubkin, Postgraduate of the Department of Processes and Apparatuses of Chemical
Technology named after N. I. Gelperin, ugeakon@yandex.ru

MIREA – Russian Technological University (Lomonosov Institute of Fine Chemical
Technologies), Russia, Moscow

Influence of the energy level of the initial mixture on heat expenses during rectification

***Abstract.** The essence of the theory of internal energy saving, which takes into account the multiple condensation of steam on the plates of the distillation column, is considered. A quantitative assessment of internal energy saving during rectification is demonstrated and a formula for calculating internal energy saving is presented for different aggregate states of the initial mixture. The comparison of heat costs for separation depending on the proportion of steam in the initial mixture is carried out on the basis of the theory of internal energy saving.*

***Key words:** distillation, internal energy saving, condensation, vaporization.*

Нефтехимические, нефтеперерабатывающие и химические предприятия являются крупными потребителями энергоресурсов всех видов. Одним из основных и самых распространенных методов разделения жидких смесей является процесс ректификации, который является большим потребителем тепловой энергии. Эта повышенная энергоемкость в

первую очередь связана с большой теплотой парообразования компонентов разделяемой смеси. Затраты теплоты при ректификации бинарных и многокомпонентных смесей превышают теплоту их испарения – при условии получения продуктов высокой степени чистоты и малой относительной летучести компонентов. Для крупнотоннажного производства продуктов основного органического и нефтехимического синтеза, а также при разделении нефти на фракции снижение энергопотребления будет давать значительный экономический эффект.

Одним из способов уменьшения тепловых затрат при проведении процесса ректификации является внутреннее энергосбережение.

Сущность внутреннего энергосбережения (коэффициент использования пара на тарелках) заключается в следующем [1]. На тарелку поступает насыщенный пар, имеющий температуру выше, чем жидкость на тарелке. Поэтому происходит его парциальная конденсация до температуры жидкости на тарелке, которая устанавливается в соответствии с балансовым смешением парового потока с нижележащей тарелки и жидкостного потока с вышерасположенной тарелки. При непрерывной работе колонны находящаяся на тарелке жидкость не изменяет своих характеристик (состава, температуры), а лишь обеспечивает необходимую поверхность контакта между встречающимися на тарелке паровым и жидкостным потоками. Теплота, которая выделяется при конденсации пара, расходуется на испарение поступающей сверху на тарелку жидкости при температуре жидкости на тарелке. Вновь образовавшийся пар, обогащённый низкокипящим компонентом, поступает на следующую тарелку. И вновь частично конденсируется. Так процесс повторяется многократно (по числу тарелок в колонне). Чем большая доля парового потока конденсируется на каждой тарелке, тем более энергосберегающим становится процесс разделения методом ректификации.

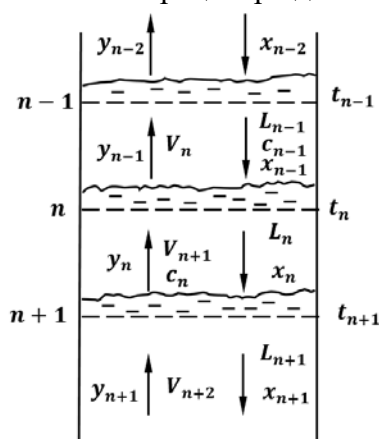


Рисунок 1 – Характеристики потоков на тарелках

Количественная оценка внутреннего энергосбережения в колонне при подаче в колонну исходной смеси при температуре кипения может быть рассчитана по формуле:

$$\mathcal{E}_n = \frac{R}{R+1} \frac{n_y/n_o}{n_y/n_o+1} + \frac{1}{n_y/n_o+1} \quad (1)$$

где \mathcal{E}_n – внутреннее энергосбережение; R – флегмовое число; n_y , n_o – число тарелок в укрепляющей и отгонной частях колонны.

На практике исходная смесь часто поступает в колонну в различном агрегатном состоянии [2] (с разным энергетическим потенциалом): «холодная» (недогретая до температуры кипения) жидкость (доля пара $\psi < 0$), кипящая жидкость ($\psi = 0$), парожидкостная смесь ($0 < \psi < 1$), в виде насыщенного пара ($\psi = 1$), и перегретый пар ($\psi > 1$). В этих случаях внутреннее энергосбережение рассчитывается по формуле, учитывающей разницу паровых потоков [3] в отгонной и укрепляющих секциях колонны:

$$\Xi_n = \frac{R}{R+1} \frac{n_y/n_o}{n_y/n_o + 1} + \left[1 - \frac{(1-E)(x_2 - x_0)}{(R+1)(x_1 - x_0)} \right] \frac{1}{n_y/n_o + 1} \quad (2)$$

где E – величина парового потока для нагрева 1 моля исходной смеси и его испарения, $E = 1 - \psi$ (ψ – доля пара); x_1, x_2, x_0 – концентрация НКК в исходной смеси, потоке дистиллята и кубовой жидкости, кмоль НКК/кмоль смеси.

На первый взгляд может показаться, что подача «холодной» исходной смеси не выгодна. Ведь затраты теплоты в кипятильнике колонны в этом случае возрастают из-за необходимости нагревать до кипения исходную смесь в самой колонне на тарелке питания за счет парового потока, поступающего из кипятильника колонны. Однако, суммарные затраты теплоты (в кипятильнике и подогревателе исходной смеси) на процесс разделения больше, чем при подаче «холодной» смеси. А если исходная смесь после подогревателя поступает в колонну в парожидкостном состоянии с долей пара ψ , то нагрузка на кипятильник будет меньше на величину $\psi L_1 r$ (смотри рисунок 2). Согласно теории внутреннего энергосбережения, в этом случае на тарелках отгонной секции колонны работает уменьшенный паровой поток ($V - \psi L_1$). Это приводит к снижению внутреннего энергосбережения в отгонной секции колонны и среднего внутреннего энергосбережения по колонне в целом согласно формуле (2). Из-за уменьшения внутреннего энергосбережения увеличиваются суммарные затраты теплоты (в подогревателе-испарителе и кипятильнике).

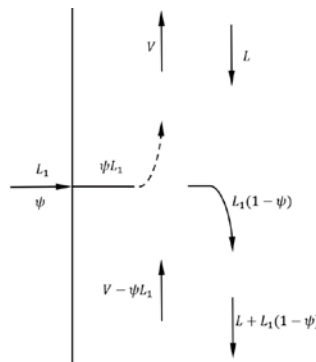


Рисунок 2 – Изменение парового и жидкостного потоков при подаче в колонну парожидкостной смеси

На рисунке 3 представлены зависимости внутреннего энергосбережения при разделении смеси состава $x_1 = 0,50$ с получением продуктов $x_2 = 0,95, x_0 = 0,05$ от флегмового числа R при: а – при разных значениях E ; б – разных отношениях n_y/n_o .

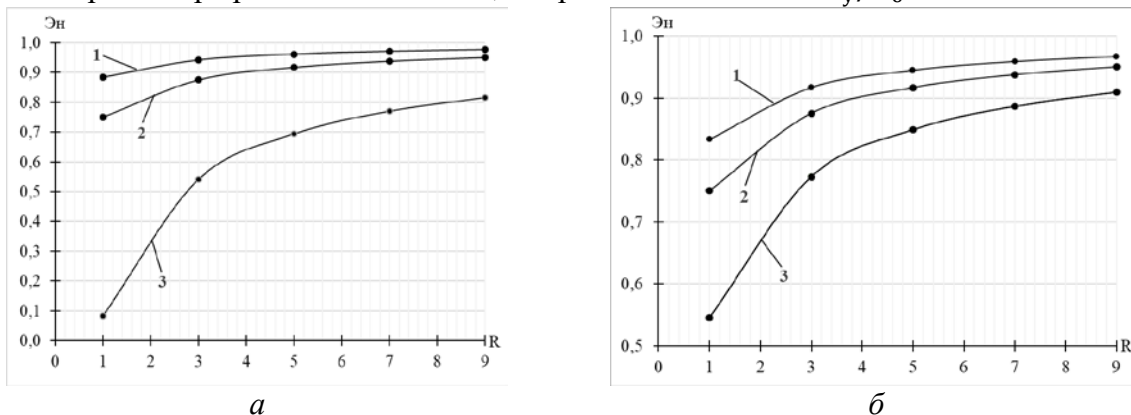


Рисунок 3 – Зависимости Ξ_n от флегмового числа R :

а – при различных E ($n_y/n_o = 1$): кривая 1 – $E = 1,2$ (холодная смесь); 2 – $E = 1$ (кипящая жидкость); 3 – $E = 0$ (чистый пар); б – при различных n_y/n_o ($E = 1$): кривая 1 – $n_y/n_o = 0,5$; 2 – $n_y/n_o = 1$; 3 – $n_y/n_o = 10$

Из рисунка 3а видно, что подача холодной исходной смеси выгоднее с точки зрения внутреннего энергосбережения. Если в колонну подается «холодная» исходная смесь, то в отгонной секции требуется больший паровой поток. За счет большого потока жидкости, который складывается из потоков исходной жидкости и флегмы, лимитирующей стадией теплопередачи от пара к жидкости на тарелках отгонной секции является подвод теплоты паровым потоком. Именно повышенный поток конденсирующегося пара на каждой тарелке увеличивает внутреннее энергосбережение. Тогда и среднее внутреннее энергосбережение в колонне будет больше. Это было доказано в статьях [4, 5].

Из рисунке 3б видно, что при увеличении флегмового числа R увеличивается и среднее внутреннее энергосбережение по всей колонне, но при значениях флегмового числа $R > 5$ существенно замедляется прирост внутреннего энергосбережения, что говорит о том, что не стоит намеренно увеличивать значение флегмового числа. Число тарелок в укрепляющей и отгонной секциях колонны также в значительной степени влияет на величину внутреннего энергосбережения. С увеличением доли тарелок в укрепляющей части уменьшается внутреннее энергосбережение. Это связано с тем, что в отгонной части внутреннее энергосбережение равно единице, так как величина потока жидкости всегда больше величины парового потока. И среднее внутреннее энергосбережение будет всегда выше при $n_y/n_o < 1$ даже при малых значениях флегмового числа.

В статье [6] было показано, что исходную смесь можно подогревать в любой части укрепляющей секции колонны с последующей подачей на тарелку питания. Исходная смесь нагревается паром укрепляющей части колонны до температуры, которая ниже температуры кипения, и исходная смесь поступает недогретой в колонну. Часть пара конденсируется, что дает дополнительный поток жидкости в укрепляющей части, что повышает внутреннее энергосбережение в укрепляющей части и среднее внутреннее энергосбережение по колонне.

Проведенный анализ внутреннего энергосбережения и затрат теплоты при ректификации дает полный ответ на вопрос о целесообразности предварительного нагрева и полного или частичного испарения исходной смеси перед подачей в колонну. Так как в предварительном теплообменнике (подогревателе, испарителе) отсутствует какое-либо энергосбережение, то наименьшие затраты теплоты при ректификации будут при подаче в колонну исходной смеси с малым энергетическим потенциалом.

Библиографический список

1. **Захаров М. К.** Энергосберегающая ректификация: учебное пособие. СПб. : Лань. 2022. С. 252.
2. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов, В. В. Захаренко, Т. В. Зиновкина, А. Л. Таран, А. Е. Костанян. Учебник в двух томах; под ред. В. Г. Айнштейна. 9 издание. СПб. : Лань. 2022. С. 1792.
3. **Wakabayashi T., Ferrari A., Hasebe S.** Design and commercial operation of a discretely heat-integrated distillation column // Chem. Eng. Res. Des. 2019. Vol. 147. pp. 214–221.
4. **Захаров М. К., Аббаси М.** Влияние агрегатного состояния исходной бинарной смеси на затраты тепловой энергии при ректификации // Вестник МИТХТ. 2014. Т. 9, № 1. С. 38–42.
5. **Захаров М. К., Старостина Ю. А., Назаров Д. Г.** О целесообразности питания ректификационной колонны исходной смесью в виде пара // Вестник МИТХТ. 2011. Т. 6, № 6. С. 23–29.
6. **Zakharov M. K., Boichuk A. A.** Influence of internal energy saving on selection of optimum scheme of heating for mixture separation in fractionating column // Chemical and Petroleum Engineering. 2019. Vol. 54. pp. 901–909.

УДК 664.834

Ирина Викторовна Иванова, кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Инженерные дисциплины», aniri1901@yandex.ru

Юрий Викторович Родионов, доктор технических наук, профессор кафедры
«Механика и инженерная графика», rodionow.u.w@rambler.ru

Ольга Александровна Зорина, аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»,
zorin619@bk.ru

Мичуринский государственный аграрный университет (Тамбовский филиал),
Россия, г. Тамбов

Энерго- и ресурсосбережение двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки

***Аннотация.** Обоснован процесс ведения сушки сырья растительного происхождения комбинированным способом. Предложена модифицированная двухступенчатая сушилка с внедрением конвективной во взвешенном слое первой ступенью и использованием дополнительного кондуктивного нагрева лотков на вакуумной ступени посредством использования тепловых аккумуляторов из наномодифицированных материалов. Представлена сравнительная характеристика рассматриваемых процессов сушки. Определена дальнейшая модернизация двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки.*

***Ключевые слова:** двухступенчатая конвективно-вакуум-импульсная сушка, тепловые аккумуляторы.*

Irina V. Ivanova, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Engineering Disciplines, aniri1901@yandex.ru

Yuri V. Rodionov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, rodionow.u.w@rambler.ru

Olga A. Zorina, Postgraduate of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, zorin619@bk.ru

Institution Michurinsky State Agrarian University (Tambov Branch), Russia, Tambov

Energy and resource saving of two-stage convective vacuum pulse drying

***Abstract.** The process of drying raw materials of plant origin by combined methods is substantiated. A modified two-stage dryer with the introduction of convective in the suspended layer of the first stage and the use of additional conductive heating of trays at the vacuum stage through the use of thermal accumulators made of nanomodified materials is proposed. A comparative characteristic of the drying processes under consideration is presented. Further modernization of two-stage convective vacuum pulse drying is determined.*

***Keywords:** two-stage convective-vacuum-pulse drying, thermal accumulators.*

Сырье растительного происхождения всегда считалось привлекательным с точки зрения своей биологической ценности. Поэтому его переработка должна быть особенно бережной, чтобы сохранить первозданный состав в сухофруктах, снеках, чипсах, растительных порошках и сырье для производства косметики и лекарств. В настоящее время большое значение при переработке растительного сырья отводится скорости технологического процесса, который сопровождается, помимо механического воздействия, использованием химических

реагентов и повышенных температур. Эти условия естественным образом оказывают прямое отрицательное воздействие на содержание биологически активных веществ и не являются перспективными, так как основной задачей при переработке растительных материалов является сохранение пищевой ценности. Такое условие выполнимо при соблюдении некоторых правил сушки:

- переработка при низкой температуре;
- снижение времени проведения основного энергозависимого технологического процесса;
- не использование химических веществ;
- использование комбинированных процессов;
- обращение к замкнутому циклу ведения процесса переработки.

К технологии, которая объединяет все благоприятные условия при переработке растительного сырья и, одновременно, сохраняет пищевую ценность можно отнести двухступенчатую конвективную вакуум-импульсную сушку (ДКВИС). Применяемую в настоящее время двухступенчатую сушку, осуществляют с затратами времени на перегрузку сырья, что не только повышает стоимость процесса, но и снижает содержание биологически активных веществ (БАВ) ввиду периодического нагревания, остывания и взаимодействия с окружающей средой. Поэтому модернизация данного процесса путем объединения конвективной сушилки и вакуумного шкафа в одно целое с кондуктивным нагревом лотков и применением тепловых аккумуляторов для экономии значительного количества энергии является своевременным. Единственным недостатком такой сушилки будет ограничение по производительности в единицу времени. Поэтому одной из основных целей работы является исследование интенсивности сушки и уменьшение массогабаритов ДКВИС за счет объединения первой ступени конвективной сушилки во взвешенном слое и ряда других конструктивных и режимных решений. Что позволит не только сохранить энергию, но и сберечь ресурсы, за счет сохранения испаряемой влаги из материала.

«Первую ступень выполняли в виде сушилки с активным взвешенным слоем» [4, с.76]. Вторую посредством конвективной вакуум-импульсной сушилки или комбинированной, сочетающей в себе кондуктивный нагрев лотков и, соответственно, высушиваемого сырья и конвективный вакуум-импульсный нагрев материала [1, с.27]. «Конвективная сушилка во взвешенном слое первой ступени позволяет интенсифицировать процесс обезвоживания для растительных материалов, нарезка которых представляет собой неправильную форму» [3, с.372].

Активные условия взаимодействия воздушного теплоносителя с твердыми частицами растительного материала, подвергающегося удалению влаги, существенно интенсифицируют процесс сушки в развитой стадии кипящего слоя по сравнению с сушкой в неподвижном слое, ввиду возможности увеличения скорости теплоносителя при прохождении через слой материала, что, соответственно, влияет на скорость удаления поверхностной влаги высушиваемого материала.

«Вторую ступень проводили посредством конвективно-вакуумного шкафа» [4, с.78]. Объединив сушилки в единую систему, получили установку двухступенчатой конвективной во взвешенном слое вакуум-импульсной сушилки растительных материалов (рисунок 1). В качестве дополнительных функций данную сушилку дополнили системой сбора влаги и возможностью экстракции без выгрузки материала.

Установка, изображенная на рисунке 1, работала следующим образом. В вводы цилиндрической камеры 1 подавался воздух и подогревался электронагревателями на основе эластомеров, модифицированных углеродными нанотрубками 15 до температуры 60 °С и работающих в режиме саморегулирования температуры. Растительный материал, подвергаемый обезвоживанию, измельчали до необходимых размеров и массы, подавали через штуцер герметичного питателя 2. Далее, подаваемое сырье захватывалось потоком теплоно-

сителя и попадало в камеру 5, имеющую форму конуса, в которой шло образование взвешенного слоя материала. Одновременно с процессом создания взвешенного слоя посредством нагретого воздуха в тепловом аккумуляторе 7 запасалась энергия, за счет плавления парафина, являющегося теплоаккумулирующим материалом и имеющего температуру плавления 60 °С.

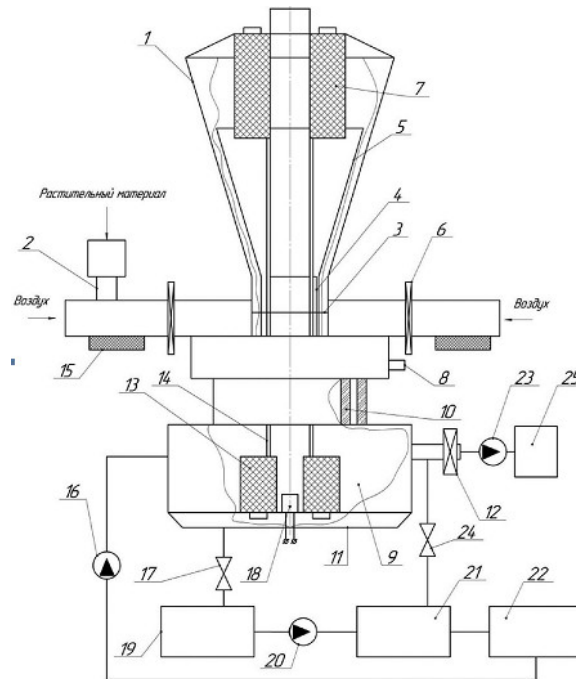


Рисунок 1 – Энергоэффективная конвективно-вакуум-импульсная сушильная установка с тепловыми аккумуляторами и электронагревателями [6]:

1 – цилиндроконическая камера; 2 – питатель; 3 – барабан; 4 – вставка цилиндрического профиля; 5 – коническая камера; 6 – шаровые затворы; 7 – тепловой аккумулятор; 8 – герметичный затвор; 9 – камера второй ступени сушки; 10 – цилиндрическая обечайка; 11 – герметичная крышка; 12 – вакуумная система; 13 – тепловые аккумуляторы; 14 – трубы; 15 – углеродная нанотрубка; 16 – насос; 17 – регулируемый вентиль; 18 – ультразвуковой излучатель; 19 – емкость; 20 – насос; 21 – емкость; 22 – емкость; 23 – вакуумный насос; 24 – труба с клапаном; 25 – емкость

Тепловой аккумулятор 7 соединен с тепловым аккумулятором 13 посредством труб 14. Во время обдува нагретым теплоносителем растительный материал терял поверхностную влагу, что способствовало его перемещению по высоте конуса. Как только частично обезвоженный материал терял способность сопротивляться воздушному потоку, он пересыпался через верх конуса и накапливался в барабане 3, объем которого равен объему загрузки камеры 9. При подсушивании материала в конусе, камера 9 прогревалась посредством тепловых аккумуляторов за счет поступления в них расплавленного парафина из цилиндроконической камеры 1. После заполнения камеры 9, открывался герметичный затвор 8, для того, чтобы подготовленный материал переместился на конвективно-вакуумную стадию сушки посредством соединения аппарата с вакуумной системой 12. По мере остывания парафина в нижнем тепловом аккумуляторе осуществлялось его перезакладка через люк теплового аккумулятора цилиндроконической камеры 1. При переходе частично обезвоженного растительного материала на вторую стадию сушки осуществлялась загрузка камеры 5. «Для выравнивания времени сушки на обеих стадиях, режимы подбирались таким образом, чтобы стадийное время было одинаковым, с целью создания непрерывного режима сушки» [5, с.45]. Причем на первой стадии температура и скорость теплоносителя, соответственно, $T_T = 60...100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 8...15\text{ м/с}$, а на второй $T_T = 55...60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 1...2\text{ м/с}$. «На обеих стадиях кон-

тролировалась температура материала $T_m \leq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, во избежание его перегрева и потери исходной пищевой ценности» [5, с.46]. Частота проведения стадий вакуумирования и конвекции определялась физическими, механическими свойствами и остаточной влажностью высушиваемого материала после каждой стадии технологического процесса.

«Процесс сохранения энергии осуществляется за счет использования тепловых аккумуляторов, которые посредством теплоаккумулирующего материала на основе наномодифицированного композита (80 %)» помещенного в жидкий носитель – синтетическое масло CASTROL OW30 (20 %), позволяет сократить энергетические потери на 32 %, исключая затраты энергии на прогрев аппарата» [2, с.49].

Необходимость объединения обеих ступеней сушки, рассмотренных в данной работе, объясняется ее общей интенсификацией, а, следовательно, энергопотреблением и металлобережением. Введение кондуктивного нагрева лотков в вакуумно-импульсной емкости осуществляется с целью увеличения способов формирования растительного материала, а, следовательно, и расширения ассортимента перерабатываемой продукции. Также необходимо уделить внимание сбору влаги на всех ступенях сушки. При этом сохранение влаги должно осуществляться с улавливанием экстрактивных веществ, характерных для растительных материалов, путем ее сбора.

Библиографический список

1. **Иванова И. В., Родионов Ю. В.** Двухступенчатая комбинированная сушка сельскохозяйственных продуктов // Наука и образование. Научный рецензируемый электронный журнал. 2021. Т.4, № 4. С. 25–29.
2. Инновационные конструкции и технологии сушки плодоовощной продукции / Э. С. Иванова [и др.] // Наука в центральной России. 2021. № 1(49). С. 43–53.
3. Инновационные технологии сушки растительного сырья / Ю. Г. Скрипников [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. 2012. № 3(41). С. 371–376.
4. **Попова И. В.** Совершенствование технологии и средств сушки овощного сырья: дис. ... кандидата технических наук : 05.20.01 / Попова И. В. 2009. 161 с.
5. Применение наномодифицированных теплоаккумулирующих материалов в системах сушки растительного сырья / Ю. В. Родионов [и др.] // Наука в центральной России. 2020. № 1(43). С. 43–50.
6. Пат. 2716056 Российская Федерация. Энергоэффективная конвективно-вакуум-импульсная сушильная установка с тепловыми аккумуляторами и электронагревателями / Зорин А. С., Иванова И. В., Никитин Д. В., Родионов Ю. В., Щегольков А. В. № 2019106971 ; заявл. 13.03.2019 ; опубл. 06.06.20 , Бюл. № 7. 3 с.

УДК 631.243.5

Наталья Георгиевна Кожевникова, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, energo-ngk@rgau-msha.ru

Александр Владимирович Драный, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, energo-dranuy@rgau-msha.ru

Николай Александрович Шевкун, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, energo-shevkun@rgau-msha.ru

Владимир Александрович Шевкун, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, vladimirshevkun@yandex.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Россия, г. Москва

Анализ энергоэффективности использования косвенного ффрикулинга в технологиях хранения сельскохозяйственной продукции

***Аннотация.** В статье представлены основные методы и способы длительного хранения сельскохозяйственной продукции, рассмотрены основные виды свободного охлаждения (ффрикулинга), проанализированы их преимущества и недостатки, доказана энергоэффективность косвенного ффрикулинга с промежуточным теплоносителем.*

***Ключевые слова:** хранение с/х продукции, холодильное оборудование, ффрикулинг.*

Natalia G. Kozhevnikova, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Heat Engineering, Hydraulics and Power Supply of Enterprises

Alexander V. Draniy, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Heat Engineering, Hydraulics and Power Supply of Enterprises

Nikolay A. Shevkun, Ph. D. of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Heat Engineering, Hydraulics and Power Supply of Enterprises

Vladimir A. Shevkun, Ph. D. of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Heat Engineering, Hydraulics and Power Supply of Enterprises

Russian Timiryazev State Agrarian University, Russia, Moscow

Analysis of the energy efficiency of the use of indirect freecooling in agricultural products storage technologies

***Abstract.** The article presents the main methods and methods of long-term storage of agricultural products, considers the main types of free cooling (freecooling), analyzes their advantages and disadvantages, proves the energy efficiency of indirect freecooling with an intermediate coolant.*

***Keywords:** storage of agricultural products, refrigeration equipment, freecooling.*

Введение

Развитие сельскохозяйственного производства влечет за собой совершенствование способов переработки и хранения полученной продукции, предполагающее создание современных стационарных хранилищ большой емкости, оснащение их современным холодильным оборудованием, системами активного вентилирования, средствами механизации погрузочно-разгрузочных работ.

В процессе хранения сельскохозяйственной продукции выделяют несколько характерных режимов, отвечающих тем или иным требованиям. Наиболее характерные из них – это подсушивание, предполагающее максимально возможное понижение влажности за счет усиленного воздухообмена непосредственно после загрузки продукции в хранилище с поля; дозревание, обеспечиваемое поддержанием влажности на уровне 70-95% (в зависимости от вида продукции) и стабилизацией температуры на отметке 8-10⁰С; длительное хранение, которое обеспечивается поддержанием заданных параметров температуры и влажности, различных для того или иного вида сельскохозяйственной продукции; лечение, характеризующееся поддержанием температуры и влажности на уровне, способствующем регенерации овощей или корнеплодов, поврежденных при транспортировке; переработка – температура стабилизируется на уровне 12...15 °С и др.

В большинстве случаев время проведения перечисленных режимов приходится на холодный период года, что позволяет использовать для охлаждения наружный холодный воздух. Такую возможность открывает технология свободного охлаждения – фрикулинга (от англ. «Freecooling» – «свободное охлаждение»), которая нашла в последнее время широкое применение в системах охлаждения центров обработки данных [1].

Технологической особенностью такой системы является то, что за счет двух изолированных контуров мы можем создавать условия, отличные от атмосферных, например, среду с пониженным содержанием кислорода, что необходимо для качественного хранения большинства сельскохозяйственной продукции.

Кроме того, при использовании таких технологий на предприятиях, расположенных в умеренном климате, возможно (по некоторым данным) снижение энергопотребления в зимний период до 80 %, а в периоды межсезонья – до 50 %.

Требования к хранению сельскохозяйственной продукции

Различные виды сельскохозяйственной продукции на том или ином этапе хранения требуют соблюдения определенных условий [2]. Графики взаимозависимостей основных параметров хранения представлены на рисунке 1.

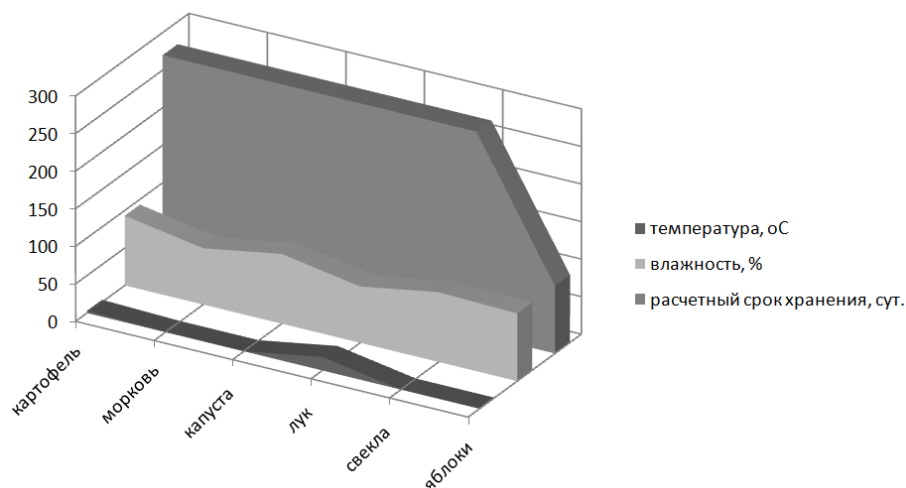


Рисунок 1 – Зависимости температуры, влажности и сроков хранения для различных видов сельскохозяйственной продукции

Помимо соблюдения режимов температуры и влажности важным нормируемым параметром считается также естественная, принудительная или активная вентиляция хранилищ, непосредственно влияющая на концентрацию газов (углекислого, аммиака, сероводорода) и пыли. В небольших хранилищах наибольшее распространение находит естественная вентиляция, обеспечиваемая разностью плотностей нагретого в хранилище и холодного наружного воздуха. Интенсивность воздухообмена регулируется в этом случае высотой вы-

тяжной трубы. При использовании принудительной вентиляции воздух нагнетается в хранилище вентиляторами и удаляется через вытяжные каналы. Наиболее эффективно активное вентилирование, при котором нагнетаемый воздух омывает всю хранящуюся сельскохозяйственную продукцию. В этом случае играет немаловажную роль характер распределения основных параметров воздушного потока [3]. Эффективность вентиляционной системы, кратность и интенсивность воздухообмена в хранилищах существенно повышается при переходе от навалного типа хранения к тарному.

Виды фрикулинга

Принцип действия двух основных видов фрикулинга (прямой и косвенный) отличается друг от друга по следующим конструктивным особенностям.

Прямой фрикулинг использует принцип приточно-вытяжной установки. Холодный воздух внешней среды фильтруется и подается в помещение для хранения сельскохозяйственной продукции. Косвенный фрикулинг отличается от прямого использованием специальных теплообменных аппаратов [4]. Основные виды фрикулинга, их преимущества и недостатки приведены на рисунок 2.

Технологической особенностью такой системы является то, что за счет двух изолированных контуров мы можем создавать в хранилищах условия, отличные от атмосферных, например среду с пониженным содержанием кислорода. Поэтому внедрение данных принципов в технологии хранения позволит, кроме существенной экономии энергоресурсов, повысить качество сохраняемой сельскохозяйственной продукции.

Существенные преимущества прямого фрикулинга состоят в том, что используется принцип приточно-вытяжной вентиляции (холодный воздух внешней среды фильтруется и подается в хранилище). Достоинство подобного метода – простота конструкции, а значит надежность и низкая стоимость. Конструкция, состоящая из воздуховодов, заслонок с электроприводом, клапанов, фильтров и вентиляторов, легко монтируется и обладает гораздо более низким по сравнению с традиционными кондиционерами, энергопотреблением.

Однако использование представленной схемы предполагает и ряд существенных недостатков, основные из которых представлены на рисунке 2.

Косвенный фрикулинг отличается от прямого фрикулинга тем, что холодный воздух подается не напрямую в помещение, а используются специальные теплообменные аппараты. Существует несколько различных схем косвенного фрикулинга.

К одним из самых распространенных схем косвенного фрикулинга можно отнести чиллер с функцией фрикулинга, имеющий весьма компактные размеры, автоматизированный и позволяющий в большинстве случаев практически полностью отказаться от использования компрессора. К сожалению, все узлы такой установки монтируются еще на этапе строительства объекта и не могут быть дополнены после запуска системы охлаждения и имеют достаточно высокую стоимость. Наличие в конструкции промежуточного теплообменника несколько снижает КПД такой установки, а на надежность системы существенное влияние оказывает тот факт, что выход из строя какого-либо узла влечет за собой остановку всей системы.

Использование воздушного рекуператора, имеющего довольно высокий КПД, но требует значительных капитальных вложений, а его установка – прокладки через наружные ограждающие конструкции приточно-вытяжных воздуховодов большого поперечного сечения.

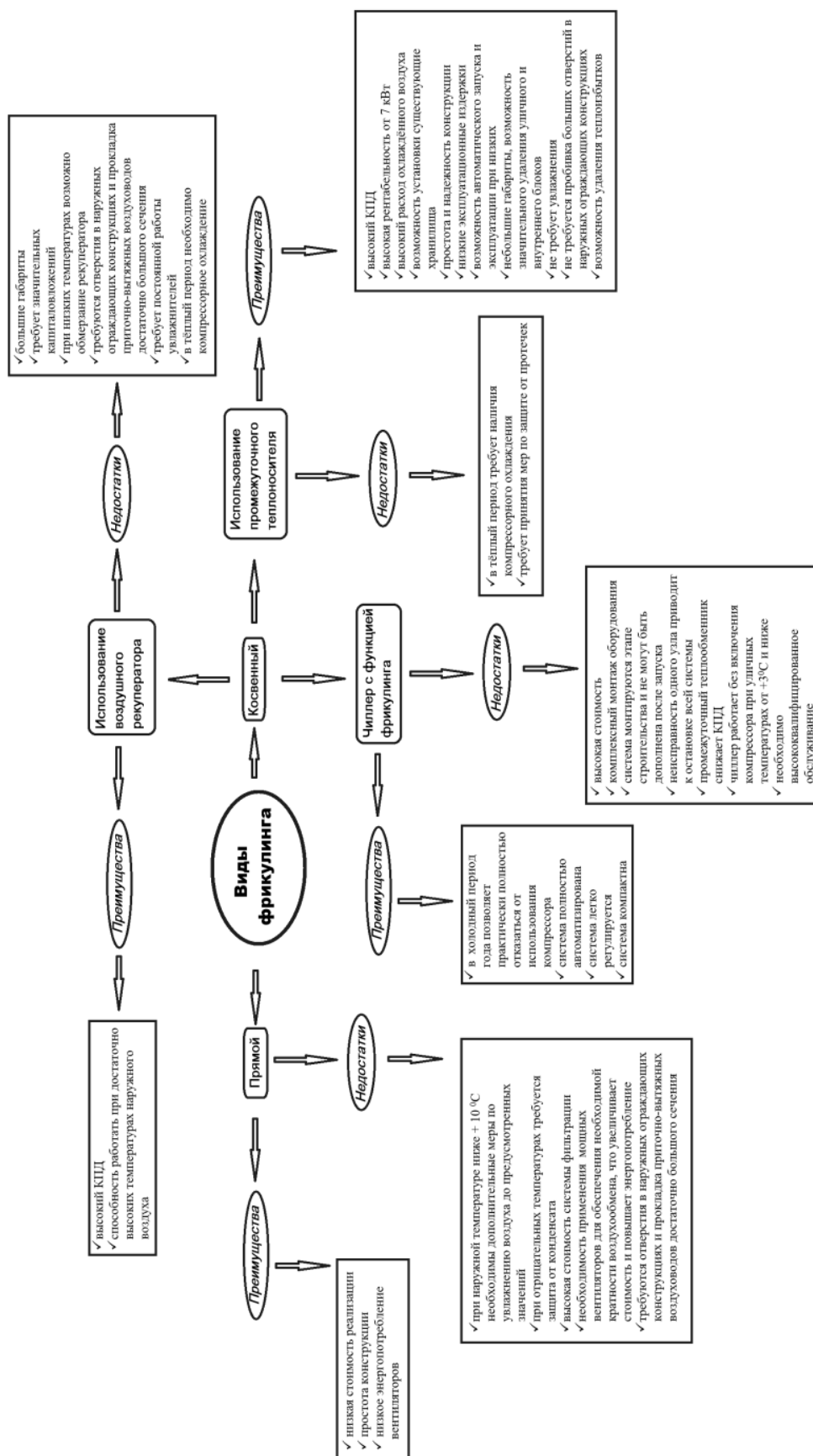


Рисунок 2 – Виды фриклинга, их преимущества и недостатки

Система косвенного фрикулинга с промежуточным теплоносителем, в качестве которого может быть использованы вода, растворы этиленгликоля, пропиленгликоля и т.д., также имеет высокий КПД, рентабельна начиная с 7 кВт по холоду и выше, кроме того ее можно устанавливать в уже существующие хранилища без пробивки отверстий большого поперечного сечения в наружных ограждающих конструкциях для прокладки трубопроводов хладоносителя. Такая система имеет простую, а значит надежную конструкцию (в минимальном исполнении состоит из двух теплообменников с вентиляторами (один на улице, второй в помещении овощехранилища), насосной установки и шкафа управления) и небольшие габариты, но, тем не менее, хорошо продувает помещение хранилища, поскольку высокий расход охлажденного воздуха достигает застойных зон. Давление газоздушных смесей становится в данном случае одним из основных значений, определяющих эффективность работы системы [5]. Оптимально подобранные и заданные системе режимы работы исключают образование конденсата на теплообменниках и пересушивание воздуха, что позволяет снизить энергозатраты пароувлажнителей.

Выводы

Таким образом, анализ преимуществ и недостатков существующих систем охлаждения доказывает, что применение системы косвенного фрикулинга с промежуточным теплоносителем для обеспечения качественного хранения сельскохозяйственной продукции обеспечивает существенное снижение энергозатрат (по данным [6], потребление электроэнергии вентиляторами при подаче наружного воздуха и насосом составляет от 3,5 кВт при -15°C и ниже до 22 кВт при $+22^{\circ}\text{C}$ на 100 кВт холода. Такая система может служить дополнением любой существующей системы мощностью от 7 до 120 кВт по холоду либо сама может быть дополнена системой прямого фрикулинга. Применение подобных систем в отрасли хранения и переработки сельскохозяйственной продукции имеет, по нашему мнению, большие перспективы.

Библиографический список

1. Сокращение энергопотребления систем кондиционирования <https://www.jetinfo.ru/sokrashhenie-energopotrebleniya-sistem-kondiczionirovaniya/>.
2. СанПин 2.3.3.1324-03 Гигиенические требования к срокам годности и условиям хранения пищевых продуктов. <https://base.garant.ru/4179307/>.
3. Анализ характера распределения основных параметров воздушного потока в воздуховодах / Н. Г. Кожевникова, Н. А. Шевкун, А. В. Драный, А. А. Цымбал, Е. И. Трубилин, В. И. Коновалов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 161. С. 282–289.
4. Горяев А. Б., Коротке Ю. В. Оценка масштабов и перспектив использования холода окружающей среды для экономии энергии // Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 58–70.
5. Анализ характера распределения давления в воздушном потоке по длине воздуховода / Н. Г. Кожевникова, Н. А. Шевкун, А. В. Драный, А. А. Цымбал // Сборник научных трудов Седьмой Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика А. В. Лыкова. М., 2020. С. 282–286.
6. Сайт ООО «ВК-Сервис» <https://free-cooling.ru>.

УДК 631.861

Орозмамат Мамасалиевич Осмонов, доктор технических наук, доцент кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, oosmonov@rgau-msha.ru
Наталья Георгиевна Кожеевникова, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, energo-ngk@rgau-msha.ru
 Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Россия, г. Москва
Аэлина Александровна Захарова, аспирант, aelael@inbox.ru
 Северо-Восточный Федеральный университет имени М. К. Аммосова, Россия, г. Якутск

Технология получения высушенного эффлоента биогазового реактора в качестве кормовой добавки

Аннотация. В этой работе проведен анализ способов использования эффлоента биогазового реактора в сельскохозяйственном производстве. В процессе анаэробного сбраживания органических отходов только около 3 % биомассы посредством жизнедеятельности метаногенных микроорганизмов преобразовывается в биогаз и остальная биомасса (около 97 %) выходит из биогазового реактора в виде эффлоента. Эффлоент биогазового реактора может быть эффективно использован в растениеводстве в качестве органического удобрения, и в животноводстве как сырье для производства кормов. В год от 1 головы КРС можно получать до 0,3 т кормового концентрата, содержащего 30 г чистого витамина B12. Этим количеством концентрата можно обогатить более 1000 т кормов. На основе исследований по изучению способов получения и использования высушенного эффлоента биогазового реактора нами предлагается технологическая схема подготовки эффлоента в виде кормовой добавки.

Ключевые слова: биогазовая технология, биогаз, эффлоент, органическое удобрение, кормовая добавка.

Orozmamat M. Osmonov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor of the Department of Heat Engineering, Hydraulics and Power Supply of Enterprises, oosmonov@rgau-msha.ru
Natalia G. Kozhevnikova, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Heat Engineering, Hydraulics and Power Supply of Enterprises, energo-ngk@rgau-msha.ru
 Russian State Agrarian University – Moscow State Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev, Russia, Moscow
Aelina A. Zakharova, Postgraduate, aelael@inbox.ru
 Northeastern Federal University named after M. K. Ammosov, Russia, Yakutsk

Technology for obtaining dried effluent of a biogas reactor as a feed additive

Abstract. In this work, the analysis of ways of using the effluent of a biogas reactor in agricultural production is carried out. In the process of anaerobic digestion of organic waste, only about 3 % of the biomass is converted into biogas by the vital activity of methanogenic microorganisms and the rest of the biomass (about 97 %) leaves the biogas reactor as an effluent. The effluent of a biogas reactor can be effectively used in crop production as an organic fertilizer, and in animal husbandry as a raw material for feed production. Up to 0.3 tons of feed concentrate containing 30 g of pure vitamin B12 can be

obtained from 1 head of cattle per year. This amount of concentrate can enrich more than 1000 tons of feed. Based on the research on the methods of obtaining and using the dried effluent of a biogas reactor, we propose a technological scheme for preparing the effluent in the form of a feed additive.

Keywords: *biogas technology, biogas, effluent, organic fertilizer, feed additive.*

В настоящее время для утилизации органических отходов сельскохозяйственного производства разрабатываются множество биогazовых технологий, в которых используется процесс анаэробного метанового сбраживания органического вещества в биогazовом реакторе с получением горючего газобразного топлива (биогaza) и сброженного субстрата (эффлюента) [1–3].

С точки зрения материального баланса в процессе анаэробного сбраживания органических отходов только около 3 % биомассы посредством жизнедеятельности метаногенных микроорганизмов преобразовывается в биогaz и остальная биомасса (около 97 %) выходит из биогazового реактора в виде сброженного субстрата. В связи с этим повышение эффективности биогazовых технологий требует поиск направлений применения сброженного субстрата, который образуется в больших количествах в результате анаэробного сбраживания отходов различных отраслей АПК.

Сброженный в биогazовом реакторе субстрат называется в научно-технической литературе разными терминами: эффлюент, биоудобрение, дигестат, биошлам и т. д. [4–6]. Эффлюент биогazового реактора, который представляет собой органическую биомассу влажностью 88...98 % с содержанием основных удобрительных элементов (азота, фосфора и калия) в легкоусвояемой растениями форме и обычно используется в качестве органического удобрения в растениеводстве.

При этом эффлюент биогazового реактора может быть эффективно использован кроме растениеводства, и в животноводстве как сырье для производства кормов. Возможно также использование эффлюента в энергетических целях [7], например, когда остаток после анаэробного сбраживания используется в процессе пиролиза с целью получения фенола.

Известно, что повышение продуктивности животных во многом определяется питательной ценностью используемых кормов. Для оценки целесообразности использования эффлюента биогazового реактора в качестве кормовой добавки в рационе животных в работе [8] исследован химический состав получаемого при анаэробной переработке отходов различных сельскохозяйственных животных и высушенного в термошкафе при температуре 75 °C эффлюента и дана их санитарно-гигиеническая оценка.

Результаты предварительных исследований показывают, что все рассматриваемые виды эффлюента содержат основные питательные вещества, сырой протеин, жизненно необходимые микроэлементы (железо, марганец, медь, цинк и др.) и витамины С, Е, В12. Результаты санитарно-микробиологических исследований подтвердили отсутствие токсичных элементов (свинца, ртути, мышьяка, афлатоксинов) и экологическую безопасность использования эффлюента в качестве добавки к кормам.

Учитывая высокую влажность эффлюента, для дальнейшего использования в комплексной биогazовой технологии его разделяют на жидкую и твердую фракции. Жидкая фракция может быть возвращена в биогazовый реактор и использована в качестве оборотной воды с целью увеличения влажности исходной биомассы отходов животноводства. Кроме того, жидкая фракция может быть использована в качестве удобрения для орошения полей в растениеводстве. В свою очередь, твердую фракцию можно непосредственно вносить в почву, компостировать или использовать для производства гранулированных удобрений или добавок к кормам для животных.

Разделение эффлюента на фракции выполняется механическим или гравитационным способами. Для механического разделения на фракции используются дуговые сита, сгущи-

тели, процеживатели, центрифуги и шнековые пресс-сепараторы. Гравитационный способ разделения эффлюента на фракции осуществляется горизонтальных или вертикальных отстойниках.

При применении сепараторов достигается влажность твердой фракции до 72 %, но даже в таком случае для использования твердой фракции эффлюента в качестве добавок к кормам необходимо применение процесса сушки.

В год от 1 головы КРС можно получать до 0,3 т кормового концентрата, содержащего 30 г чистого витамина В12. Этим количеством концентрата можно обогатить более 1000 т кормов. На основе исследований по изучению способов получения и использования высушенного эффлюента биогазового реактора нами предлагается технологическая схема подготовки эффлюента в виде кормовой добавки (рисунок 1).



Рисунок 1 – Технологическая схема приготовления кормовой добавки из эффлюента биогазового реактора

Заключение

1. В процессе анаэробного сбраживания органических отходов только около 3 % биомассы посредством жизнедеятельности метаногенных микроорганизмов преобразовывается в биогаз и остальная биомасса (около 97 %) выходит из биогазового реактора в виде эффлюента.

2. Эффлюент биогазового реактора может быть эффективно использован в растениеводстве в качестве органического удобрения, и в животноводстве как сырье для производства кормов.

3. В год от 1 головы КРС можно получать до 0,3 т кормового концентрата, содержащего 30 г чистого витамина В12. Этим количеством концентрата можно обогатить более 1000 т кормов.

4. На основе исследований по изучению способов получения и использования высушенного эффлюента биогазового реактора нами предлагается технологическая схема подготовки эффлюента в виде кормовой добавки.

Библиографический список

1. Фальчевская Ю. А., Осмонов О. М. Биогазовая технология как автономный источник энергии для создания микроклимата животноводческих помещений // Дальневосточный аграрный вестник. 2022. Т. 16. № 4. С. 131–137.

2. Таханов М. П., Осмонов О. М. Установка по метановому сбраживанию // В сб.: Актуальные вопросы инженерно-технического и технологического обеспечения АПК. Ма-

териалы X Национальной научно-практической конференции с международным участием, посвящённой 90-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, профессора Терских Ивана Петровича. Редколлегия: Н. Н. Дмитриев [и др.]. Молодёжный, 2022. С. 202–205.

3. Повышение эффективности работы метантенка гидродинамическим возмущением сбрасываемого потока / М. П. Таханов, О. М. Осмонов, И. А. Савватеева, К. К. Горохов // Дальневосточный аграрный вестник. 2023. Т. 17. № 1. С. 120–127.

4. **Balasubramanian P. R.** Biogas plant effluent as an organic fertilizer in monosex, monoculture of fish (*Oreochromis mossambicus*) // Bioresource technology. 1996. Vol. 55 (2). pp. 119–124.

5. **Macadi M.** Digestate: A New Nutrient Source – Review // Biogas; ed. By S. Kumar. Croatia: InTech, 2012. pp. 295–310.

6. **Tiwari V. N., Tiwari K. N., Upadhyay R. M.** / Effect of crop residues and biogas slurry incorporation in wheat on yield and soil fertility // J. Indian Soc. Soil Sci. 2000. Vol. 48, pp. 515–520.

7. Kinetic Analysis of Digestate Slow Pyrolysis with the Application of the MasterPlots Method and Independent Parallel Reactions Scheme / P. Bartocci, R. Tschentscher, R. E. Stensrød, M. Barbanera, F. Fantozzi // Molecules. 2019. V. 24(9). pp. 1657.

8. Перспективы применения продуктов биогазовой технологии в агропромышленном секторе РС (Я) / Е. Н. Кобякова, С. А. Петрова, В. П. Друзьянова, Н. В. Петров // Механизация и электрификация. 2014. № 2 (35). С. 67–72.

УДК 628.54

Надежда Вячеславовна Алексеева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
alexejewa.nadja@gmail.com

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

Энергосбережение в массообменных процессах с замкнутого цикла

Аннотация. Показана актуальность энергосбережения при проектировании производственных процессов замкнутого цикла. На примере мембранных процессов очистки сточных вод рассмотрены возможности снижения энергопотребления.

Ключевые слова: замкнутый цикл, энергосбережение, массоперенос, процесс.

Nadezda V. Alekseeva, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Technological Processes, Apparatuses and Technosphere Safety,
alexejewa.nadja@gmail.com

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

Energy saving in mass transfer processes with a closed loop

Abstract. The relevance of energy saving in the design of recycle production processes is shown. Opportunities to reduce energy consumption are considered on the example of membrane processes for wastewater treatment.

Keywords: recycle, energy saving, mass transfer, process.

Безотходные технологии или технологии замкнутого цикла являются основной целью современных разработчиков при проектировании новых и реконструкции существующих производств. При невозможности организации замкнутого цикла в рамках одного производства создаются производственные кластеры, в которых отходы одного технологического процесса являются сырьем для другого [1]. Актуальные потребности современных предприятий со временем становятся шире, и возникает необходимость одновременного уменьшения количества отходов и снижения энергопотребления производства в целом.

Наиболее распространенными в химической и нефтехимической промышленности являются массообменные процессы, проведение которых связано как с необходимостью рекуперации тепла отходящих потоков, так и с минимизацией энергозатрат на проведение процесса [2, 3].

Рассмотрим возможности энергосбережения путем снижения расходов энергии на проведение процесса на примере очистки сточных вод. Наиболее энергосберегающими являются процессы без изменения агрегатного состояния обрабатываемой среды и с минимальным количеством дополнительных материалов и реагентов. Удовлетворяющие всем требованиям и широко распространенными являются мембранные процессы разделения водных растворов [4], к которым относятся баромембранные (от ультрафильтрации до обратного осмоса) и электромембранные (электродиализ) процессы [5, 6].

Процесс обратного осмоса часто используют для разделения водных растворов и получения чистой воды. При обратноосмотическом разделении исходный раствор подают в установку под давлением, превышающим осмотическое, которое в свою очередь линейно зависит от уровня минерализации раствора. Таким образом, энергозатраты на проведение процесса повышаются с увеличением уровня минерализации раствора.

Электродиализный процесс разделения характеризуется обратной зависимостью: пониженное солесодержание раствора характеризуется повышением омического сопротивления, а, следовательно, повышением энергозатрат на электродиализную обработку [7, 8]. На рисунке 1 представлена зависимость удельных энергозатрат на проведение процесса электродиализного и обратноосмотического разделения водного раствора хлорида натрия с начальной концентрацией 0,256 М и 0,171 М при различных значениях концентрации обессоленного раствора. Процесс разделения проводился на лабораторной электродиализной установке, содержащей электродиализный пакет из 8 пар чередующихся катионообменных и анионообменных мембран с рабочей площадью 24 см², и обратноосмотической установке с проточной ячейкой плоскостного типа, рабочая площадь мембраны – 194 см² [9].

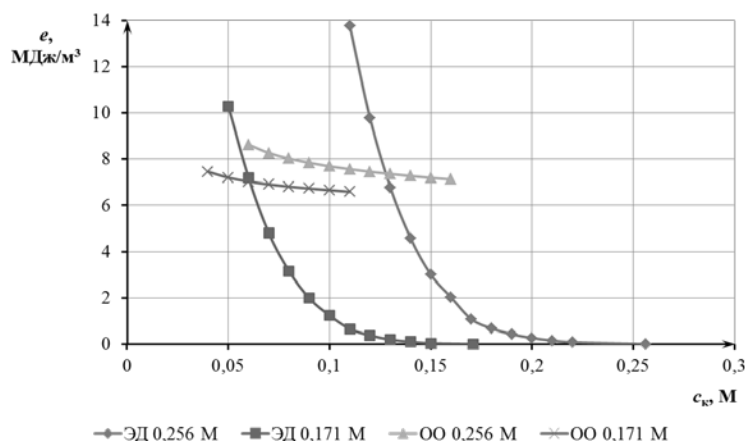


Рисунок 1 – Сравнение энергозатрат электродиализного ЭД и обратноосмотического ОО разделения водного раствора хлорида натрия

Удельные энергозатраты оценивались по величине затраченной энергии на единицу объема полученного раствора. В электродиализном процессе основной статьей потребления энергии являются затраты на создание постоянного электрического поля, обеспечивающее требуемую плотность тока; в обратноосмотическом процессе – на создание рабочего давления в ячейке. Как видно из графиков, для каждого раствора существует область концентраций, в которых электродиализная обработка эффективнее обратноосмотической и есть области с обратной зависимостью. Существуют растворы, для которых проведение мембранного процесса разделения, включающего сначала электродиализную обработку, а затем обратноосмотическое разделение, будет энергетически эффективнее осуществления только электродиализного или только обратноосмотического процесса.

Известно, что в ходе одностадийного обратноосмотического процесса разделения сточных вод, содержащих минеральные компоненты в высоких концентрациях, не удастся получить глубоко деминерализованную воду. В этом случае эффективнее вместо проведения двухстадийного обратноосмотического процесса, провести мембранный процесс разделения, состоящий из электродиализного снижения уровня минерализации и обратноосмотического получения чистой воды.

На рисунке 2 представлены затраты энергии при обратноосмотическом (ОО), электродиализном (ЭД) и совместном процессе (Σ) разделения водного раствора хлорида натрия от концентрации 0,256 М до 0,05 М в зависимости от концентрации раствора, выходящего из электродиализной и входящей в обратноосмотическую установку.

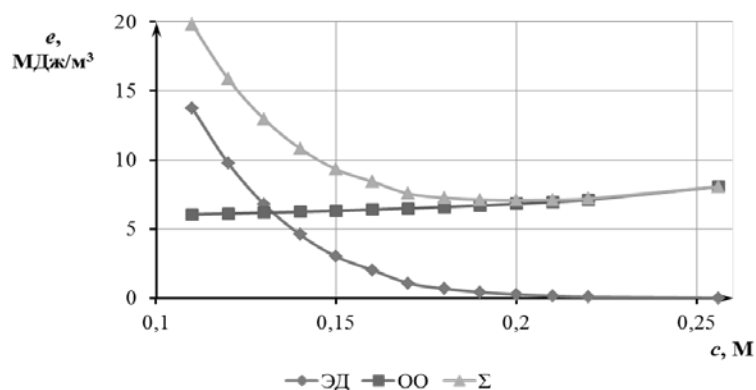


Рисунок 2 – Зависимость удельных энергетических затрат на разделение водного раствора хлорида натрия от концентрации раствора

Анализируя полученные данные, следует отметить наличие точки экстремума на линии суммарных энергозатрат, что говорит о возможности минимизации энергетических затрат при совместном использовании двух мембранных процессов, что позволяет рекомендовать представленный способ организации процесса разделения как наименее энергозатратный по сравнению с одностадийными процессами.

Библиографический список

1. Дмитриев Е. А., Кузнецова И. К. Введение в интеграцию основных процессов химической технологии: учеб. пособие. М. : РХТУ им. Менделеева, 2005. 57 с.
2. Рудобахта С. П. Эффективность массообменных процессов в системах с твердой фазой (сушка, адсорбция, экстрагирование) // Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (ISTS "EESTE-2021"). М. , 2021. С. 80–88.
3. Хоменков А. С., Ильина С. И. Энергосбережение в процессах ректификации с применением тепловых насосов // Успехи в химии и химической технологии. 2017. № 5. С. 17–19.
4. Каграманов Г. Г., Фарносова Е. Н., Титов А. В. Изучение мембранных методов очистки сточных вод от тяжелых металлов // Сборник докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня образования факультета водоснабжения и водоотведения МИСИ–МГСУ. 2019. С. 134–137.
5. Ильина С. И. Электромембранные процессы: учеб. пособие. М. : РХТУ им. Менделеева, 2013. 57 с.
6. Хорохорина И. В., Орлов А. А., Лазарев С. И. Электромембранные процессы для защиты окружающей среды // Материалы докладов X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Махачкала. 2022. С. 373–376.
7. Электро-массообменные процессы в решении экологических проблем / Свитцов А. А., Быков В. И., Титов А. А., Ильина С. И., Равичев Л. В., Логинов В. Я. // Энергетика в условиях цифровой трансформации. Наука. Технологии. Инновации. Волжский, 2022. С. 234–239.
8. Липин А. Г., Липин А. А. Очистка сточных вод от нитрита аммония в электромембранном аппарате // Химические волокна. 2019. № 4. С. 58–60.
9. Джубари М. К. А. Кинетические закономерности двухстадийного процесса мембранного разделения сточных вод, содержащих хлорид натрия, ацетат натрия и уксусную кислоту: дис. ... кандидата технических наук / Тамб. гос. тех. ун-т. Тамбов, 2023. 210 с.

УДК 66.047

Владимир Владимирович Ткач, кандидат технических наук, доцент кафедры «Общепрофессиональные дисциплины», tkachbalian@yandex.ru

Александр Анатольевич Шевцов, доктор технических наук, профессор кафедры «Общепрофессиональные дисциплины», shevalol@rambler.ru

Никита Александрович Савичев, курсант, tkachbalian@yandex.ru

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Россия, г. Воронеж

Барабанная сушилка с двумя независимыми секциями

Аннотация. Сушка является достаточно энергоемким процессом. Снижение удельных энергозатрат при использовании барабанных сушилок, является приоритетной задачей. Технические решения, использованные при проектировании данной установки, позволят снизить энергозатраты на процесс сушки.

Ключевые слова: барабанная сушилка, секция, энергозатраты.

Vladimir V. Tkach, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of General Professional Disciplines, tkachbalian@yandex.ru

Alexander A. Shevtsov, Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor of the Department of General Professional Disciplines, shevalol@rambler.ru

Nikita A. Savichev, Cadet, tkachbalian@yandex.ru

Military Training and Research Center of the Air Force Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, Russia, Voronezh

Drum dryer with two independent sections

Abstract. Drying is quite an energy - intensive process. Reducing specific energy consumption when using drum dryers is a priority. The technical solutions used in the design of this installation will reduce the energy consumption for the drying process.

Keywords: drum dryer, section, energy consumption.

Барабанные сушилки широко применяются в различных сферах промышленности [1, 2]. Они используются на производстве сухих смесей, для сушки опилок и щепы, широкое применение в сельском хозяйстве получили барабанные сушилки для зерна. Высокая производительность сушилки, интенсивность и равномерность просушки, автоматизация всех процессов, компактность и простота конструкции делает данный вид сушки одним из самых востребованных. Однако энергопотребление в данном виде сушки является достаточно высоким по сравнению с другими видами сушки. В современных барабанных сушилках энергопотребление в среднем составляет от 3600 до 4050 кДж/кг испаренной влаги. Разработанная двухсекционная барабанная сушилка с двумя независимыми секциями, вращающимися от одного привода, позволит существенно снизить энергозатраты на процесс сушки.

Предлагаемая конструкция сушилки представлена на рисунок 1 [3].

Двухсекционная барабанная сушилка содержит загрузочное устройство 1 соединенное с неподвижным фланцем первой секции 18, патрубок подвода высушиваемого материала 2, патрубок центрального подвода теплоносителя 3, переливную диафрагму 4, перегружающую продукт из первой секции барабана 5 во вторую секцию барабана 6, подъемно-лопастные насадки 7, первый зубчатый бандаж переливной диафрагмы 8, второй зубчатый бандаж переливной диафрагмы 9, промежуточный ряд сателлитов 10, кольцо с внутренними зубьями 11, левый полуконус 12, правый полуконус 13, ось 14, шестерня с внутренними зубьями 15, промежуточную камеру 16, ведомый ряд сателлитов 17, неподвижный фланец второй секции 19, разгрузочную камеру 20, патрубок подвода теплоносителя в плоский кол-

латор первой секции 21, плоский коллектор первой секции 22, патрубок подвода теплоносителя в плоский коллектор второй секции 23, плоский коллектор второй секции 24, раструб 25, трубу с патрубком для отвода теплоносителя 26, торцевой фланец первой секции 27, торцевой фланец второй секции 28, водило 29, подшипник 30, подшипник 31, уплотнительную манжету 32, привод 33, опорные ролики 34, бандаж барабанов 35.

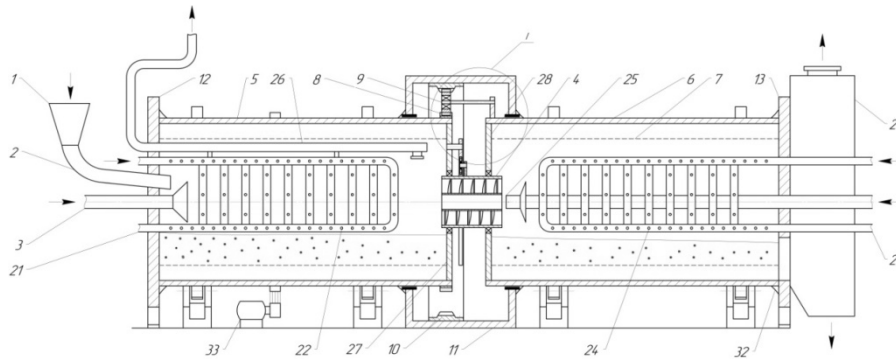


Рисунок 1 – Двухсекционная барабанная сушилка

Двухсекционная барабанная сушилка работает следующим образом

Высушиваемый материал через загрузочное устройство 1 по патрубку 2 сначала поступает в первую секцию 5 барабанной сушилки, а затем через переливную диафрагму 4 во вторую секцию 6 барабанной сушилки, после чего выводится из сушилки через разгрузочную камеру 20. Вращающиеся секции 5 и 6 своими бандажми 35 установлены на опорные ролики 34 и вместе с переливной диафрагмой 4 приводятся во вращение от общего привода 33.

Подъемно-лопастные насадки 7, расположенные на внутренней поверхности секций 5 и 6, обеспечивают равномерное перемешивание и перемещению высушиваемого материала по длине сушилки.

В процессе сушки осуществляют одновременную подачу теплоносителя в рабочий объем первой секции 5 через патрубок центрального подвода 3 и патрубок плоского коллектора 21, размещенного по длине секции в вертикальной плоскости. Через отверстия в плоском коллекторе 22 подают теплоноситель в поперечном направлении относительно движения пересыпающегося с помощью подъемно-лопастной насадки 7 слоя высушиваемого материала. При этом создаются условия равномерного распределения потока теплоносителя через движущийся слой материала по всей длине первой секции барабанной сушилки. Отработанный теплоноситель выводят из первой секции через трубу 26, установленную в неподвижном фланце 18.

Подачу теплоносителя в плоский коллектор 24 второй секции 6 осуществляют через неподвижный фланец 19 и патрубок центрального подвода 23, с раструбом 25, в который теплоноситель подводят по трубкам, проходящим через разгрузочную камеру. Отработанный теплоноситель выводят из второй секции через отверстия в неподвижном фланце 19 и разгрузочную камеру 20.

Установленная между первой и второй секциями барабанной сушилки промежуточная камера 16 содержит соосно с ней расположенную переливную диафрагму 4, установленную в подшипниках 31, которые в свою очередь запрессованы в торцевом фланце 27 первой секции 5 и в торцевом фланце 28 второй секции 6. Переливная диафрагма 4 служит для перегрузки высушиваемого материала посредством шнека из первой секции 5 во вторую секцию 6.

Вращение секций и переливной диафрагмы осуществляется от одного привода и двух дифференциальных планетарных зубчатых передач, расположенных в промежуточной камере 16.

Первая дифференциальная планетарная внутренняя зубчатая передача образована первым зубчатым бандажом переливной диафрагмы 8, промежуточным рядом сателлитов

10, кольцом с внутренними зубьями 11 и соосно размещенными с секциями левым и правым полуконусами 12, 13.

Вторая внутренняя зубчатая планетарная передача образована вторым зубчатым бандажом переливной диафрагмы 9, шестерней с внутренними зубьями 16 жестко закрепленной посредством болтового соединения к большому основанию правого полуконуса 13, и подшипниковым узлом, состоящим из закрепленных водил 29 с установленным на них в подшипниках ведомым рядом сателлитов 17.

Привод 33 обеспечивает вращение первой секции барабана 5 находящегося в жесткой связи посредством болтового соединения с левым полуконусом 12, который в свою очередь передает вращение промежуточному ряду сателлитов 10 и правому полуконусу 13. Промежуточный ряд сателлитов 10, взаимодействующий посредством зубчатого зацепления с кольцом с внутренними зубьями 11 и первым зубчатым бандажом 8 приводит во вращение переливную диафрагму 4. Шестерня с внутренними зубьями 15 правого полуконуса 13 и второй зубчатый бандаж переливной диафрагмы 9, совершая вращательное движение, приводят во вращение ведомый ряд сателлитов 17, которые через водила 29 приводят во вращение вторую секцию барабана 6.

Изменение передаточных чисел шестерни с внутренними зубьями 15 и ведомого ряда сателлитов 17 позволяет создать оптимальные условия перегрузки материала с заданной производительностью. При этом обеспечивается высокоэффективная сушка благодаря возможности изменения частот вращения смежных секций и переливной диафрагмы.

Непрерывность подачи, перемещения и перегрузки дисперсных материалов обеспечивается с учетом кинетических закономерностей процесса сушки определенных экспериментально. Для сбалансированной нагрузки секций необходимо изменять частоту вращения переливной диафрагмы. Чтобы увеличить количество перегружаемого материала изменяют диаметр промежуточного ряда сателлитов. Тогда при одинаковой линейной скорости вращения переливной диафрагмы и сателлитов будет изменяться угловая скорость их вращения.

Возможность изменения частот вращения и их конструктивное оформление позволяет изменять характеристики планетарных передач и перенастраивать сушилку под конкретный высушиваемый материал.

Апробация работы данной сушилки была проведена на разработанном виртуальном испытательном стенде. Полученные экспериментальные данные показали, что предложенная конструкция барабанной сушилки позволяет снизить энергозатраты на 8-10% по сравнению с существующими аналогами.

Таким образом, предлагаемая двухсекционная барабанная сушилка обеспечивает равномерность сушки материала при переменных режимах, позволяет повысить производительность и снизить энергозатраты на процесс сушки.

Библиографический список

1. Энергосберегающие технологии и оборудование для сушки пищевого сырья / А. Н. Остриков, И. Т. Кретов, А. А. Шевцов, В. Е. Добромиров / Воронеж. гос. технол. акад. Воронеж, 1998. 344 с.
2. Гинзбург А. С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. М. : Агропромиздат, 1985. 336 с.
3. Пат. № 2767463 РФ, МПК F 26 В 11/04. Двухсекционная барабанная сушилка / Ткач В. В., Шевцов А. А., Татаренков Е. А., Еремин Д. В., Попов А. С., Попов Д. С. Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации (RU) – № 2021162245; заявл. 03.06.2021; опубл. 17.03.2022. Бюл. № 8.

УДК 536.423.1

Пётр Сергеевич Васильев, кандидат технических наук, доцент кафедры

«Процессы и аппараты химических и пищевых производств», nestorvv@mail.ru

Леонид Саввич Рева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», leonidreva46@mail.ru

Волгоградский государственный технический университет, Россия, г. Волгоград

Оценка интенсивности теплоотдачи при множественном капельном кипении

Аннотация. Предложен коэффициент, учитывающий взаимное перекрытие капель жидкости на теплоотдающей поверхности при её множественном капельном орошении, позволяющий теоретически оценить интенсивность протекания процесса множественного капельного кипения.

Ключевые слова: капельное кипение, множественное орошение, теплоотдача.

Pyotr Vasilyev, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Processes and Devices of Chemical and Food Production, nestorvv@mail.ru

Leonid Reva, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Processes and Devices of Chemical and Food Production, leonidreva46@mail.ru

Volgograd State Technical University, Russia, Volgograd

Estimation of heat transfer intensity in multiple drip boiling

Abstract. The coefficient taking into account mutual overlapping of liquid droplets on the heat emitting surface at its multiple drip irrigation is proposed, allowing theoretical estimation of the intensity of the multiple drip boiling process.

Keywords: drip boiling, multiple irrigation, heat transfer.

Среди большинства тепловых процессов кипение отличается высокой интенсивностью теплоотдачи, что позволяет использовать его в качестве эффективного способа отвода больших тепловых потоков от теплоотдающей поверхности. Интенсивность его протекания определяет производительность, габариты и стоимость теплообменного оборудования [3].

Капельное кипение является одним из перспективных способов повышения интенсивности теплоотдачи при кипении. Для капельного кипения воды под атмосферным давлением максимальные значения температурного напора составляют 140...160 °С, коэффициента теплоотдачи 90...100 кВт/(м²·°С), а удельного теплового потока 10...12 МВт/м² [1].

Закономерности протекания кипения одиночной капли жидкости весьма хорошо изучены [4, 5, 7]. Однако в реальных производственных технологиях теплоотдающая поверхность должна орошаться множеством капель. В связи с тем, что основные количественные характеристики процесса зависят от размера капель и от совокупного протекания элементарных актов кипения расположенных рядом друг с другом на теплоотдающей поверхности и в общем случае перекрывающих друг друга единичных капель, целью настоящей работы является теоретическая оценка интенсивности теплоотдачи при множественном капельном кипении.

Основные количественные характеристики процесса кипения единичной капли жидкости: время испарения τ (с), диаметр пятна контакта с теплоотдающей поверхностью $d_{\text{п}}$ (м), коэффициент теплоотдачи α (Вт/(м²·°С)) и максимальная рабочая температура теплоотдающей поверхности $t_{\text{ст}}$ (°С), выше которой жидкость переходит в сфероидальное состояние – определяются по известным эмпирическим уравнениям [4, 5, 7] соответственно:

$$Ho_v = 2,256 \cdot 10^{-29} \cdot Ra^{-1,933} \cdot Oh^{-11,572} \cdot Re^{-0,231} \cdot \left(\frac{t_{кин} - t_n}{\Delta t} \right)^{0,243} \cdot \left(\frac{S_m}{R_a} \right)^{1,025} \cdot \left(\frac{W_a}{W_k} \right)^{-2,370}, \quad (1)$$

$$\Gamma = 14,829 \cdot Ra^{0,045} \cdot Oh^{0,498} \cdot Re^{0,127} \cdot \left(\frac{t_{кин} - t_n}{\Delta t} \right)^{0,019} \cdot \left(\frac{S_m}{R_a} \right)^{-0,024} \cdot \left(\frac{W_a}{W_k} \right)^{0,312}, \quad (2)$$

$$Nu = 2,924 \cdot 10^9 \cdot Ra^{0,906} \cdot Oh^{3,688} \cdot Re^{-0,073} \cdot \left(\frac{t_{кин} - t_n}{\Delta t} \right)^{-0,106} \cdot \left(\frac{S_m}{R_a} \right)^{-0,138} \cdot \left(\frac{W_a}{W_k} \right)^{0,700}, \quad (3)$$

$$t_{cm} = 0,9 \cdot \left[t_{кин} + \sqrt{\frac{(t_{кин} - t_n) \cdot \Delta t}{9,671 \cdot 10^{13} \cdot Ra \cdot Oh^{6,100} \cdot Re^{0,317} \cdot \left(\frac{S_m}{R_a} \right)^{-1,165} \cdot \left(\frac{W_a}{W_k} \right)^{-2,198}}} \right], \quad (4)$$

где $Ho = \frac{\tau \cdot \mu}{d_k^2 \cdot \rho}$ – число гомохронности; $\Gamma = \frac{d_n}{d_k}$ – геометрический симплекс;

$Nu = \frac{\alpha \cdot d_k}{\lambda}$ – число Нуссельта; $Ra = \frac{g \cdot d_k^3 \cdot \rho^2 \cdot c_p}{\mu \cdot \lambda} \cdot \beta \cdot \Delta t$ – число Рэлея;

$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\sigma \cdot \rho \cdot d_k}}$ – число Онезорге; $Re = \frac{w \cdot d_k \cdot \rho}{\mu}$ – число Рейнольдса;

d_k – диаметр капли, м; w – скорость подачи капли жидкости в момент ее соударения с теплоотдающей поверхностью, м/с; t_n – начальная температура жидкости в капле, °С; $\Delta t = t_{ст} - t_{кин}$ – температурный напор, °С; $t_{ст}$ – температура теплоотдающей поверхности, °С; R_a – среднее арифметическое отклонение профиля теплоотдающей поверхности, мкм; S_m – средний шаг неровностей профиля теплоотдающей поверхности по средней линии, мкм; $W_a = \sigma \cdot (1 + \cos \theta)$ – работа адгезии, Дж/м²; $W_a = 2 \cdot \sigma$ – работа когезии, Дж/м²; θ – краевой угол смачивания теплоотдающей поверхности, град.; теплофизические свойства жидкости, взятые при температуре её кипения $t_{кин}$: ρ – плотность, кг/м³; μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; β – коэффициент объёмного расширения, 1/°С; c_p – удельная массовая теплоёмкость, Дж/(кг·°С); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); σ – коэффициент поверхностного натяжения, Дж/м².

Площадь теплоотдающей поверхности может быть рассчитана по уравнению [1]:

$$F = \frac{3 \cdot d_n^2 \cdot G \cdot \tau}{d_k^3 \cdot \rho}, \quad (5)$$

где G – расход испаряемой жидкости, кг/с.

Рассмотрим вариант организации водяного орошения стальной теплоотдающей поверхности, параметры шероховатости $R_a = 2,5$ мкм, $S_m = 200$ мкм и адгезии $\theta = 45^\circ$ которой соответствуют листовому прокату, с помощью центробежной форсунки. Воду с начальной температурой $t_n = 20^\circ\text{С}$ испаряют под атмосферным давлением для получения $G = 0,4$ кг/с насыщенного пара.

Используя практические рекомендации [2], выберем центробежную форсунку с винтовым завихрителем производительностью 0,4 кг/с. По рекомендуемой методике рассчитаем диаметр сопла 6,8 мм, скорость вылета пелены на выходе из сопла $w_n = 33,5$ м/с и медианный диаметр капель воды $d_m = 0,223$ мм.

На рисунках 1а и 2а представлены графики зависимости коэффициента теплоотдачи и соответственно площади теплоотдающей поверхности от температурного напора, построенные по результатам расчёта по уравнениям (1)–(5) при $w = 0,8 \cdot w_n$ и $d_k = d_m$.

Из рисунков 1а и 2а видно, что для идеального водяного орошения, при котором капли располагаются на теплоотдающей поверхности без взаимного перекрытия, теоретиче-

ски возможно достичь значений температурного напора 111°C , коэффициента теплоотдачи $64 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, удельного теплового потока $10 \text{ МВт}/\text{м}^2$. При такой интенсивности протекания теплового процесса для испарения $0,42 \text{ кг}/\text{с}$ воды необходима площадь теплоотдающей поверхности $0,1 \text{ м}^2$.

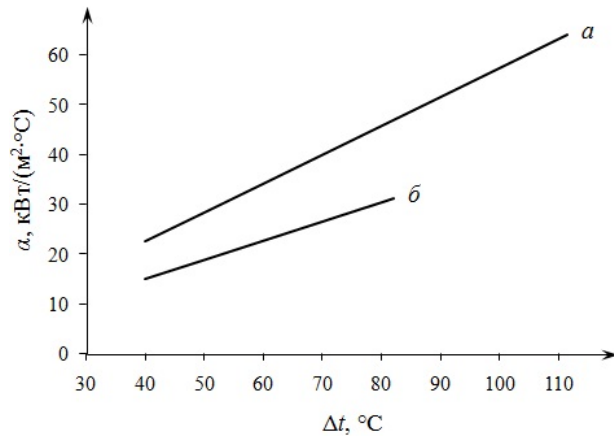


Рисунок 1 – Графики зависимости
 $\alpha = f(\Delta t)$: а – $d_k = d_m$; б – $d_k = k \cdot d_m$

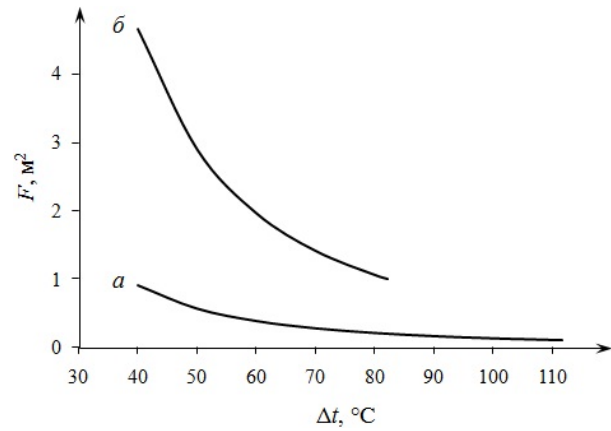


Рисунок 2 – Графики зависимости
 $F = f(\Delta t)$: а – $d_k = d_m$; б – $d_k = k \cdot d_m$

Взаимное перекрытие капель на теплоотдающей поверхности для реального водяного орошения предлагается учитывать с помощью коэффициента k , показывающего максимальное количество миделевых сечений капель медианного диаметра d_m , уместающихся внутри круглого пятна контакт $d_{\text{п}}$ кипящей на теплоотдающей поверхности капли диаметром $d_k = d_m$ [6]:

$$k \approx 0,907 \cdot \left(\frac{d_{\text{п}}}{d_m} \right)^2. \quad (6)$$

На рисунках 1б и 2б представлены графики зависимости коэффициента теплоотдачи и соответственно площади теплоотдающей поверхности от температурного напора, построенные по результатам расчёта по уравнениям (1)–(6) при $w = 0,8 \cdot w_n$ и $d_k = k \cdot d_m$.

Из рисунков 1б и 2б видно, что для реального водяного орошения, с учётом взаимного перекрытия капель на теплоотдающей поверхности, практически возможно достичь значений температурного напора 82°C , коэффициента теплоотдачи $31 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, удельного теплового потока $1 \text{ МВт}/\text{м}^2$. При такой интенсивности протекания теплового процесса для испарения $0,42 \text{ кг}/\text{с}$ воды необходима площадь теплоотдающей поверхности 1 м^2 .

Таким образом, теоретическая оценка интенсивности теплоотдачи при множественном капельном кипении показывает, что, при прочих равных условиях, реальные значения коэффициента теплоотдачи в 1,5 раза меньше теоретических, а реальные площадь теплоотдающей поверхности в 5 раз больше теоретической. При этом реально достижимое максимальное значение температурного напора в 1,4 раза меньше теоретического.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-1603.2022.4 «Разработка энергоресурсоэффективного оборудования для реализации теплообменных процессов с использованием множественного капельного кипения и высокопористых материалов на основе экспериментально-теоретических исследований».

Библиографический список

1. **Васильев П. С., Рева Л. С., Шурак А. А.** Повышение эффективности работы утилизаторов тепла отходящих газов на основе технологии капельного кипения // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2022. № 2 (39). С. 6–12.
2. **Геллер З. И.** Мазут как топливо. М. : Недра, 1965. 496 с.
3. **Овсянник А. В.** Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей. Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012. 284 с.
4. Определение времени испарения кипящей на поверхности нагрева капли жидкости / П. С. Васильев, Л. С. Рева, С. Л. Рева, А. Е. Новиков, А. Б. Голованчиков // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19, № 5. С. 121–126.
5. Определение площади пятна контакта кипящей на поверхности нагрева капли жидкости / П. С. Васильев, Л. С. Рева, С. Л. Рева, А. Е. Новиков, А. Б. Голованчиков // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19, № 13. С. 116–123.
6. **Шклярский Д. О., Ченцов Н. Н., Яглом И. М.** Геометрические оценки и задачи из комбинаторной геометрии. М. : Наука, 1974. 384 с.
7. Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении капли жидкости на поверхности нагрева / П. С. Васильев, Л. С. Рева, С. Л. Рева, А. Б. Голованчиков // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20, № 22. С. 28–33.

УДК 504.064.43

Ольга Борисовна Колибаба, кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Энергетика теплотехнологий и газоснабжения», koli-baba@mail.ru
Рамиль Наилевич Габитов, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Энергетика теплотехнологий и газоснабжения», Ramilgab@mail.ru
Денис Александрович Долинин, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Энергетика теплотехнологий и газоснабжения», murcielago82@mail.ru
Артем Николаевич Бородин, студент, vp.artiom@yandex.ru
Ивановский государственный энергетический университет, Россия, г. Иваново

Экспериментальное исследование сушки древесины с целью создания композитного топлива

***Аннотация.** В настоящее время актуальной задачей развития топливно-энергетических комплексов ряда стран является увеличение доли генерации за счет вовлечения в оборот твердого топлива. В ряду подобных проектов особо значимыми являются те, которые позволяют утилизировать отходы различных производств, в том числе деревообрабатывающих. При топливоподготовке древесных отходов стадия сушки является крайне энергозатратной, поэтому надежное прогнозирование ее кинетики во многом определяет эффективность всего технологического процесса. Проведенные экспериментальные исследования процесса конвективной сушки влажных древесных отходов позволили получить уравнения для нахождения критериев Нуссельта. Предложенные уравнения дают возможность более точно определить коэффициенты теплоотдачи, применяемые в расчетах режимных параметров сушильных установок.*

***Ключевые слова:** конвективная сушка, древесные отходы, влажность, сушильный агент, критериальное уравнение, коэффициент теплоотдачи.*

Olga B. Kolibaba, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Power Engineering of Heat Technologies and Gas Supply,
koli-baba@mail.ru

Ramil N. Gabitov, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor
of the Department of Power Engineering of Heat Technologies and Gas Supply, Ramilgab@mail.ru

Denis A. Dolinin, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor
of the Department of Power Engineering of Heat Technologies and Gas Supply,
murcielago82@mail.ru

Artem N. Borodin, Student, vp.artiom@yandex.ru
Ivanovo State Power Engineering University, Russia, Ivanovo

Experimental study of wood drying in order to create composite fuel

***Abstract.** Today an urgent task in the development of fuel and energy complexes in a number of countries is to increase the share of generation by involving solid fuel in the turnover. In a number of such projects, those that allow the disposal of waste from various industries, including woodworking, are especially significant.*

During the fuel preparation of wood waste, the drying stage is extremely energy-consuming, therefore, reliable prediction of its kinetics largely determines the efficiency of the entire technological process. The experimental studies of the process of convective drying of wet wood waste made it possible to obtain equations for finding the Nusselt criteria. The

proposed equations make it possible to more accurately determine the heat transfer coefficients used in the calculation of the operating parameters of the dryer.

Keywords: *convective drying, wood waste, humidity, drying agent, criterion equation, heat transfer coefficient.*

В настоящее время тенденции развития топливно-энергетических комплексов ряда стран, в том числе России, предполагают увеличение генерации электроэнергии за счет вовлечения в оборот различных видов возобновляемого твердого топлива [1–3]. Указанные тенденции поддерживаются также существованием объективно острых задач по утилизации отходов. В рамках современных требований к экологичности промышленных производств разрабатываются новые законы, регламентирующие размещение самих производств, а также хранение и переработку отходов. Поэтому, задача поиска эффективных способов утилизации отходов становится актуальной. Здесь, в первую очередь, имеется в виду получение из отходов дополнительного продукта, такого как, топливо для котлов. Древесные отходы – это хорошее топливо с достаточно высокой теплотворной способностью, причем – это экологически чистое топливо с минимальным содержанием золы и вредных веществ.

Проблема утилизации древесных отходов в нашей стране является одной из наиболее актуальных, так как в настоящее время при существующих методах переработки теряется почти половина биомассы дерева [4]. Это свидетельствует о низком уровне технологических процессов деревообработки.

Изготовление композиционных материалов в виде топливных гранул и брикетов является перспективным направлением в использовании отходов как топлива. Качество брикетов в значительной степени зависит от влажности исходной смеси. Сырье для прессования должно иметь влажность в пределах 6...12 % [5]. С повышением влажности калорийность брикетов снижается. Поэтому для получения качественного топлива необходима предварительно подготовленная по влажности древесина.

Процесс сушки является крайне энергозатратным, поэтому надежное прогнозирование его кинетики во многом определяет эффективность всего технологического цикла. Выбор и расчет энергоэффективного режима работы сушильной установки невозможен без проведения ряда экспериментальных исследований.

Сложности исследования межфазного теплообмена теоретическими методами приводят к необходимости применения теории подобия с использованием опытных данных. При одновременном протекании процессов тепло- и массообмена наиболее универсальным можно считать критериальное уравнение П. Д. Лебедева, которое позволяет рассчитывать коэффициенты теплообмена большинства влажных тел для любого момента времени процесса сушки [6].

Целью настоящего исследования является получение на основе структуры зависимости [6] критериальных уравнений тепло- и массообмена, применимых для расчета процесса конвективной сушки влажной древесной щепы.

Была выполнена серия натурных исследований процесса конвективной сушки в цилиндрическом аппарате диаметром 160 мм. Исследуемым материалом являлись образцы измельченной древесины длиной 150 мм и диаметром 30 мм. Тестовые заготовки имели начальную влажность 70...75 % и температуру, равную температуре окружающей среды. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1.

Эксперимент проводили следующим образом. Внутри аппарата смонтировали вертикальный штатив с фиксируемой горизонтальной штангой для закрепления образцов исследуемого материала с термодатчиками. Термодатчики типа ТХА(К) были предварительно установлены на поверхности и в центре образца в среднем сечении по длине образца. Аппарат выводили на стационарный режим работы. После выхода на стационарный режим в рабочем пространстве аппарата размещали штатив с укрепленными на нем древесными образцами с

термопарами. В ходе эксперимента фиксировали убыль массы и изменение температуры образца. Длительность опыта определялась установлением постоянства массы материала. Температуру сушильного агента (воздуха) термопарами, находящимися перед образцами.

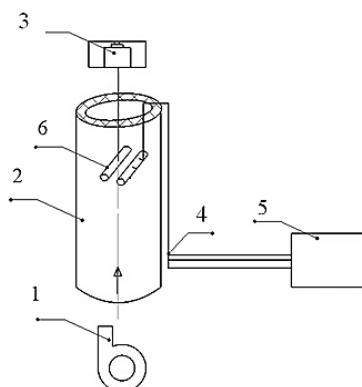


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки:

1 – теплоventилиатор; 2 – теплоизолированный корпус аппарата; 3 – весы;
4 – термопары ТХА(к); 5 – ПК; 6 – исследуемые образцы

Опыты проводили при постоянной температуре сушильного агента: 100 °С, 127 °С, 167 °С. Исследование гидродинамической составляющей процесса осуществляли при скоростях газового потока 0,2 и 0,7 м/с.

На рисунке 2 представлены опытные данные, характеризующие изменение во времени температуры и влажности образца, полученные при нагреве воздухом с температурой 127 °С. Анализ результатов показывает, что первые 50 минут процесса сушки характеризуются высокой скоростью изменения и температуры, и влажности материала. В течение следующих 90 мин интенсивность удаления влаги не снижается, в то время как температура материала растет незначительно. В течение остальных 250 мин темп изменения температуры и влажности невелик.

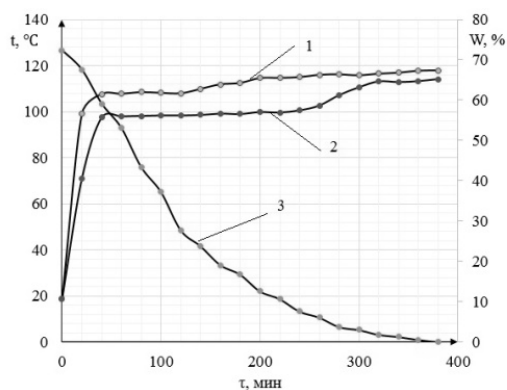


Рисунок 2 – Экспериментальные значения температуры и влажности образца:

1 – температура на поверхности образца; 2 – температура в центре образца;
3 – относительная влажность материала

Аналогичные результаты получены при температурах воздуха 100 °С, 167 °С. Полученные опытные данные обрабатывали в виде зависимости:

$$Nu = A Re^n \left(\frac{T_c}{T_M} \right) E^n \quad (1)$$

где A – постоянный коэффициент; Re – число Рейнольдса; E – симплекс, учитывающий изменение влажности материала, т.е. влияние массообмена на теплообмен.

$$E = \frac{U_H - U_T}{U_H - U_K} \quad (2)$$

где U_H – начальное влагосодержание, кг/кг; U_T – текущее влагосодержание, кг/кг; U_K – конечное (равновесное) влагосодержание, кг/кг.

Полученное критериальное уравнение в области изменения параметров $Re = 450 \div 1100$, $T_c = 100 \div 170^\circ\text{C}$ и $E = 0,15 \div 0,8$ имеет вид:

$$Nu = 0,5 Re^{0,33} \left(\frac{T_c}{T_m} \right) E^{-0,09} \quad (3)$$

За определяющий размер был принят диаметр образца, за определяющую температуру – средняя температура сушильного агента.

На рисунке 3 приведены графики зависимостей коэффициентов теплоотдачи от относительной влажности материала при $Re = 560$.

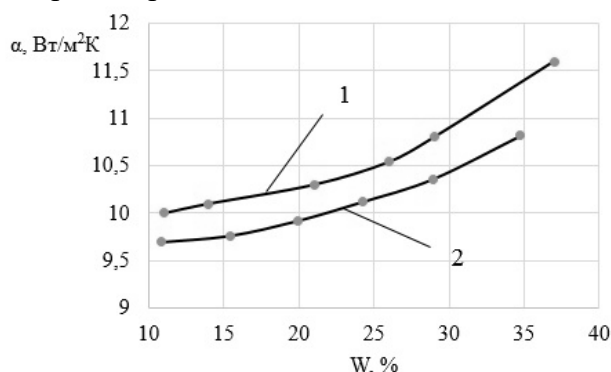


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от относительной влажности материала:

- 1 – режим с температурой сушильного агента 167 °С;
2 – режим с температурой сушильного агента 127 °С

Результаты анализа показывают, что в области $W = 10...38\%$ кривые имеют сходный характер. С уменьшением относительной влажности материала происходит плавное снижение величины коэффициента теплоотдачи.

Библиографический список

1. Корсак Е. П. Формирование системы угроз энергетической безопасности Республики Беларусь // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. – Т.62, № 4. С. 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398>.
2. Фортов В. Е., Попель О. С. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России // Теплоэнергетика. 2014. № 6. С. 4–13.
3. Лосюк Ю.А., Жибрик С. В., Корчиненко С. В. Некоторые аспекты термохимической конверсии торфа // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2008. № 5. С. 60–66.
4. Theoretical study of particulate flows formation in circulating fluidized bed / V. Mizonov, A. Mitrofanov, A. Camelo, L. Ovchinnikov // Recent Innovations in Chemical Engineering. 2018. Vol. 11. No 1. pp. 20–28. DOI 10.2174/2405520410666170620105102.
5. Головков С. И., Коперин И. Ф., Найденов В. И. Энергетическое использование древесных отходов. М. : Лесная промышленность. 1987. 222 с.
6. Лебедев П. Д., Щукин А. А. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий. М. : Энергия, 1970. 408 с.

УДК 504.064.43

Ольга Борисовна Колибаба, кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Энергетика теплотехнологий и газоснабжения», koli-baba@mail.ru
Рамиль Наилевич Габитов, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Энергетика теплотехнологий и газоснабжения», Ramilgab@mail.ru
Денис Александрович Долинин, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Энергетика теплотехнологий и газоснабжения», murcielago82@mail.ru
Белов Максим Сергеевич, студент, max-be2013@yandex.ru
Ивановский государственный энергетический университет, Россия, г. Иваново

Экспериментальное исследование тепло- и массообмена в процессе уничтожения просроченных продуктов питания

Аннотация. Наиболее распространенным способом утилизации просроченных продуктов является термическое обезвреживание в инсинераторах при температуре 900...1100 °С. При этом влажность отходов не должна превышать 35 %. Достаточно высокое содержание влаги (55...90 %) большинства продуктов вызывает необходимость предварительной подсушки сырья. Выбор рационального режима работы сушилки, характеризующегося минимальными затратами энергии на процесс, требует проведения ряда исследований. Проведенные экспериментальные исследования процесса конвективной сушки влажного продукта (моркови) позволили получить уравнения для нахождения критериев Нуссельта. Предложенные уравнения дают возможность более точно определить коэффициенты теплоотдачи, применяемые в расчетах режимных параметров сушильной установки.

Ключевые слова: конвективная сушка, влажность, сушильный агент, критериальное уравнение, коэффициент теплоотдачи.

Ramil N. Gabitov, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor
of the Department of Power Engineering of Heat Technologies and Gas Supply, Ramilgab@mail.ru
Olga B. Kolibaba, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Power Engineering of Heat Technologies and Gas Supply,
koli-baba@mail.ru
Denis A. Dolinin, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor
of the Department of Power Engineering of Heat Technologies and Gas Supply,
murcielago82@mail.ru
Maxim S. Belov, Student, max-be2013@yandex.ru
Ivanovo State Power Engineering University, Russia, Ivanovo

Experimental study of heat and mass transfer in the process of destruction of expired food

Abstract. The most common way to dispose of expired products is thermal neutralization in incinerators at a temperature of 900...1100 °C. In this case, the humidity of the waste should not exceed 35 %. Sufficiently high moisture content (55-90%) of most products makes it necessary to pre-dry the raw materials. The choice of a rational operating mode of the dryer, characterized by minimal energy consumption for the process, requires a number of studies. The experimental studies of the process of convective drying of a wet product (carrots) made it possible to obtain equations for finding the Nusselt criteria. The proposed equations make it possible to more accurately determine the heat transfer coefficients used in the calculation of the operating parameters of the dryer.

Keywords: *convective drying, humidity, drying agent, criterion equation, heat transfer coefficient.*

Утилизация и уничтожение просроченных продуктов – обязательное требование законодательства (ст.3, ст.24, ст.25 Закона N 29-ФЗ) [1, с.4,с.18-19]. Согласно Федеральному классификационному каталогу отходов просроченные продукты питания от магазинов не относятся к твердым коммунальным отходам (ТКО). Складирование и хранение отходов продуктов питания, срок годности которых истек, на площадках общего пользования неприемлемо. Такие товары несут угрозу окружающей среде и здоровью людей.

В настоящее время на практике используются следующие способы утилизации: компостирование, перемалывание и термическое уничтожение.

Компостирование применяют для продуктов натурального происхождения, имеющих ограниченный срок годности. Это позволяет использовать их в качестве удобрений после компостирования.

При отсутствии сортировки сырья и упаковки компании прибегают к методу перемалывания отходов. Продукцию помещают в специальные установки, измельчается, образуя единую густую массу. Получившееся сырье добавляют в состав строительных смесей.

Наиболее распространенным способом утилизации «просрочки» является термическое обезвреживание. Для этого продукты помещают в специальные печи – инсинераторы [2, 3], в которых они термически обрабатываются до образования золы, которую впоследствии используют в качестве удобрения.

Процесс осуществляется при температуре 900...1100 °С. При этом влажность отходов не должна превышать 35 %.

Однако большая часть просроченных продуктов имеет достаточно высокое содержание влаги. Так, например, для колбасных изделий влагосодержание составляет 55...75 %, для рыбных – 66...70 %, а для овощей оно имеет еще более высокие значения, равные 80...90 %. Поэтому необходима предварительная подготовка сырья в виде измельчения и подсушки в сушилке, где в качестве сушильного агента могут быть использованы дымовые газы после инсинератора.

Отходы продуктов питания можно отнести к кусковым материалам, которые при наличии внутренней влаги требуют повышенных затрат энергии на процесс сушки. Выбор рационального режима работы сушилки, характеризующегося минимальными затратами энергии на процесс, требует проведения ряда исследований тепломассообменных процессов, протекающих в установке.

Экспериментальные исследования процесса конвективной сушки влажного продукта (моркови) были проведены на установке, схема которой представлена на рисунке 1а. Экспериментальная установка состояла из сушильного шкафа 1, весового устройства 2, исследуемого образца 3, термопар 4, модуля ввода аналогового сигнала 5 (МВА-8) и компьютера 6.

Методика эксперимента заключалась в следующем. Два образца 3 длиной 150 мм и толщиной 30 мм помещали в сушильный шкаф 1. По толщине образца размещали четыре термопары 4 типа ТХА(К). Для получения правильного представления о поле температур образца особое внимание обращали на точность размещения термопар в образце. Для исключения переноса теплоты через электроды термопары устанавливали с торца и размещали в изотермических поверхностях. Точки замера температуры выбирали на оси тела или около неё, так как температурные градиенты здесь либо равны нулю, либо невелики. Все это позволяло величину ошибки при замере свести к минимуму. Сигнал с термопар поступал на аналоговый модуль 5 МВА-8 и далее обрабатывался на компьютере 6. Показания термопар фиксировали с интервалом времени в пять секунд. Сушку образца выполняли до установления постоянства его массы, которую измеряли при помощи весового устройства 2.

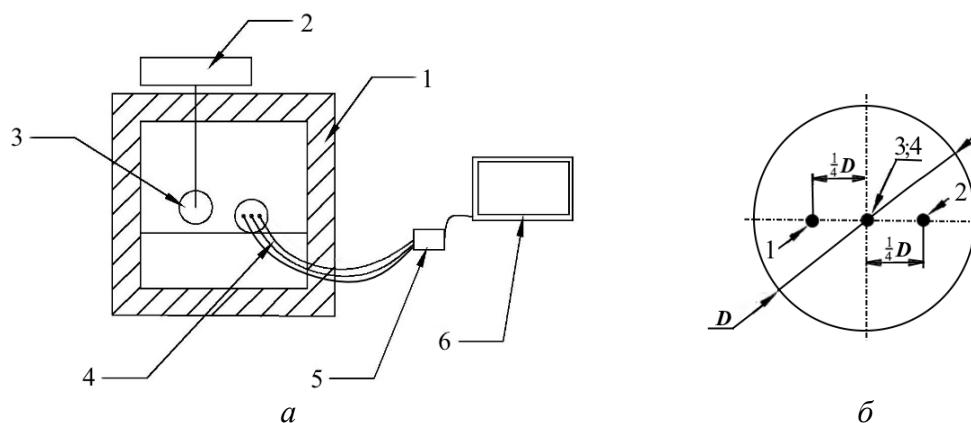


Рисунок 1 – Экспериментальные исследования процесса конвективной сушки влажного продукта (моркови)

a – схема экспериментальной установки: 1 – сушильный шкаф; 2 – весовое устройство; 3 – исследуемый образец; 4 – термопары; 5 – модуль ввода аналоговый; 6 – компьютер; *б* – характеристика схемы измерения температур: 1; 2; 3; 4 – точки расположения термопар в сечении образца

Схема расположения термопар в образце показана на рисунке 1б. Термопары 1 и 2 были расположены симметрично по центру образца и заглублены на расстояние 7,5 мм от наружной цилиндрической поверхности; спаи термопар 3 и 4 были расположены на оси образца и заведены через его торцевые поверхности на глубину 45 мм.

Для получения более достоверных результатов и снижения влияния случайных погрешностей один и тот же эксперимент повторяли 5 раз. В качестве исходных данных для последующих расчётов принимали усреднённые по числу опытов значения температур для данного режима нагрева.

Экспериментальные исследования процесса конвективной сушки влажного материала проводили при скоростях газового потока 0,2...1 м/с в трех температурных режимах при постоянной температуре сушильного агента, равной 100 °С, 150 °С и 200 °С. На рисунке 2 представлены экспериментальные данные изменения температуры и влажности образца моркови в процессе его сушки при температуре сушильного агента 150 °С.

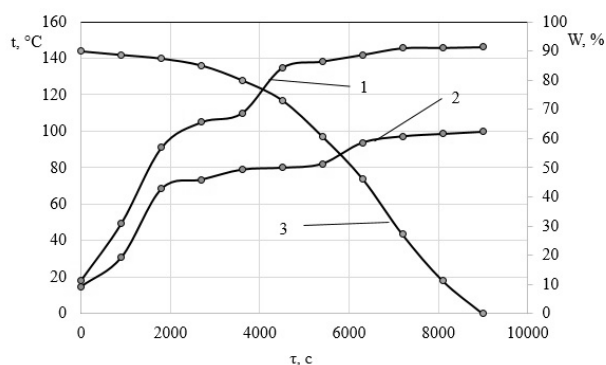


Рисунок 2 – Температура и влажность образца:

1 – температура на поверхности образца; 2 – температура на поверхности образца;
3 – изменение относительной влажности материала

Аналогичные данные получены для температур сушильного агента 100 и 200 °С. Погрешность проведения экспериментов не превысила 3 %.

Опытные данные обрабатывали в виде критериальной зависимости:

$$Nu = ARe^n \left(\frac{T_c}{T_m} \right) E^n, \quad (1)$$

где A – постоянный коэффициент; Re – число Рейнольдса ($Re = wd/v$); E – симплекс, учитывающий изменение влажности материала, т.е. влияние массообмена на теплообмен.

$$E = \frac{U_n - U_T}{U_n - U_K}, \quad (2)$$

где U_n – начальное влагосодержание, кг/кг; U_T – текущее влагосодержание, кг/кг; U_K – конечное (равновесное) влагосодержание, кг/кг.

После обработки экспериментальных данных были получены критериальные уравнения для определения коэффициентов теплоотдачи.

Для ламинарного режима при $Re = 200 \div 550$, $T_c = 100 \div 200^\circ\text{C}$ и $E = 0,25 \div 0,75$ рекомендуется уравнение вида:

$$Nu = 0.6Re^{0.33} \left(\frac{T_c}{T_m} \right) E^{-0.14} \quad (3)$$

За определяющий размер принят диаметр образца; за определяющую температуру – средняя температура сушильного агента.

На рисунке 3 представлены средние значения коэффициентов теплоотдачи в зависимости от влажности материала для исследуемых температурных режимов.

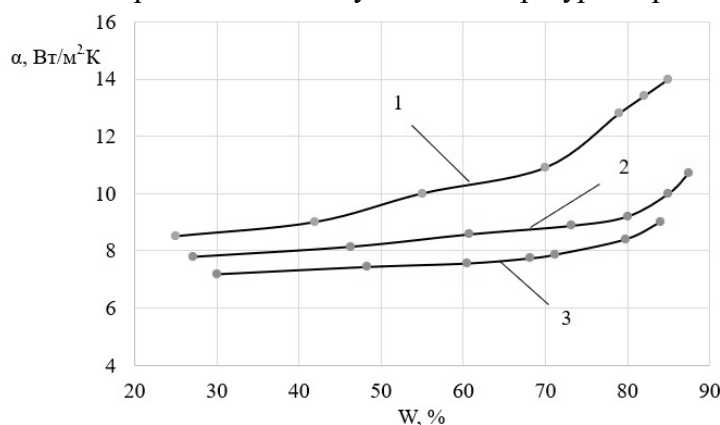


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от относительной влажности:

1 – коэффициент теплоотдачи при температуре сушки 200 °C;
2 – при 150 °C; 3 – при 100 °C ($Re = 200$)

Графики показывают, что с уменьшением относительной влажности материала величины коэффициента теплоотдачи снижаются. Наиболее резкое уменьшение коэффициентов теплоотдачи происходит в диапазоне влажности от 85 до 60 %. Далее снижение коэффициентов теплоотдачи незначительно.

Библиографический список

1. Федеральный закон от 02.01.2000 № 29-ФЗ «О качестве и безопасности пищевых продуктов» [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_25584/ (дата обращения 21.13.2023).
2. Пат. 150968 Российская Федерация. Инсинератор / Павлов Г. И., Кочергин А. В., Павлов А. Г. Опубл. 3.10.2015.
3. Пат. 2735825 Российская Федерация. Инсинератор / Девлетова О. Ш. Опубл. 11.09.2020.

УДК 536.24

Елена Васильевна Романова, старший преподаватель кафедры
«Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
romanohel@yandex.ru

Александр Николаевич Колиух, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», a_koliuh@mail.ru
Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов

Оценка эффективности интенсификации теплообмена

Аннотация. В статье рассматриваются критерии для определения эффективности интенсифицированных поверхностей теплообмена. Представлена методика оценки тепловой эффективности трубчатого теплообменника-рекуператора с оребрением.

Ключевые слова: тепловая эффективность, оребренный теплообменник.

Elena V. Romanova, Senior Lecturer of the Department of Technological Processes, Apparatuses and Technosphere Safety

Alexander N. Koliukh, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor
of the Department of Technological Processes, Apparatuses and Technosphere Safety
Tambov State Technical University, Russia, Tambov

Abstract. The article discusses criteria for determining the effectiveness of intensified heat exchange surfaces. A method for evaluating the thermal efficiency of a tubular heat exchanger-recuperator with fins is presented.

Keywords: thermal efficiency, finned heat exchanger.

Процессы теплообмена в трубах и каналах распространены в химической, пищевой, нефтеперерабатывающей промышленности. Энергоэффективность теплообменных аппаратов и другого оборудования с конвективным тепло-обменом может быть улучшена за счет применения интенсификаторов.

Применяются разнообразные способы интенсификации теплообмена в трубах или каналах теплообменного оборудования. Например, применение устройств, закручивающих поток, создание дополнительной шероховатости, турбулизация потока, создание развитых поверхностей путем оребрения.

Интенсификация теплообмена позволяет уменьшить размеры теплообменного оборудования, обеспечить высокие коэффициенты теплопередачи и соответственно повысить энергоэффективность теплообменного оборудования.

Очень часто применение интенсификации теплообмена приводит к увеличению гидравлического сопротивления. Поэтому возникает необходимость оценивать не только тепловую, но и гидравлическую эффективность применяемого способа интенсификации. Как правило, сравнивается эффективность интенсифицированной поверхности и гладкой.

Классическим выражением для определения эффективности метода интенсификации теплообмена является зависимость между соотношениями чисел Нуссельта $Nu/Nu_{г\text{л}}$ и коэффициентами сопротивлений $\xi/\xi_{г\text{л}}$ для каналов с интенсификацией Nu , ξ и для гладких каналов $Nu_{г\text{л}}$, $\xi_{г\text{л}}$.

Данное соотношение называется коэффициентом теплогидравлической эффективности. В ряде работ это соотношение также называется фактор аналогии Рейнольдса, thermal performance factor (TPF) [1–3].

Академиком М. В. Кирпичевым в качестве коэффициента эффективности предложено следующее соотношение [4,5]

$$E = \frac{Q}{N} \quad (1)$$

где Q – количества тепла, переданного поверхностью, Вт; N – мощность, затраченная на перекачивание теплоносителя, Вт.

Калининым предложены следующие критерии оценки эффективности интенсификации теплообмена [6]:

- сравнение поверхности теплообмена или объема двух теплообменных аппаратов, один из которых с гладкой поверхностью, а другой с интенсификатором теплообмена, при одинаковой тепловой мощности, расходах теплоносителей и потерях давления на прокачку теплоносителя;
- сравнение тепловой мощности теплообменников с интенсификаторами теплообмена и без них при одинаковых объемах, расходах теплоносителя и потерях давления на их прокачку;
- сравнение мощностей или потерь давления на прокачку теплоносителей теплообменников с интенсификаторами теплообмена и без них при одинаковых объемах, расходах теплоносителя, тепловой мощности.

Также Калинин предлагает сравнение эффективности интенсификации теплообмена проводить отдельно для трубного и межтрубного пространства. Затем, зная эффективность интенсификации теплообмена в трубном и межтрубном пространстве, оценивать ее в целом для теплообменника.

В нашей работе в качестве интенсификатора теплообмена рассматривалось оребрение в виде шипов. Данный тип оребрения применялся в теплообменном аппарате типа «труба в трубе» [7, 8].

Для теплообменника-рекуператора, т.е. теплообменника в котором производится подогрев входящего потока за счет горячего потока с таким же массовым расходом (рисунок 1), по нашему мнению, не целесообразно разделять тепловые потоки в трубном и межтрубном пространстве, а гидравлическое сопротивление пространств необходимо суммировать, так как прокачка теплоносителя осуществляется одним насосом через оба пространства.

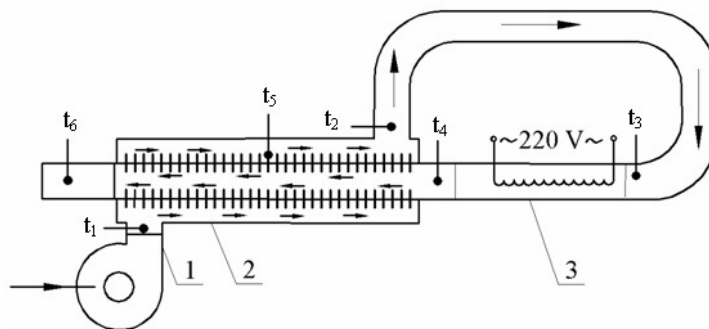


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки:

1 – вентилятор; 2 – оребренный теплообменник;
3 – ТЭН; $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ – расположение термодатчиков

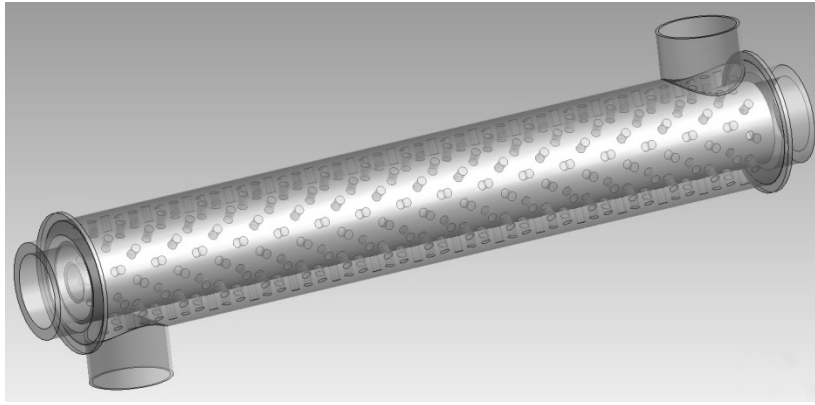


Рисунок 2 – Оребренный теплообменник-рекуператор (3D модель)

Проанализировав рассмотренные данные, была предложена методика для сравнения тепловой эффективности оребренного теплообменника-рекуператора (рисунок 2) и теплообменника типа «труба в трубе» с гладкими трубами:

- задаваясь различными расходами теплоносителя экспериментальным путем определяют сопротивления трубного $\Delta P_{\text{тр}}$ и межтрубного $\Delta P_{\text{мт}}$ пространства и тепловые потоки оребренного теплообменника;
- для гладкого теплообменника при тех же расходах теплоносителя и тепловых потоках путем расчета определяют необходимую длину труб (диаметры труб аналогичны оребренному теплообменнику), после чего находят сопротивления трубного и межтрубного пространств;
- при одинаковых тепловых потоках находят отношение сумм сопротивлений трубного и межтрубного пространств оребренного к гладкому теплообменнику

$$E = (\Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{мт}})_{\text{ор}} / (\Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{мт}})_{\text{гл}} \quad (2)$$

где E – эффективность, $\Delta P_{\text{тр}}$ – сопротивление трубного пространства, Па, $\Delta P_{\text{мт}}$ – сопротивление межтрубного пространства, Па;

- в случае, если эффективность E больше единицы, можно говорить о том, что оребренный теплообменник по отношению $Q/\Sigma\Delta P$ более эффективен;
- для анализа полученных данных можно построить зависимость $E = f(V)$, или $E = f(Re)$, где V – объемный расход, $\text{м}^3/\text{с}$; Re – критерий Рейнольдса для одного из пространств.

В случае если имеется теплообменник «труба в трубе» с такими же трубами (по длине и диаметру), что и у оребренного, то можно экспериментально определить гидравлические сопротивления пространств и тепловые потоки. Тогда, пренебрегая изменениями в теплофизических свойствах теплоносителей, эффективность можно посчитать как

$$E = (Q_{\text{ор}} / \Sigma\Delta P_{\text{ор}}) / (Q_{\text{гл}} / \Sigma\Delta P_{\text{гл}}) \quad (3)$$

где $Q_{\text{ор}}$, $Q_{\text{гл}}$ – количества переданной теплоты для оребренного и гладкого теплообменника, Вт; $\Sigma\Delta P_{\text{ор}}$, $\Sigma\Delta P_{\text{гл}}$ – суммарные сопротивления пространств для оребренного и гладкого теплообменника, Па.

Сравнение эффективности оребренной теплообменной поверхности с гладкой позволит осуществить выбор наиболее рационального варианта при проектировании нового теплообменного оборудования и модернизации уже работающих теплообменников.

Библиографический список

1. **Халатов А. А., Онищенко В. Н., Донник Т. В., Окишева А. В.** Фактор аналогии Рейнольдса для интенсификаторов теплообмена различного типа // Известия Академии Наук. Энергетика. 2011. № 4., С. 109–116
2. **Pandey L., Singh S.** Numerical analysis for heat transfer augmentation in a circular tube heat exchanger using a triangular perforated Y-shaped insert // Fluids. 2021. Vol. 6(7), pp. 1–11. <https://doi.org/10.3390/fluids6070247>.
3. **Chirag M., Jeetendra V., Ramesh A.** The heat transfer enhancement techniques and their thermal performance factor // Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences. 2018. Vol.7(1). pp.1–21. <https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2017.10.001>.
4. **Лаптев А. Г., Дударовская О. Г., Фарахов Т. М.** Оценка энергоэффективности методов интенсификации теплообмена в вязких средах // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19, № 6. С. 59–63.
5. **Гортышов Ю. Ф., Олимпиев В. В., Байгалиев Б. Е.** Теплогидравлический расчет и проектирование оборудования с интенсифицированным теплообменом. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. 432 с.
6. **Калинин Э. К., Дрейцер Г. А., Ярхо С. А.** Интенсификация теплообмена в каналах. М. : Машиностроение, 1990. 208 с.
7. **Коновалов В. И., Романова Е. В., Колиух А. Н.** Исследование процесса теплообмена в оребренном трубчатом рекуператоре // Вестник ТГТУ. 2012. Т.18. № 4., С. 878–880.
8. **Романова Е. В., Колиух А. Н., Лебедев Е. А.** Применение пакета ANSYS при исследовании гидравлического сопротивления оребренного рекуператора // Вестник ТГТУ, 2017. Т. 23, № 3. С. 420–427.

УДК 629.733.5

Дмитрий Владимирович Белов, аспирант кафедры автоматизация и роботизация технологических процессов имени академика И. Ф. Бородин, dmitri.belov@rgau-msha.ru
Сергей Андреевич Андреев, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизация и роботизация технологических процессов имени академика И.Ф. Бородин, energo-andreev@rgau-msha.ru
 Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Россия, г. Москва

Расчет скорости нагрева гелия в рабочей камере дирижабля

Аннотация. Обоснована целесообразность управления высотой полета дирижабля изменением плотности гелия посредством варьирования его температурой. Рассмотрена динамика передачи тепловой энергии через гелий, находящийся между основаниями цилиндра. Для определения скорости распространения тепловой энергии использован закон Фурье и уравнение изменения количества теплоты при изменении температуры тела с известной теплоемкостью. Сделано допущение о постоянстве градиента температуры при распространении тепловой энергии вдоль оси цилиндра и произведена его оценка как частного от деления разности температур на расстояние между источником и приемником тепла. Построены зависимости продолжительности нагрева гелия от расстояния между источником и приемником, а также от конечной и начальной температуры приемника и температурой источника тепла.

Ключевые слова: дирижабль, высота полета, гелий, плотность, скорость нагрева.

Dmitry V. Belov, Postgraduate of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after Academician I. F. Borodin, dmitri.belov@rgau-msha.ru
Sergey A. Andreev, Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after Academician I.F. Borodin
 Russian Timiryazev State Agrarian University, Russia, Moscow

Calculation of the heating rate of helium in the working chamber of the airship

Abstract. The expediency of controlling the flight altitude of an airship by changing the density of helium by varying its temperature is substantiated. The dynamics of thermal energy transfer through helium located between the bases of the cylinder is considered. To determine the rate of distribution of thermal energy, the Fourier law and the equation for the change in the amount of heat with a change in body temperature with a known heat capacity are used. An assumption is made about the constancy of the temperature gradient during the propagation of thermal energy along the axis of the cylinder and its estimate is made as a quotient of dividing the temperature difference by the distance between the heat source and receiver. The dependences of the duration of helium heating on the distance between the source and receiver, as well as on the final and initial temperature of the receiver and the temperature of the heat source are plotted.

Keywords: airship, flight altitude, helium, density, heating rate.

Один из способов управления высотой полета дирижабля заключается в изменении плотности рабочего газа за счет варьирования его температурой. В большинстве современных дирижаблей в качестве рабочего газа используется гелий. Известно, что зависимость плотности гелия [3] от температуры имеет вид, представленный на рисунке 1.

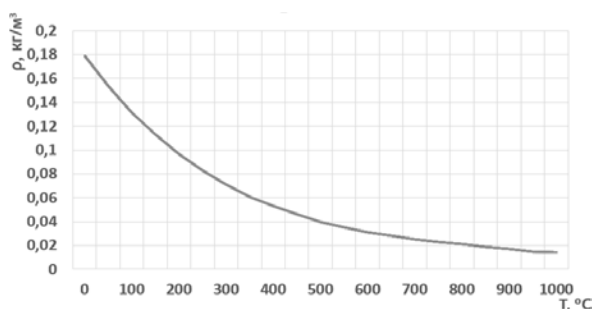


Рисунок 1 – Зависимость плотности гелия от температуры

Как видим, эта зависимость является нелинейной, однако гелий с температурой от 400 °K до 1200 °K в дирижаблях не используется. Зависимость плотности гелия от температуры в более узком, рабочем диапазоне представлена на рисунке 2 [2]. Из представленного графика видно, что при нагреве гелия от 10 до 40 °C его плотность снижается на 15 %, а при нагреве до 50 °C – на 20 % [1].

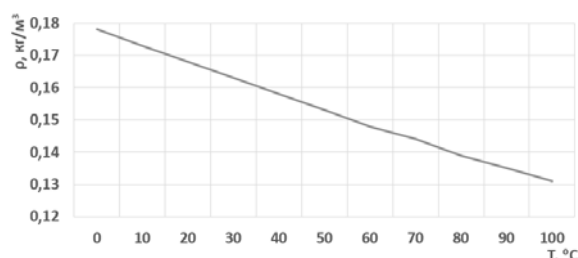


Рисунок 2 – Зависимость плотности гелия от температуры в рабочем диапазоне

Традиционно нагрев гелия во внутреннем пространстве дирижабля производят локально, используя местный источник тепловой энергии, расположенный в нижней части камеры. В качестве источника обычно выступает разогретая поверхность теплообменного аппарата, выполненного из материала с высокой теплопроводностью. В дирижаблях с бортовой электрической сетью и аккумулятором в качестве источника теплоты может быть использован электронагреватель. При включении источника тепловой энергии происходит нагрев окружающего гелия и последующий нагрев удаленных точек рабочей камеры. Для обеспечения равномерного и интенсивного нагрева в таких случаях можно использовать вентилятор, однако это определяет дополнительный расход электроэнергии и увеличит массу конструкции.

Аналогичный результат может быть достигнут при рассредоточенном подводе тепловой энергии с помощью электронагревательной спирали, размещенной по всему объему рабочей камеры дирижабля. При проектировании электрооборудования для рассредоточенного нагрева весьма важное значение имеет выбор конфигурации и расположения спирали, обеспечивающих достаточно быстрое изменение температуры гелия.

Произведем оценку скорости распространения теплоты между двумя точками внутреннего пространства дирижабля, принимая во внимание, что одна из этих точек символизирует источник теплоты, а другая – некоторый небольшой объем гелия, расположенный на расстоянии H от источника. Выполняя расчет, будем считать известными температуру T_1 источника, а также начальную T_0 и конечную T_2 температуру в нагреваемом объеме. Сделаем допущение о распространении тепловой энергии внутри рабочей камеры дирижабля исключительно через газ и полном отсутствии теплопередачи по материалу оболочки. Рассматривая процесс нагрева гелия в удалении от источника теплоты, предположим, что передача теплоты осуществляется по достаточно узкому лучу постоянного диаметра. Геометри-

ческой интерпретацией такого луча будет ограниченная с обоих торцов труба, то есть цилиндр. Обозначим радиус основания этого цилиндра символом R .

При определении продолжительности нагрева гелия, находящегося у холодного основания цилиндра, рассмотрим тепловое взаимодействие между горячим и холодным основаниями и распределение температуры внутри исследуемого объема. Предполагая, что нагрев гелия происходит медленно и равномерно, воспользуемся законом Фурье:

$$q = -k \left(\frac{dT}{dx} \right), \quad (1)$$

где q – плотность теплового потока; k – коэффициент теплопроводности гелия, $k = 0,15 \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot \text{К})}$; $\frac{dT}{dx}$ – градиент температуры вдоль оси цилиндра. Знак минуса в формуле (1) указывает на отрицательный градиент температуры $\frac{dT}{dx}$ поскольку температура убывает в направлении от горячего основания к холодному.

Введем обозначения: m – масса нагреваемого гелия, кг; C – теплоемкость гелия при постоянном давлении, кДж/кг·К; t – длительность нагрева, с.

Тогда изменение внутренней энергии гелия ΔU можно записать следующим образом: $\Delta U = m \cdot C (T_2 - T_0)$, где T_0 – начальная температура гелия у холодного основания цилиндра.

С другой стороны, уравнение теплопередачи при нагреве гелия можно представить в виде:

$$Q = -k \cdot \rho \cdot V \cdot \left(\frac{dT}{dx} \right) \cdot t$$

где Q – количество переданной теплоты, кДж; ρ – плотность гелия, кг/м³; V – объем нагреваемого гелия, представляющий собой тонкий слой газа у холодного основания цилиндра, м³.

Приравняв изменение внутренней энергии гелия к количеству переданной теплоты и используя уравнение состояния идеального газа для определения массы нагретого гелия, получим:

$$\rho \cdot V \cdot C \cdot (T_2 - T_0) = k \cdot F \cdot \left(\frac{dT}{dx} \right) \cdot t, \quad (2)$$

где F – площадь сечения цилиндра, м², $F = \pi \cdot R^2$, где R – радиус цилиндра, м.

Следует отметить, что определение градиента температуры $\frac{dT}{dx}$ в практических расчетах может оказаться довольно сложным, поскольку в процессе нагрева он будет меняться. В связи с этим, для определения длительности нагрева t придется сделать ряд допущений и упрощений.

Один из таких подходов основан на предположении, что $\frac{dT}{dx} = \text{const.}$ В этом случае средний градиент температуры может быть найден при использовании начальных и конечных температур T_1 и T_0 и последующего решения полученного уравнения относительно времени t . Определим средний градиент температуры как частное от деления: $\left(\frac{dT}{dx} \right)_{\text{ср}} = \frac{T_1 - T_0}{H}$.

Таким образом

$$t = \frac{\rho \cdot V \cdot C \cdot (T_2 - T_0)}{k \cdot F \cdot \left(\frac{dT}{dx} \right)} = \frac{\rho \cdot V \cdot C \cdot H \cdot (T_2 - T_0)}{k \cdot F \cdot (T_1 - T_0)}. \quad (3)$$

Используя уравнение состояния идеального газа, найдем плотность гелия

$$\rho = \frac{P}{(R \cdot T_0)}, \quad (4)$$

где P – атмосферное давление (например, 101325 Па), R – универсальная газовая постоянная (для гелия $R = 2077 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$). Подставив известные численные значения переменных в выражение (4), получим:

$$t = \frac{101325 \cdot V \cdot 5,19 \cdot H \cdot (T_2 - T_0)}{0,15 \cdot F \cdot 2077 \cdot T_0 (T_1 - T_0)} = \frac{1687,93 \cdot V \cdot H \cdot (T_2 - T_0)}{F \cdot T_0 (T_1 - T_0)} \quad (5)$$

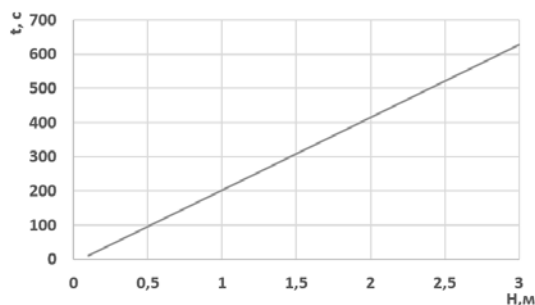


Рисунок 3 – Зависимость продолжительности нагрева гелия в заданном температурном диапазоне от удаления от источника теплоты

Если принять во внимание, что объем V представляет собой часть исследуемого цилиндра с тем же радиусом, но имеющим высоту 0,05 м, в то время как $T_1 = 80^\circ\text{C}$, $T_2 = 60^\circ\text{C}$, $T_0 = 10^\circ\text{C}$ и $H = 3$ м, то продолжительность нагрева гелия составит 627 с. При прочих равных условиях, но при $H = 0,1$ м гелий прогреется за 11 с. Из выражения (5) видно, что зависимость продолжительности нагрева гелия от расстояния между исследуемыми точками определяется уравнением прямой линии (рисунок 3). Зависимость продолжительности нагрева гелия от температуры T_1 определяется гиперболой (рисунок 4). Зависимость продолжительности нагрева гелия от температуры T_0 является более сложной (рисунок 5), поскольку исследуемый аргумент одновременно входит в числитель и знаменатель выражения (5).

При этом в обоих случаях величина T_0 является вычитаемой, а ее значение в знаменателе возводится в квадрат. Полученные зависимости могут быть использованы при проектировании электрооборудования для рассредоточенного нагрева гелия в заданных условиях вертикального маневрирования дирижабля.

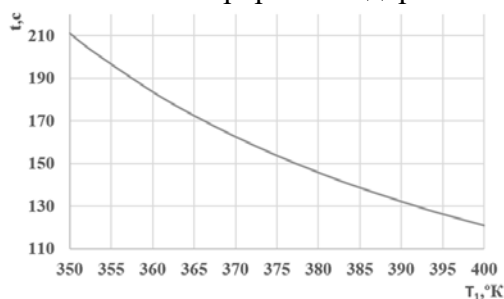


Рисунок 4 – Зависимость продолжительности нагрева гелия до заданной температуры от температуры источника теплоты

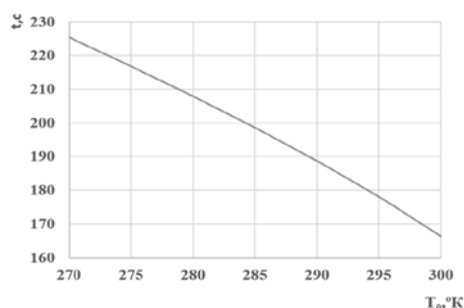


Рисунок 5 – Зависимость продолжительности нагрева гелия до заданной температуры от начальной температуры в рабочем пространстве дирижабля

Библиографический список

1. Андреев С. А., Белов Д. В. Вертикальное маневрирование микродирижаблей сельскохозяйственного назначения. Сборник статей XVII Международной научно-практической конференции, 07.11.19. Пенза, МЦНС Наука и Просвещение. 2019. С. 72–75.
2. Справочник по физике / Х. Кухлинг // Пер. с нем. М. : Мир, 1985. 520 с.
3. Термодинамические свойства гелия / В. В. Сычев, А. А. Вассерман, А. Д. Козлов, Г. А. Спиридонов, В. А. Цымарный; ГСССД. М. : Изд-во стандартов, 1984. 320 с. , ил. (Серия: монографии).

УДК 66.047.4/.6: 664.952/.95

Екатерина Владимировна Соколова, аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование», *k_sokolova93@mail.ru*

Астраханского государственного технического университета, Россия, г. Астрахань

Исследование кинетики процесса сушки печени сома при конвективном энергоподводе при ультразвуковом воздействии

Аннотация. В настоящее время растет интерес к разработке стратегий эффективного и использования побочных продуктов рыбной переработки, таких как печень сома. Для хранения такого сырья для последующей промышленной переработки может потребоваться предварительная стадия обезвоживания. Такой процесс является энергозатратным и трудоемким, что оправдывает его интенсификацию с использованием новых технологий. Целью исследования была оценка влияния применения мощного ультразвука в воздухе на процесс сушки печени сома горячим воздухом.

Ключевые слова: кинетика сушки, конвективный энергоподвод, ультразвук, печень сома.

Ekaterina V. Sokolova, Postgraduate of the Department "Technological machines and equipment", *k_sokolova93@mail.ru*

Astrakhan State Technical University, Russia, Astrakhan

Study of the kinetics of the process of drying the liver of catfish under convective energy supply under ultrasonic influence

Abstract. There is now growing interest in developing strategies for the efficient and effective use of fish by-products such as catfish liver. To store such raw materials for subsequent industrial processing, a preliminary dehydration step may be required. Such a process is energy-intensive and labor-intensive, which justifies its intensification with the use of new technologies. The aim of the study was to evaluate the effect of high-power ultrasound in air on the process of drying catfish liver with hot air.

Keywords: drying kinetics, convective energy supply, ultrasound, catfish liver.

Печень является одним из наиболее важных пищевых субпродуктов из сома, поскольку представляет собой хороший источник белков, витаминов А, В, С и D, а также минералов, таких как железо, цинк и медь [1]. Использование печени сома ограничено производством печеночных паштетов и кормов для животных, но может рассматриваться как побочный продукт переработки или даже основным источником производства биологически активных добавок. Дальнейшее использование рыбных субпродуктов, таких как печень сома, другие ее внутренности, является сложным из-за низкой биологической стабильности, потенциального источника патогенных микроорганизмов, высокого содержания воды, быстрого самоокисления и т.д. Чтобы преодолеть эти проблемы, можно использовать предварительную стадию обезвоживания, чтобы стабилизировать продукт и в то же время уменьшить его вес и объем. При этом, исследование процесса сушки должно не только охватывать стратегии, связанные с высокоэффективным проведением этого процесса с точки зрения скорости сушки, энергопотребления и затрат, но и показать, как данный вид консервирования влияет на качество конечного продукта.

Из различных существующих методов обезвоживания конвективная сушка горячим воздухом использовалась на протяжении долгого времени для сохранения продуктов пита-

ния и сельскохозяйственного сырья. Конвективная сушка пищевых продуктов представляет собой комбинированную операцию тепломассообмена и может выполняться с использованием естественной конвекции или принудительного воздуха. Применение ультразвука в воздухе представляет собой возможное альтернативное средство ускорения процесса массообмена при конвективной сушке пищевых продуктов, поскольку оно может влиять как на внутреннее, так и на внешнее сопротивление, основанное на нетепловых механизмах [2]. Таким образом, снижение содержания влаги в продукте при конвективном энергоподводе с ультразвуковым воздействием может облегчить дальнейшую переработку рыбной печени с целью получения ее белковой фракции и включения ее в рецептурный состав различной пищевой продукции, а также в композицию биологически активных премиксов.

Эффективность применения ультразвука в процессах сушки в значительной степени зависит от структуры пищевого материала и, следовательно, должна и может оцениваться экспериментально, поскольку экстраполяция результатов, полученных с использованием известных данных по сушке других пищевых материалов, является сложной и неточной. Следовательно, целью этого исследования было оценить влияние температуры воздуха и применения ультразвука в воздухе на продолжительность конвективной сушки печени сома горячим воздухом.

Как было уже отмечено, применение ультразвука в воздухе представляет собой возможное альтернативное средство ускорения процесса сушки пищевых продуктов. С одной стороны, ультразвуковые волны вызывают быструю серию попеременных сокращений и расширений (эффект губки) твердой матрицы, в которой они перемещаются. Это переменное напряжение улучшает внутреннюю диффузию молекул воды и, кроме того, может создавать микроскопические каналы, которые облегчают перенос влаги в высушиваемом материале. Кроме того, ультразвуковые волны высокой интенсивности потенциально могут вызывать образование молекул воды внутри пищевого материала, что может быть полезно для удаления адсорбционно-связанной влаги. С другой стороны, ультразвук в воздухе вносит изменения на показатели его давления и скорость колебаний, что важно при рассмотрении микропотока на границах раздела фаз твердое тело – жидкость и, следовательно, увеличивает скорость внешнего переноса влаги [3].

Для достижения поставленной цели была проведена серия постановочных экспериментов по обезвоживанию печени сома при конвективном энергоподводе на установке, представленной на рисунке 1. План постановочных экспериментальных исследований состоял из двух этапов: без и с применением ультразвука. В экспериментах, в которых применялся ультразвук, на преобразователь подавалась электрическая мощность 50 Вт. Для обоих этапов использовалась скорость воздуха 2 м/с при двух различных температурах: 40 и 70 °С. Для каждого этапа сушки было проведено три повторения.

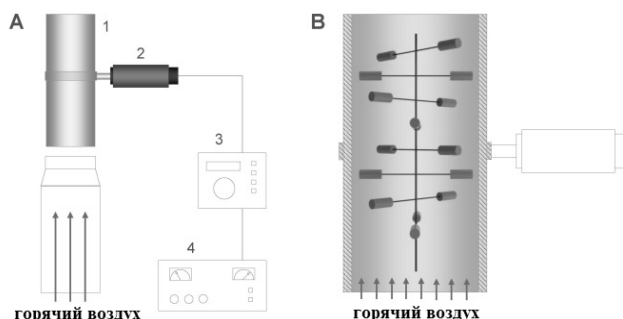


Рисунок 1 – Схема экспериментальной сушилки:

А – установка для конвективной сушки с помощью ультразвука:

- 1 – Вибрационный цилиндр – сушильная камера; 2 – Ультразвуковой преобразователь;
3 – Электронный контроллер импеданса; 4 – Ультразвуковой генератор энергии; В – Схема держателя образца внутри сушильной камеры

Образец, используемый в каждом эксперименте, состоял из 6 цилиндров, средний начальный вес которых составлял 20 ± 1 г. Эксперименты продолжались до достижения потери веса 60 % с интервалом взвешивания 10 мин. Во всех экспериментах начальное и конечное содержание влаги в образцах определяли гравиметрически, путем их обезвоживания при температуре 105°C до достижения постоянной массы на инфракрасном анализаторе влажности AND MX-50.

На рисунке 2 представлены экспериментально полученные кривые сушки цилиндров из рыбной печени при разных температурах с и без применения ультразвука. Очевидно, что в начальный момент сушка происходила с пониженной скоростью, что отражает актуальность диффузионного внутреннего транспорта как основного механизма управления удалением воды. Начальное среднее содержание влаги в продукте находилось на отметке 65 ± 2 %, а конечное среднее содержание влаги в продукте, с учетом его понижения на 60 % составило не менее 25 %. Следует отметить, что в постановочных экспериментах целью являлось не высушить печень до необходимой влажности, а выявить эффективность предлагаемого подхода.

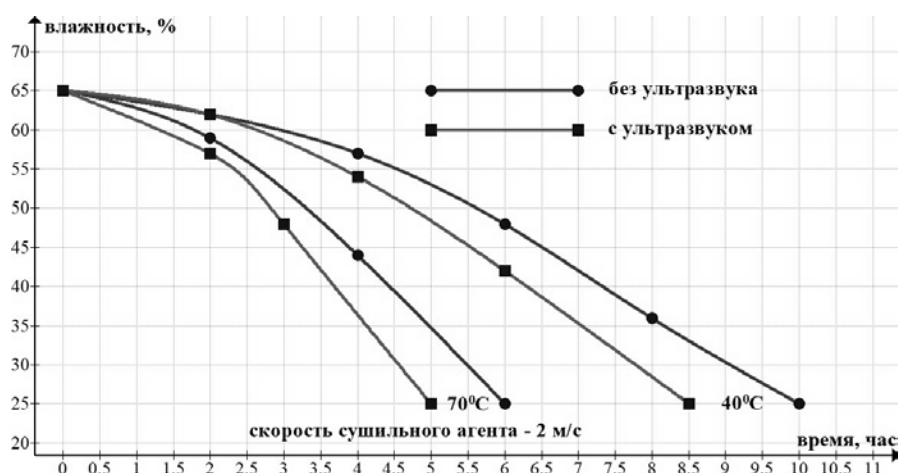


Рисунок 2 – Экспериментальные кривые сушки печени из сома

Как и ожидалось, при повышении температуры сушильного агента скорость сушки была выше в обеих экспериментальных группах. По этой причине для достижения среднего содержания влаги 25 % в объекте сушки в экспериментах без ультразвука потребовалось 10 ч при 40°C , в то время как процесс сушки был завершен всего за 6 ч при 70°C . При низких температурах применение ультразвука также увеличивало скорость сушки, что можно наблюдать, если сравнить эксперименты при температуре 40°C , результат – 8,5 ч. Эффект от применения ультразвука составил 15 % при температуре сушильного агента 40°C , а при 70°C – чуть меньше 17 %.

Следует отметить, что имеются сведения о более высоких процентах сокращения времени сушки (60...80 %). В качестве объектов обезвоживания использовались фрукты и овощи и применялся ультразвук, что, вероятно, связано со структурой пищевого материала [4]. Стоит отметить, что мягкие и пористые структуры обладают более низким ультразвуковым сопротивлением и, следовательно, лучшим сцеплением с воздухом, чем твердые и плотные продукты, коим является и исследуемый, что приводит к совершенно иной реакции на сушку с помощью ультразвука.

Заключение

Конвективная сушка с ультразвуком позволяет использовать более низкие температуры для поддержания заданной скорости сушки и, следовательно, оказалась полезной для обезвоживания термочувствительных материалов, таких как печень сома. Однако применение ультразвука в воздухе и его разработка представляют некоторые трудности, которые следует устранить, если это внедряется промышленно. Поскольку воздух является той сре-

дой, которая интенсивно поглощает ультразвуковую энергию, основной трудностью применения ультразвука является передача акустической волны от поверхности преобразователя к образцам. Кроме того, высокая разность электрического сопротивления ультразвуковой системы между воздухом и твердым веществом приводит к отражению значительной доли приложенной энергии, предотвращая передачу ультразвуковой энергии на обрабатываемые твердые вещества.

Библиографический список

1. Технохимическая характеристика печени лососевых рыб и перспективы ее использования / А. И. Чепкасова, Н. Б. Аюшин, М. И. Юрьева, Г. И. Загородная, Н. Н. Ковалев // Известия ТИНРО. 2009. Т. 159. С. 325–336.
2. Экотехнологии для эффективного использования продовольственных ресурсов в технологии пищевых систем. Часть 1 / Н. В. Науменко, И. Ю. Потороко, Н. В. Дежгунов, Е. Е. Науменко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2022. Т. 10. № 2. С. 50–58.
3. **Марков Ю. Ф.** Показатель активности воды и его применение при оптимизации процесса холодного копчения рыбы // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2020. № 4. С. 160–164.
4. Влияние параметров сушки на качественные характеристики плодов шиповника / В. В. Щербинин, А. М. Захаренко, Н. И. Давыденко, Г. С. Ульянова // Индустрия питания. 2022. Т. 7. № 2. С. 15–25.

УДК 637.56

Андрей Сергеевич Яснoв, аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование»,
ysandrew@mail.ru

Астраханский государственный технический университет, Россия, г. Астрахань

Анализ кинетики процесса обезвоживания мяса речной ракушки-перловицы с целью оценки его сорбционных свойств

Аннотация. В этом исследовании проведена оценка сорбционных свойств мяса речной ракушки-перловицы на основе анализа кинетических кривых процесса его обезвоживания и сделаны рекомендации по дальнейшему изучению этого с биологической и пищевой точек зрения ценного сырья. Мясо ракушки-перловицы богато уникальным составом по белкам, липидам, углеводам и другим компонентам, поэтому промышленная переработка этого фитопланктона представляет повышенный интерес у исследователей с целью извлечения из них ценных биологически активных соединений. Установлено, что при общей влажности исследуемого образца, равной 53 %, доля свободной влаги в нем составляет 43 %, а связанной, соответственно – 57 %. Таким образом, с определенной для инженерных расчетов точности, можно утверждать, что гигроскопические свойства у изучаемого образца проявляются до достижения в нем влажности 30 %, т. е. далее сорбцию влаги исследуемый продукт, при данных условиях проведения процесса, осуществлять не будет, т.к. будет достигнуто состояние термодинамического равновесия.

Ключевые слова: сорбционные свойства, кинетические кривые, мясо речной ракушки-перловицы.

Andrey S. Yasnov, postgraduate student of the Department of Technological Machines and Equipment, ysandrew@mail.ru

Astrakhan State Technical University, Russia, Astrakhan

Analysis of the kinetics of the dehydration process of the river pearl oyster meat in order to assess its sorption properties

Annotation. In this study, an assessment of the sorption properties of the meat of the river barley shell was carried out based on the analysis of the kinetic curves of the process of its dehydration and recommendations were made for further study of this valuable raw material from a biological and nutritional point of view. Barley shell meat is rich in unique composition in terms of proteins, lipids, carbohydrates and other components, therefore, the industrial processing of this phytoplankton is of great interest to researchers in order to extract valuable biologically active compounds from them. the proportion of free moisture in it is 43 %, and bound, respectively – 57 %. Thus, with the accuracy determined for engineering calculations, it can be argued that the hygroscopic properties of the studied sample manifest themselves until the humidity reaches 30 % in it, i.e. Further, the investigated product, under the given conditions of the process, will not carry out moisture sorption, because. a state of thermodynamic equilibrium is reached.

Keywords: sorption properties, kinetic curves, barley shell meat.

Введение

Морские моллюски с высоким содержанием белка употребляются в пищу в течение многих лет как в вареном, так и в сыром виде. Наиболее известными и употребляемыми

пищу морскими моллюсками являются мидии и моллюскообразные моллюски. Мидии происходят из латинского семейства *Mytilidae* и известны как *Mytilus edulis*. *M. edulis* обычно собирают для употребления в пищу как из естественной среды их обитания по всему миру, так и из фермерских источников [1].

Пресноводные мидии встречаются в нашей стране редко, т.к. обитают в основном в больших реках Центральной Европы, например, Днепре или Дунае и ближайшем бассейне. Этот представитель семейства мидий имеет зеленоватую или желтоватую раковину треугольной формы с зигзагообразными темными полосами на створках [2]. Но чаще, в мелких водоемах, мы встречаем ракушки-перловицы, узнать которые легко по темно-коричневому окрасу створок с тонкими полосками и продолговатой изогнутой форме, именно они являются объектом данного исследования (рисунок 1).

Мидии богаты уникальным составом по белкам, липидам, углеводам и другим компонентам, поэтому промышленная переработка этого фитопланктона представляет повышенный интерес у исследователей с целью извлечения из них ценных биологически активных соединений. Например, полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК), эйкозапентаеновая кислота (ЭПК) и докозагексаеновая кислота (ДГК) являются одними из наиболее ценных в питательном отношении компонентов речной биомассы.

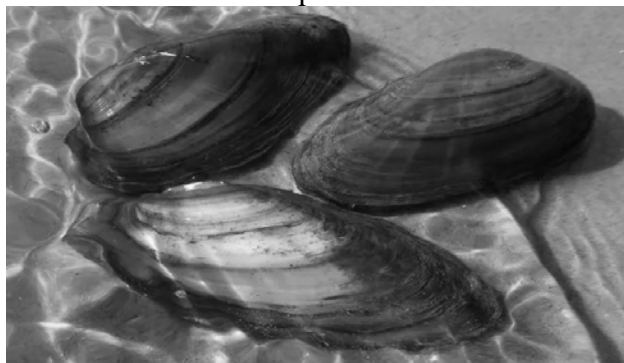


Рисунок 1 – Внешний вид ракушки-перловицы

Данное утверждение, в частности, подтверждается исследователями из Университета им. Мустафы Кемала, факультет рыболовства (Турция), которыми было проведено сравнение приблизительных составов и профилей жирных кислот пресноводных мидий *Unio terminalis* и *Potamida littoralis* [3]. Резюмируя, авторы подчёркивают, что оба этих вида являются хорошими источниками ЭПК и ДГК и таким образом, пресноводные мидии *U. terminalis* и *P. littoralis* чуть ли не идеально подходят для производства различных биологически активных пищевых добавок для осуществления полноценного здорового питания. В основном мидии для сохранения в них максимального количества ценных веществ обрабатываются путем предварительного замораживания или обезвоживания [1], однако широко распространённым способом их консервирования является сушка.

Несмотря на немногочисленные исследования [4–6], посвященные мясным продуктам, близким по своим характеристикам к морепродуктам, сушка сырых мидий обычными или традиционными методами изучена недостаточно подробно. Поэтой причине данное исследование будет иметь определенную ценность, т. к. новые данные всегда способствуют прогрессу в данном направлении.

Объект и методы исследования

В качестве объекта исследования были выбраны ракушки-перловицы, как наиболее часто встречающийся в Астраханской области вид пресноводных двустворчатых моллюсков, которые также имеют широкое распространение в водоёмах Европы и Азии.

Целью данного исследования является оценка сорбционных свойств мяса речной ракушки-перловицы используя термогравиметрический метод, при котором регистрируется изменение массы навески образца при постоянстве температуры. Метод основан на опреде-

лении скорости высушивания образца при постоянной температуре, которую рекомендуется устанавливать для пищевых продуктов на уровне 100...105 °С [7, 8]. Следует отметить, что при рациональных и контролируемых условиях обезвоживания, реализуемых в специально предназначенных для этих целей влагомерах, граница между областью постоянной скорости высушивания и областью, где эта скорость снижается, характеризует связанную влагу.

Термогравиметрический метод является стандартным для определения влажности пищевых продуктов и данный температурный диапазон выбран, поскольку в его основе лежит высушивание образца до постоянной массы, при которой сухой остаток навески еще некоторое время не вступает в окислительную реакцию с кислородом, что позволяет с хорошей точностью оценить процент удаленной влаги из объекта исследования. Более высокие температуры ускоряют процесс окисления, и образец имея остаточную влажность, может просто сгореть, а влага испариться, при более низких температурах максимально возможное удаление влаги из образца практически невозможно, ввиду обнуления движущей силы влаготереноса, т. е. достижения в навески равновесной влажности.

Результаты исследования и их обсуждение

Свежеприобретенные ракушки-перловицы были высушены традиционным способом с использованием влагомера МХ-50 при температуре 105 °С с целью проведения анализа кинетики процесса их обезвоживания, которое позволит в дальнейшем подобрать рациональные режимы сушки при условии понимания соотношения в сырье свободной и связанной влаги.

Используемый в экспериментах измеритель влажности пищевых сред МХ-50 предназначен для оценивания наличия массовой доли воды в различных по своей структуре материалах, в том числе и для исследуемого мяса гидробионта. Данный влагомер может применяться в сельском хозяйстве, на предприятиях и научно-производственных лабораториях предприятий различных областей промышленности. В данном анализаторе реализован принцип термогравиметрического анализа, при котором происходит высушивание образца с помощью галогеновой лампы и определение содержания влаги (в %), а также других значений, вычисляемых на основе разности между влажным и сухим весом [9]. Предварительное удаление влаги из объекта исследования показало, что влажность мяса свежеприобретенной ракушки-перловицы составляет 53 %.

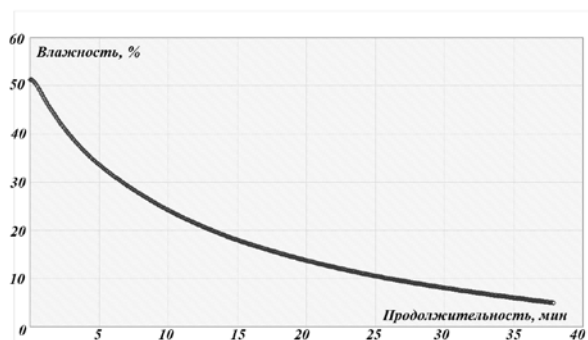


Рисунок 2 – Кривая сушки мяса ракушки-перловицы

На рисунке 2 представлен усредненный результат экспериментального исследования влагоудаления из мяса ракушки-перловицы в виде графически построенной кривой сушки по полученным средним данным изменения массы образца. Из кривой сушки, представленной на рисунке 2, следует, что продолжительность обезвоживания исследуемого мяса составляет порядка 40 мин до достижения конечной влажности у образца 5 %. Анализ кинетики процесса обезвоживания изучаемого образца проводился из результатов дифференцирования кривой сушки, т.к. необходимо было оценить изменение скорости проводимого процесса, которое находится в зависимости от вида связи влаги сухим остатком пищевого материала.

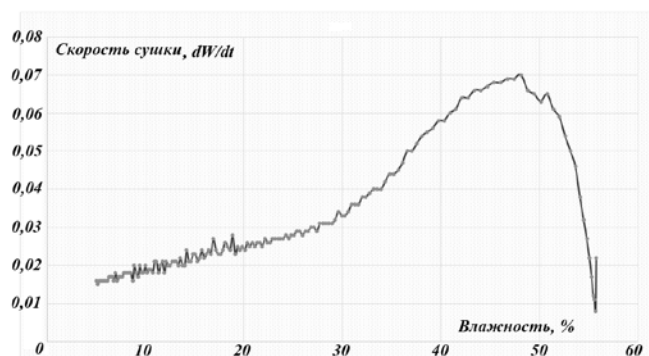


Рисунок 3 – Кривая скорости сушки мяса ракушки-перловицы

На рисунке 3 представлена графическая зависимость скорости сушки от влажности образца, уменьшающаяся при его обезвоживании.

Из кривой скорости сушки, представленной на рисунке 3, следует, что данный показатель быстро растет до достижения влажности в образце 48 %, вследствие прогрева материала до заданной температуры обезвоживания, а затем монотонно снижается до точки перегиба, которая соответствует значению влажности 30 %. Далее скорость процесса также монотонно снижается, однако темп ее снижения другой, что связано, очевидно, с видом взаимодействия влаги с сухим остатком. На рисунке 4 эти участки четко обозначены.



Рисунок 4 – Участки превалирования одного вида связи влаги над другим

Из анализа кривой скорости сушки (рисунок 4), следует, что на ней практически отсутствует участок постоянной скорости сушки, который и должен указывать на долю легкоудаляемой влаги в общем влагосодержании. Однако, как следует из этого же графика, присутствует точная граница раздела темпа снижения скорости сушки, что указывает на превалирование того или иного вида связи сухого остатка пищевого материала с влагой, находящейся в нем. В этом случае более пологий участок кривой скорости сушки указывает на превалирование свободной влаги, а более крутой – связанной. В итоге, при общей влажности исследуемого образца, равной 53 %, доля свободной влаги в нем составляет 43%, а связанной, соответственно – 57 %.

Заключение

Таким образом, с определенной для инженерных расчетов точности, можно утверждать, что гигроскопические свойства у изучаемого образца, имеющего общую влажность 53 %, проявляются до достижения в нем влажности 30 %, далее сорбцию влаги исследуемый продукт, при данных условиях проведения процесса, осуществлять не будет, т. к. будет достигнуто состояние термодинамического равновесия. Наличие такого процента связанной влаги в продукте предполагает низкую эффективность при использовании «щадящих» режимов влагоудаления традиционными способами, в связи с чем необходимо проведение дополнительных исследований, результатом которых должен стать рациональный подход к сушке такого перспективного сырья, как мясо ракушки-перловицы, имеющего высокую биологическую ценность.

Библиографический список

1. **Kipcak A.S. et al.** Drying characteristics of blue mussels by traditional methods: Original scientific paper // Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly. 2021. Т. 27. № 3. С. 279–288.
2. Речные мидии: можно ли есть этих и других обитателей [Электронный ресурс]. URL: <https://znay.co/203-rechnye-midii-mozhno-li-est.html>.
3. **Ersoy B., Şereflisan H.** The proximate composition and fatty acid profiles of edible parts of two freshwater mussels // Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2010. Т. 10. № 1.
4. **Simal S. et al.** Simulation of the drying curves of a meat-based product: effect of the external resistance to mass transfer // Journal of Food Engineering. 2003. Т. 58. № 2. С. 193–199.
5. **Ayanwale B. A., Ocheme O. B., OOO.** The Effect of Sun-Drying and Oven-Drying on the // Pakistan Journal of Nutrition. 2007. Т. 6, № 4. С. 370–374.
6. **Nathakaranakule A., Kraiwanichkul W., Soponronnarit S.** Comparative study of different combined superheated-steam drying techniques for chicken meat // Journal of Food Engineering. 2007. Т. 80. № 4. С. 1023–1030.
7. **Медведевских М. Ю. и др.** Определение влажности пищевых продуктов с помощью инфракрасных термогравиметрических влагомеров // Технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. 2017. С. 262.
8. **Сергеева А. С., Московкин Д. Л.** Применение инфракрасных термогравиметрических влагомеров для измерения влажности пищевых продуктов // Пищевая промышленность. 2013. № 10. С. 14–16.
9. MX-50 влагомер весовой (анализатор влажности) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.electronpribor.ru/catalog/974/mx-50.html>.

Научное издание

Восьмая Международная научно-практическая конференция

**«СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕПЛОВЫЕ
И МАССООБМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
(СУШКА, ТЕПЛОВЫЕ И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ)
СЭТМТ – 2023»**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Оригинал-макет *Светлана Минченко*

Дизайн обложки *Роман Бурак*

Материалы издаются в авторской редакции
Подписано в печать 10.10.2023. Формат 60×84/8.
Усл.-печ. л. 42,5 Тираж 100 экз. Заказ № 67

ООО «Мегаполис»
Тел.: +7 (499) 391-34-54
E-mail: mmegapolis@zakaz-yandex.ru
127550, Москва, ул. Прянишникова, д. 23А

Отпечатано в ПАО «Т8 Издательские Технологии»
Тел.: +7 (499) 322-38-31
109316, Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5