

На правах рукописи



ГАВРИЛОВ АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ

**НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ
ОБРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО СЫРЬЯ**

Специальность 4.3.3 – Пищевые системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ялта – 2025

Диссертационная работа выполнена в Институте «Агротехнологическая академия» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского) (г. Симферополь).

- Научный консультант** **Гербер Юрий Борисович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Института «Агротехнологическая академия» ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»
- Официальные оппоненты** **Бредихин Сергей Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, Почётный работник сферы образования РФ, профессор кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева»;
Остриков Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой процессы и аппараты химических и пищевых производств ФГБОУ ВПО Воронежского государственного университета инженерных технологий;
Казарцев Дмитрий Анатольевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии виноделия, бро-дильных производств и химии им. Г.Г. Агабальянца Московского государственного университета технологий и управления им. К.Г. Разумовского.
- Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государствен-ный морской технологический университет»

Защита диссертации состоится «15» июля 2025 г. в 10:00 часов на заседа-нии диссертационного совета 24.1.018.01 Федерального государственного бюд-жетного учреждения науки «Всероссийский национальный научно-исследо-вательский институт виноградарства и виноделия «Магарах» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по адресу: 298600, Рос-сийская федерация, Республика Крым, г. Ялта, ул. Кирова, д. 31, E-mail: dis@magarach-institut.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «НИЦ «Курча-товский институт» – «Магарах» по адресу: 298600, Российская федерация, Рес-публика Крым, г. Ялта, ул. Кирова, д. 31; адрес сайта <http://magarach-institut.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью органи-зации, с указанием почтового адреса, телефона, электронной почты, сайта органи-зации, фамилии, имени, отчества, должности лица, подготовившего отзыв, про-сим направить учёному секретарю диссертационного совета по адресу: 298600, Российская Федерация, Республика Крым, г. Ялта, ул. Кирова, д. 31; тел./факс +7(3654) 23-40-96; E-mail: dis@magarach-institut.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
 доктор технических наук, доцент



Аникина Надежда Станиславовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Приоритетным направлением конкурентоспособного развития пищевой и перерабатывающей промышленности в России и в мире является повышение качества пищевых продуктов, экологической безопасности предприятий при существенном снижении энергоемкости технологий. В современной экологической обстановке при существующих эпидемиологических угрозах неперенным условием здоровья человека является сбалансированное питание, обеспечивающее организм витаминами и микроэлементами. Одними из важнейших источников этих веществ являются овощи и фрукты. Однако круглогодичное потребление такой продукции в свежем виде недоступно для значительной части населения ввиду ограниченности региона их произрастания, сезонности производства, сложности хранения и транспортировки. Альтернативой свежему сельскохозяйственному сырью являются пищевые концентраты, сушёные овощи и фрукты, которые обеспечивают широкий спектр микроэлементов, хорошо подходящих для здорового питания. Однако, современные технологии обезвоживания характеризуются существенными энергозатратами наряду с длительной термической нагрузкой на пищевое сырьё, что приводит к резкому снижению его пищевой ценности. Так, технология выпаривания реализует процесс теплопередачи, существенным недостатком которого является рост толщины пограничного слоя и его термического сопротивления при повышении степени концентрирования продукта. В следствие этого на производстве ограничиваются конечной концентрацией до 70 % сухих веществ. Классические методы сушки – конвективная, контактная, распылительная – основаны на использовании сушильного агента, значительная часть энергетического потенциала которого выбрасывается вместе с отработавшим теплоносителем. При этом, в российской промышленности, в основном, используется импортное оборудование.

Импорт в Россию сушеных фруктов и овощей из стран: КНР, Узбекистан, Иран, Турция, Чили составлял в 2023-2024 гг. около 40 %. Импорт на рынок сушеных овощей, фруктов и ягод в России превышает экспорт в стоимостном выражении почти в 40 раз. Таким образом, повышение ресурсо- и энергоэффективности технологий обезвоживания фруктового, овощного сырья и производства концентрированных продуктов является актуальной задачей и вносит существенный вклад в программу импортозамещения. Совершенствование наиболее энергоёмких процессов выпаривания и сушки при производстве указанных продуктов должно осуществляться за счет внедрения действенной системы энергоменеджмента и разработки энергоэффективного оборудования для тепловой обработки сельскохозяйственного сырья.

Степень разработанности темы. Большой вклад в совершенствование существующих технологий обезвоживания продуктов сделали отечественные и зарубежные ученые: Лыков А.В., Гинзбург А.С., Гришин М.А., Красников В.В., Рудобашта С.П., Бредихин С.А., Антипов С.Т., Остриков А.Н., Гербер Ю.Б., Завалий А.А., Казарцев Д.А., AS Mujumdar, S. Devahastin, T. Kudra, Bejan A., Fu Y.-J. Благодаря их исследованиям были усовершенствованы традиционные процессы сушки, экстрагирования, концентрирования и другие тепловые про-

цессов переработки сельскохозяйственного сырья. Однако растущие требования к качеству пищевой продукции и экономичности ее производства требуют дальнейшего поиска более эффективных энергосберегающих технологий сушки. Перспективным направлением является решение задачи адресной доставки энергии к полярным молекулам сырья. При этом структура овощей и фруктов предполагает эффективное использование комбинированных электромагнитных источников энергии (ЭМП) инфракрасных (ИК) и микроволновых (СВЧ) диапазонов, что подтверждается в работах Рудобашты С.П., Григорьева И.В., Острикова А.Н., Бурдо О.Г. и др.

Цель исследований: теоретическое обоснование и разработка энергоэффективных технологий и оборудования для обезвоживания сельскохозяйственного сырья.

Научная гипотеза исследований: снижение энергозатрат при сушке и выпаривании сельскохозяйственного сырья и повышение качества пищевых продуктов за счет разработки технологий и создания оборудования, реализующих адресную доставку энергии к полярным молекулам сырья и комбинированное электромагнитное воздействие СВЧ и ИК диапазонов.

Задачи:

1. Теоретически и экспериментально обосновать методологию обезвоживания сельскохозяйственного сырья путем адресной доставки энергии к полярным молекулам с использованием электромагнитных источников энергии СВЧ и ИК диапазонов.

2. Разработать и математически описать теоретические модели процессов выпаривания с помощью микроволновых источников энергии и сушки при комбинированной СВЧ и ИК обработке.

3. Получить экспериментальные модели, описывающие процессы обезвоживания сельскохозяйственного сырья в ЭМП в зависимости от режимов и параметров технологий выпаривания и сушки.

4. Разработать алгоритмы инженерных расчетов и технические задания на установки непрерывного действия: комбинированную СВЧ-ИК сушилку ленточного типа и микроволновой вакуум-выпарной установки модульного типа.

5. Создать пилотные модели установок и разработать технологии для обезвоживания сельскохозяйственного сырья.

6. Провести опытно-промышленную проверку разработанных режимов и параметров технологий обезвоживания в ЭМП с применением инновационного оборудования.

7. Провести технико-экономическую оценку режимов и параметров технологий обезвоживания сырья в ЭМП с применением инновационного оборудования.

Научная новизна. Установлено влияние комбинированного электромагнитного воздействия СВЧ и ИК диапазонов на процесс обезвоживания сельскохозяйственного сырья, что сформировало научные основы для создания энергоэффективного оборудования для сушки пищевого сырья.

Научно обосновано комбинированное воздействие ЭМП СВЧ и ИК диапазонов на процесс обезвоживания сельскохозяйственного сырья, совокупное действие которых усиливает теплопередачу за счёт разных движущих сил: ба-

родиффузионных – для снижения внутреннего диффузионного сопротивления и конвективных – для удаления влаги с поверхностного слоя сырья.

Определено влияние бародиффузии и конвекции на эффективность удаления влаги из сельскохозяйственного сырья. Обоснован процесс бародиффузии при подводе энергии ЭМП СВЧ диапазона к полярным молекулам сырья, движущей силой которого является разность давления внутри капилляра сырья. Установлено уменьшение теплоты фазового перехода жидкости в пар при отсутствии градиента влагосодержания.

Научно обоснована адресная доставка энергии к полярным молекулам сырья в процессе выпаривания, при котором нет пограничного слоя, теплопередачи, и существенно повышается конечная концентрация готового продукта до 95 % сухих веществ.

Получены экспериментальные модели, позволяющие проектировать и оптимизировать установки для производства высококачественных концентратов жидких пищевых систем, для сушки продуктов в технологиях обезвоживания сельскохозяйственного сырья.

Новизна предложенных технических решений технологии и машин подтверждены патентами на полезные модели. Устройство микроволновой вакуум-выпарной установки непрерывного действия (патент №213932) и устройство комбинированной СВЧ-ИК сушки для обезвоживания растительного сырья (патент № 214723).

Теоретическая и практическая значимость. Теоретически обоснована кинетика и энергетика процесса сушки сельскохозяйственного сырья в ЭМП СВЧ-ИК диапазонов.

Создана методология оптимизации оборудования для процессов выпаривания и сушки; обоснована система энергетического менеджмента технологического процесса и разработаны:

- технология выпаривания при низкой температуре (до 40 °С) жидких пищевых продуктов, которая позволяет получать готовую продукцию высокой концентрации (до 95 % сухих веществ);

- технология сушки сельскохозяйственного сырья различных видов до влажности продукта 11-17 % при температуре – 40-60 °С с использованием ЭМП в комбинированном СВЧ и ИК диапазоне и ускоряющая процесс в 2,2 раза.

Разработаны алгоритмы инженерных расчетов оборудования непрерывного действия: комбинированной СВЧ-ИК сушилки ленточного типа и микроволновой вакуум-выпарной установки модульного типа.

Разработаны технические задания на изготовление:

- сверхвысокочастотной вакуум-выпарной установки непрерывного действия производительностью 20 кг/ч СВЧ ВВУ-20;

- комбинированной ленточной сверхвысокочастотно-инфракрасной сушильной установки производительностью 100 кг/ч СВЧ-ИК СУ-100.

Разработанные режимы и параметры технологии с применением инновационного оборудования прошли опытно-промышленную проверку:

- микроволновая вакуум-выпарная установка в ООО «ЮГ-МОЛОКО» (2022 г), ООО «ДК «Мегатрейд-Юг» (2023 г): объем готовой продукции – 81,4 кг с концентрацией сухих веществ 26-33%;

– комбинированная ленточная СВЧ-ИК сушильная установка в ИП КФХ «Шаботенко А.А.» (2022 г.), ООО «Сады Бахчисарая», АО «Крымская фруктовая компания», ООО «Борис-Агро» (2023 г): объем готовой продукции – 10,7 кг с влажностью 12-14 %.

По результатам испытаний представленные разработки рекомендованы к внедрению.

Результаты исследований используются Министерством сельского хозяйства республики Крым при подборе оптимальных энергоэффективных технологий переработки сельскохозяйственного сырья на пищевых предприятиях.

Методология и методы исследования. Методология исследований включала аналитическое и экспериментальное моделирование процессов обезвоживания сельскохозяйственного сырья, проведение инженерных расчетов и создание пилотных установок, оптимизацию технологических режимов сушки и выпаривания, производственную апробацию достигнутых результатов. В работе использованы следующие методы исследования: методы анализа и синтеза для рассмотрения литературных источников и обобщение результатов их анализа, методы системного анализа для оценки эффективности энерготехнологий и их усовершенствования; методы планирования эксперимента, теория подобия, методы теплофизического моделирования, регрессионный анализ для проведения экспериментальных исследований с использованием контрольно-измерительной аппаратуры и обобщения результатов исследований, методы энергетического аудита и менеджмента, математическое моделирование с использованием компьютерной техники и прикладных программных пакетов (Microsoft Excel, Matlab, Mathcad); для решения дифференциальных уравнений использовались аналитические методы.

Положения, выносимые на защиту

1. Научные основы обезвоживания сельскохозяйственного сырья путем адресной доставки энергии к полярным молекулам с использованием электромагнитных источников энергии СВЧ и ИК диапазонов.

2. Режимы и параметры технологий выпаривания и сушки в ЭМП СВЧ и ИК диапазонов.

3. Принципы создания и оптимизации унифицированного энергоэффективного оборудования непрерывного действия с электромагнитными источниками энергии для обезвоживания различных видов сырья.

Личное участие соискателя. Основные результаты, обобщения и выводы, приведенные в диссертационной работе, получены автором лично. Соискателем осуществлено научное обоснование, формулировка проблемы, задач и программы исследований, разработана методика их проведения.

Автор лично и по согласованию с научным консультантом формулировал научные положения и концепции научных исследований, планировал проведение лабораторных и производственных исследований, лично провёл энергетический аудит винзавода и молокозавода. Самостоятельно обобщил результаты этих исследований и предложил основы теории тепломассопереноса в процессах обезвоживания в условиях перерабатывающих предприятий.

Автором разработаны теоретические модели процессов обезвоживания сельскохозяйственного сырья путем адресной доставки энергии к полярным молекулам в ЭМП, проведены экспериментальные исследования, разработаны

алгоритмы инженерных расчетов и оптимизации оборудования, проведена производственная апробация режимов и параметров технологии выпаривания и сушки с применением инновационного оборудования, проведена технико-экономическая оценка и предложены рекомендации производству и научно-образовательному процессу, опубликованы научные статьи. Личное участие соискателя в публикациях составляет около 85 %.

Степень достоверности и апробация результатов. Степень достоверности результатов подтверждается проработкой современной литературы по поставленной проблеме, в том числе статей, входящих в международные базы цитирования WoS и Scopus, а также публикацией основных положений работы в журналах международного уровня.

Результаты исследований регулярно докладывались на заседаниях кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Института «Агротехнологическая академия» ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского», а также освещались на 11 конференциях:

– международных: Одесса, 2019; Ростов, 2019; INTERAGROMASH, 2020; «E3S Web of Conferences, TRACEE-2021»; Москва, 2021; Минск, 2022; Санкт-Петербург, 2023; Ялта, 2023; Ялта, 2024;

– всероссийских конференциях, организованных ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»: Симферополь, 2018 и 2019 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 печатных работ, из них 20 в научных изданиях, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ по категориям К1 и К2, 2 патента РФ на полезную модель, 2 учебных пособия.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка использованных источников и приложений. Диссертационная работа изложена на 466 страницах машинописного текста, содержит 70 таблиц, 196 рисунков и 14 приложений. Список литературы насчитывает 411 наименований, в том числе 281 иностранных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснован выбор темы диссертационной работы и ее актуальность, сформулированы цели и задачи исследований, определены научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Показаны результаты апробаций и личный вклад соискателя в проведенных исследованиях и публикациях.

Раздел 1 Анализ существующего состояния и перспективных направлений совершенствования технологий и оборудования для тепловой обработки сырья

Анализ энергоэффективности технологий и оборудования для обезвоживания сельскохозяйственного сырья проведен на основании литературных сведений и собственного аудита действующих пищевых предприятий. Показано, что наиболее распространёнными являются технологии выпаривания и сушки, реализуемые на энергозатратных установках периодического действия с низкой

производительностью, высокими температурами обработки, не позволяющим получать продукт без ухудшения качества. Установлено, что одним из наиболее перспективных направлений усовершенствования технологий обезвоживания является использование электромагнитных источников энергии СВЧ и ИК диапазона. На основании обобщения результатов анализа сформулированы научная гипотеза, цель и поставлены задачи работы.

Раздел 2 Методика и методы исследований

Исследования проводились в соответствии с программой кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Института «Агротехнологическая академия» ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского» – «Научные основы и инновационные решения в механизации и роботизации производства и технологиях переработки сельскохозяйственной продукции».

Методика исследований включала теоретические и экспериментальные этапы, последовательность реализации которых представлена на рисунке 1.

Объектами исследований являлись тепломассообменные процессы и оборудование для обезвоживания (сушка и выпаривание) сельскохозяйственного сырья в ЭМП.

Материалами исследований были овощи (морковь, лук, картофель, свекла), фрукты (яблоки), виноград, фруктовые соки, твёрдые отходы переработки растительного пищевого сырья (виноградные семена, корни мискантуса). Выбор сельскохозяйственного сырья обусловлен высокой начальной влажностью и ограничением допустимой температуры нагрева.

Методика проведения энергетического менеджмента основана на учете потери энергии в критических точках технологической цепочки «первичное топливо – его трансформации в соответствующий вид энергии – распределительная сеть – потребитель» и определении доли полезной энергии от общих энергозатрат (рисунок 2).

Для выполнения комплексных экспериментальных исследований процессов концентрирования пищевых растворов в условиях микроволнового энергоподвода разработан специальный стенд (рисунок 3).

Основными узлами которого являются: выпарная камера, конденсатор, водоохладитель, сборник конденсата, вакуум-насос и измерительно-вычислительный комплекс.

Объёмы выпарной камеры и конденсатора соединены паропроводом, контроль вакуума в системе проводился сертифицированным вакуумметром. Подвод электромагнитной энергии осуществлялся блоком силовой электроники. Водоохладитель состоит из паровой компрессорной холодильной машины, ёмкости с охлаждаемой водой, регулятора температуры воды и циркуляционного насоса, который обеспечивает подачу холодной воды в конденсатор.

Текущая информация от электронных весов (датчик Д1), измерителя температуры пара на выходе (датчик Д2) и продукта в выпарной камере через интерфейс поступали в ИВК. В стенде использовались электронные весы, которые регистрировали вес конденсата в сборнике. Таким образом, с высокой точностью определялся выход пара.



Рисунок 1 – Методика научных исследований процессов обезвоживания в ЭМП

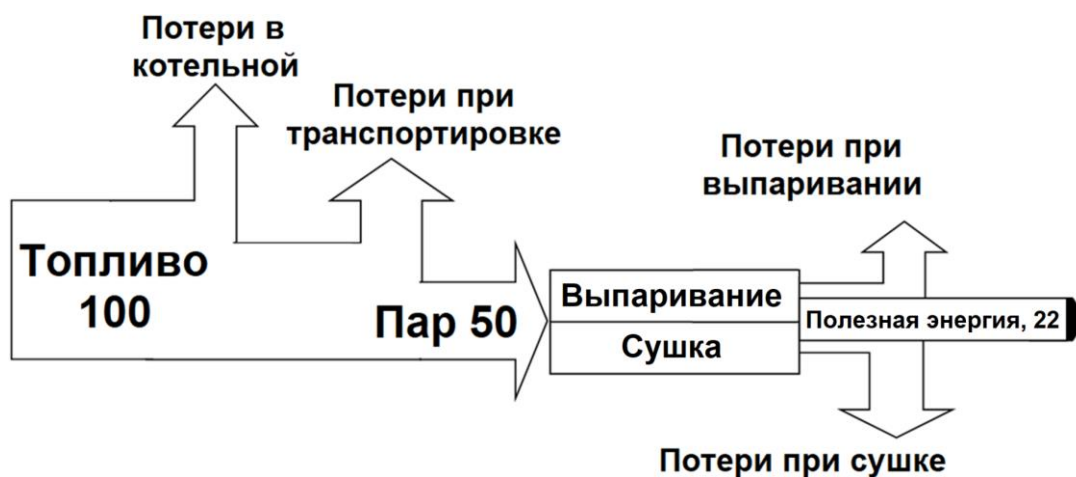


Рисунок 2 – Схема конверсии энергии в традиционной технологии обезвоживания

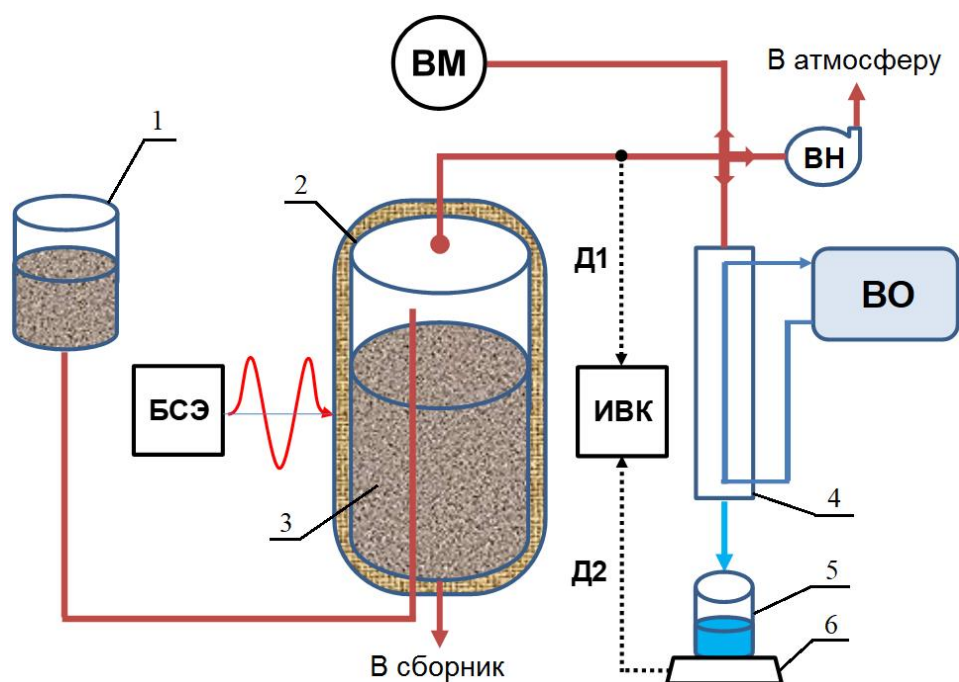


Рисунок 3 – Схема экспериментального стенда для исследования СВЧ вакуум-выпарной установки: 1 – емкость исходного продукта, 2 – реакционный объем, 3 – продукт, 4 – конденсатор, 5 – сборник конденсата, 6 – весы, ВМ – вакуумметр, ВН – вакуум-насос, ВО – водоохладитель, БСЭ – блок силовой электроники, ИВК – измерительно-вычислительный комплекс, Д1 – сигнал датчика температуры пара, Д2 – сигнал электронных весов

Для проведения экспериментальных исследований процесса сушки разработаны опытные установки периодического действия с использованием ЭМП с ИК или СВЧ диапазонов.

Экспериментальный стенд (рисунок 4) состоит из сушильной камеры 1, в которой размещается кассета 7 с растительным сырьем 6.

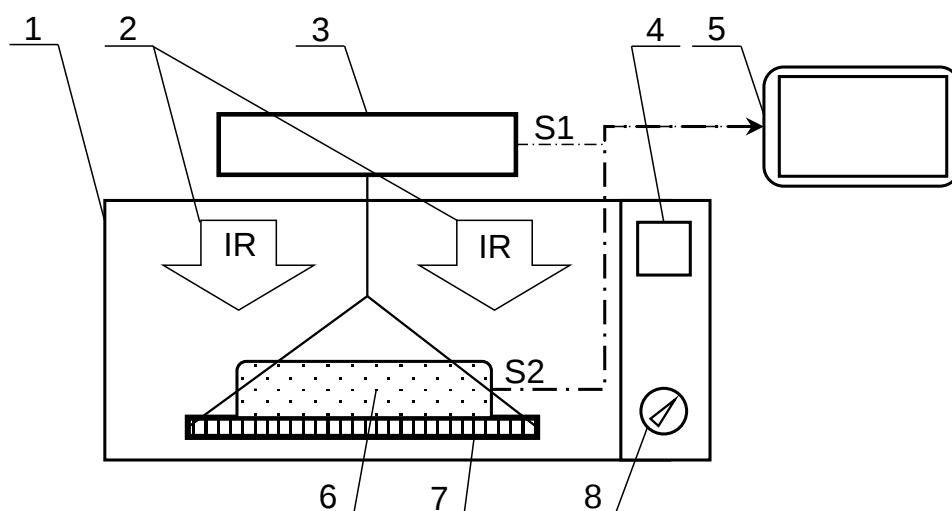


Рисунок 4 – Схема экспериментальной сушилки с ИК или СВЧ генераторами: 1 – сушильная камера; 2 – генераторы; 3 – электронные весы; 4 – табло времени; 5 – система сбора и обработки данных; 6 – растительное сырье; 7 – кассета; 8 – регулятор мощности ИК генераторов; S1 – сигнал по электронным весам; S2 – сигнал датчика температуры

Мощность ИК генераторов 2 устанавливается регулятором 8, продолжительность работы отображается на аналоговом датчике 4. Регистрация изменения веса происходит на электронных весах 3. Посредством планшета 5 и контроллера (Arduino Nano) была реализована система автоматизированного сбора и обработки данных, поступающих от электронных весов S1 и датчика температуры S2 (Dallas DS18B20). В результате на экране отображались термограмма, Линии сушки и скорости сушки. Количество потребленной установкой электроэнергии регистрировалось с помощью энергомера.

В разделе представлены стандартизированные методики определения ключевых параметров, оказывающих влияние на характер и скорость протекания процессов обезвоживания в условиях воздействия электромагнитного излучения: влажности исходного сырья; концентрации сухих веществ жидких систем; теплофизических свойств продуктов; коэффициента массоотдачи; мощности электромагнитного поля и утечки микроволновой энергии; скорости движения ленты и степени её загрузки; качественных характеристик продуктов, полученных при сушке и выпаривании в электромагнитном поле, с использованием высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ).

Математическое моделирование и обработку экспериментальных данных проводили с использованием компьютерной техники и прикладных программных пакетов (Microsoft Excel, Matlab, Mathcad); для решения дифференциальных уравнений использовались аналитические методы; обобщение полученных результатов осуществляли методами теории подобия, в результате получены модели, позволяющие проектировать и оптимизировать установки для обезвоживания. Объем выборки находится в диапазоне 100-250 точек по каждому продукту, проверка адекватности показывает, что предложенные модели с погрешностью не более 8-10 % описывают кинетику и энергетику процессов обезвоживания.

Раздел 3 Теоретическое обоснование технологий обезвоживания сырья путем адресной доставки энергии к полярным молекулам с использованием электромагнитных источников энергии СВЧ и ИК диапазонов

На первом этапе было проведено аналитическое моделирование процесса выпаривания в ЭМП, в результате которого методами теории подобия была разработана теоретическая модель процесса выпаривания сельскохозяйственного сырья с помощью СВЧ источников энергии, определяющая зависимость числа энергетического воздействия (Bu) от параметрических комплексов безразмерного давления (P) – отношение текущего давления в аппарате к базовому (5 кПа) и безразмерной теплоты парообразования (R) – отношение удельных значений теплоты фазового перехода исследуемого раствора к теплоте парообразования (525 кДж/кг).

В случае если влага удаляется из сплошной жидкой среды, как например, при выпаривании, то физическая модель аппарата, которая является постановкой задачи формирования математической модели, имеет следующий вид: основные физические процессы протекают в рабочем объеме, где находится раствор, на который осуществляется энергетическое воздействие от источника электромагнитной энергии мощностью N (рисунок 5).

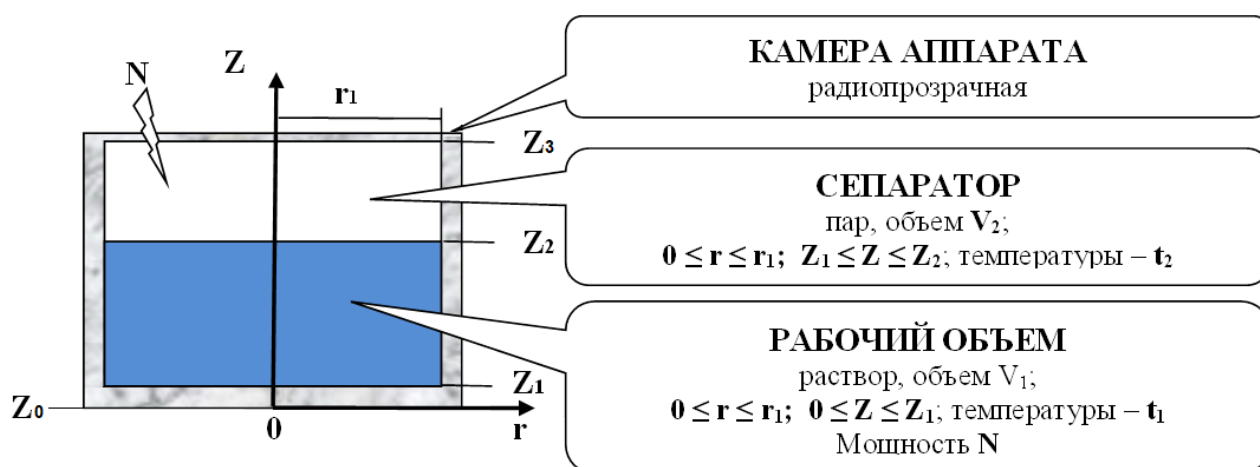


Рисунок 5 – Схема физической модели процесса выпаривания

Энергия поступает через радиопрозрачный корпус. Характер подвода энергии – объемный. В сепараторе происходит механическое отделение капель раствора (если они туда попали) от пара. Поглощения энергии в объеме сепаратора нет. Третья зона – это радиопрозрачный корпус аппарата (реакционный объем).

Реализация модели с использованием уравнений Навье-Стокса оказывается сложной и для получения инженерной методики расчетов использованы методы теории подобия. Для таких специфических условий выпаривания в СВЧ поле предлагаются следующие основные параметры процесса: удельная теплота парообразования, мощность микроволнового поля, давление, паропроизводительность, скорость движения продукта. Тогда, согласно π -теореме (метода анализа размерностей), число безразмерных комплексов, описывающих процесс, должно быть равно 2.

$$\frac{Wv}{P} = A \left(\frac{N}{Wr} \right)^m, \quad (1)$$

где W – паропроизводительность, кг/с;

v – скорость движения продукта, м/с;

P – давление, Па;

N – мощность микроволнового поля, Вт;

r – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Первый безразмерный комплекс является новым и имеет технологический характер. Он показывает соотношение инерционных сил раствора и статических сил в аппарате. Второй комплекс – число энергетического воздействия (число Bu), которое обобщает результаты экспериментального моделирования процессов массопереноса в микроволновом поле.

Физический смысл числа Bu представляет соотношение величины затраченной электромагнитной энергии и энергии базового процесса. За базовую энергию принята энергия, которая характерна для традиционной технологии.

В практических задачах может быть использована и другая комбинация безразмерных комплексов:

$$Bu = A \cdot P^n \cdot R^m, \quad (2)$$

где P – отношение текущего давления в аппарате к базовому (5 кПа);

R – отношение удельных значений теплоты фазового перехода исследуемого раствора к теплоте парообразования ацетона (525 кДж/кг).

Техническая идея предлагаемой установки для сушки в условиях ЭМП СВЧ-ИК диапазонами сформулирована следующей гипотезой: комбинированное, последовательное воздействие на влажный продукт электромагнитными полями разной частоты позволит инициировать поток влаги из объема сырья за счёт действия разных движущих сил: бародиффузионных (обеспечивающих снижение внутреннего диффузионного сопротивления), и конвективных (обеспечивающих удаление влаги с поверхности сырья). Объемный подвод энергии можно осуществлять микроволновыми источниками, а поверхностный – инфракрасными. В результате сократятся продолжительность процесса и величина энергетических затрат. Наибольший практический интерес представляют ленточные сушильные установки, где продукт обрабатывается в тонком подвижном слое. В случае удаления влаги из твёрдого тела этот процесс осуществляется двумя диффузионными потоками: молекулярным и молярным. Поэтому, предлагается использовать модель в обобщённых переменных, которая бы учитывала специфику задачи. Во-первых, введём параметр, который учитывает результирующий поток влаги с единицы поверхности ($\beta\epsilon$) – эффективный коэффициент массоотдачи.

С ростом N растёт значение числа Bu , растёт разность давлений, интенсифицируются выбросы из капиллярной структуры. Это приводит к росту коэффициента $\beta\epsilon$. Более того, эти выбросы турбулизируют и пограничный слой. Следовательно, число Bu может характеризовать не только степень энергетического воздействия, но и соответствующую гидравлическую ситуацию над слоем продукта. Функциональную зависимость этого коэффициента от основных параметров процесса запишем на основе параметрической модели (рисунок 6).

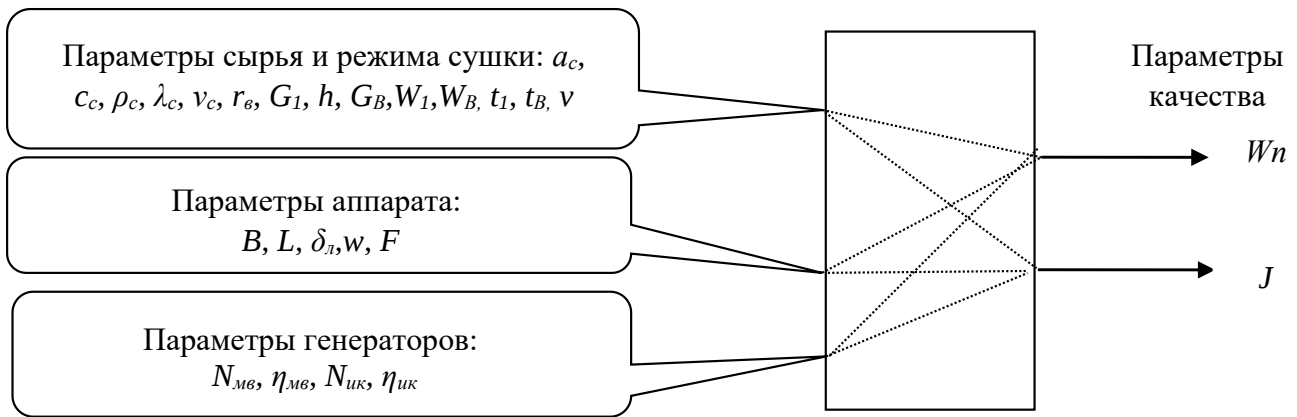


Рисунок 6 – Схема параметрической модели процесса сушки

Параметрами качества являются влагосодержание готового продукта Wn и удельные затраты энергии на сушку J , Дж/кг. Ключевыми входными параметрами сырья считаются: его расход G_1 , кг/с; влагосодержание W_1 ; температура t_1 ; толщина слоя h , теплофизические свойства ($a_c, c_c, \rho_c, \lambda_c, v_c, r_g$). Поток воздуха, проходящего последовательно через камеры сушилки, характеризуется его расходом G_B , влагосодержанием W_B , скоростью v и температурой t_B . Основными характеристиками установки являются конструктивные параметры ленты: ее ширина B , длина L , толщина δ_L ; скорость перемещения w и площадь поверхности F . Энергетические параметры установки – мощность ($N_{CBЧ}, N_{ук}$) и КПД ($\eta_{CBЧ}, \eta_{ук}$), соответственно, микроволновых и инфракрасных генераторов.

Молекулярный поток определяется скоростью потока воздуха (v), его плотностью (ρ) и вязкостью (μ); скоростью движения ленты транспортёра (w) и толщиной слоя продукта на ленте (h); движущей силой процесса, т.е. разностью концентраций (ΔX) и гравитационной константой (g). Интенсивность второго потока зависит от мощности излучения (N), удельной теплоты фазового перехода (r), плотности жидкости ($\rho_{жс}$), коэффициентом диффузии D и ширины ленты (B). В такой постановке коэффициент массоотдачи (β_ϑ) учитывает диффузионные, термические и гидравлические сопротивления, и описывается зависимостью:

$$\beta_\vartheta = f(h, B, \rho, \rho_{жс}, \mu, w, v, D, r, N, \Delta X, g) \quad (3)$$

На основе метода анализа размерностей, заменим искомую функцию зависимостью между числами подобия:

$$St_m = A \cdot (Re)^q \cdot (Gr_\delta)^g \cdot (Sc)^n \cdot (Bu)^p \cdot (Pe_\delta)^m \cdot (Ff)^k, \quad (4)$$

где St – число Стантона;

Re – число Рейнольдса;

Gr – диффузионное число Грасгофа;

Sc – число Шмидта;

Bu – число энергетического воздействия;

Pe – диффузионное число Пекле;

Ff – фактор формы.

В рамках исследуемой задачи можно пренебречь числом Грасгофа, из-за ничтожного влияния естественной конвекции. При электромагнитном подводе энергии (при ГУ II рода) воздух выполняет задачу исключительно диффузионной среды. В таких условиях большие скорости воздуха становятся, не только не нужны, а даже вредны, из-за потерь энергии с отработавшим сушильным

агентом. При низких скоростях потока воздуха показатели степени n , g и q приближаются к 0, и структура критериального уравнения упрощается:

$$St_m = A \cdot (Pe_o)^m \cdot (Bu)^p \cdot (Ff)^k \quad (5)$$

Диффузионное число Стантона эффективно отражает массообмен, когда молекулярные механизмы переноса не являются определяющими. В условиях сушки при ГУ II рода на движущейся ленте это число максимально точно подходит как безразмерная форма интенсивности массоотдачи.

Проведенный выше анализ схемы массопереноса показывает, что значение β_2 определяется инерцией потока (массоперенос в условиях свободного движения отсутствует). В этих условиях скорость движения ленты может быть принята в качестве характеристического значения коэффициента массоотдачи, и служить для него масштабом отнесения. Однако для задач сушки в электромагнитном поле при отсутствии вынужденного движения воздуха представлять интенсивность массоотдачи в безразмерной форме число Стантона не может. Необходимо использовать число Шервуда (Sh) и исключается число Пекле. Определяющую роль в сушке играет число энергетического воздействия (Bu). На первом этапе исследований обработку базы экспериментальных данных проводили при отдельном учёте влияния толщины обрабатываемого слоя, безразмерная форма которого (H) может выглядеть отношением текущей толщины h к базовому значению (например, 1 м).

Тогда:

$$Sh = A \cdot (Bu)^n \cdot (H)^m \cdot (Ff)^k \quad (6)$$

Численные значения показателей степени в уравнениях необходимо определить экспериментально.

В разделе проведено аналитическое моделирование процессов обезвоживания сельскохозяйственного сырья в ЭМП СВЧ и ИК диапазонов; разработаны физические и параметрические модели процессов; разработаны теоретические модели процессов выпаривания с помощью микроволновых источников энергии и сушки при комбинированной СВЧ и ИК обработке, базирующиеся на адресной доставке энергии к полярным молекулам сырья.

Раздел 4 Экспериментальное обоснование технологий обезвоживания в ЭМП с применением инновационного оборудования

Изучен и сделан анализ кинетики процесса сушки овощей и фруктов в ЭМП СВЧ-ИК диапазонов. Основным кинетическим показателем эффективности процесса сушки является линия скорости сушки, которая отображает массу удалённой влаги или же процент удалённой влаги в зависимости от данного отрезка времени.

Исследования проводились с продуктом в виде слайсов и соломки с толщиной 3-10 мм, диапазон подводимой мощности ИК излучения составлял 1,88-11,25 кВт/м². Типичные картины влияния исследуемых факторов на кинетику процесса сушки овощей и фруктов под действием ИК излучения представлены на рисунках 7-10. На линиях (рисунки 9, 10) исследования сушки овощей и фруктов проводились при толщине слоя 3 мм и удельной мощности излучения 6 кВт/м².

В результате математической обработки базы экспериментальных данных получены значения коэффициентов уравнения 6 (таблица 1).

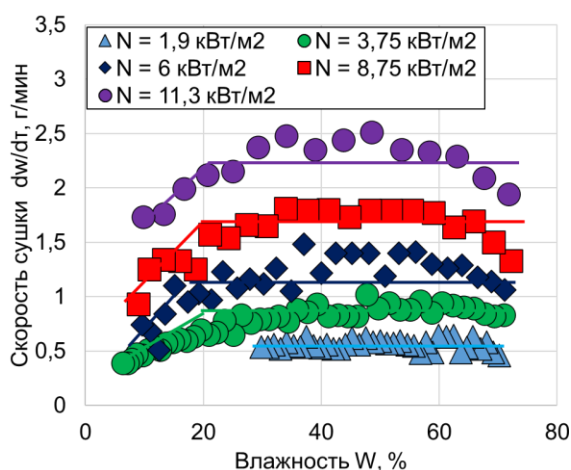


Рисунок 7 – Линии скорости сушки слайсов моркови при разной мощности ИК излучения

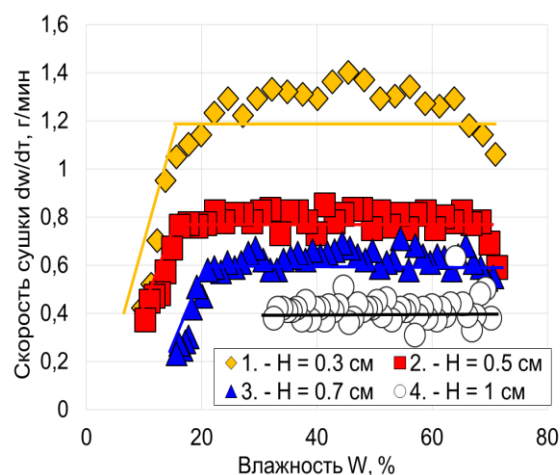


Рисунок 8 – Линии скорости сушки слайсов яблок при разной толщине слоя в ИК поле

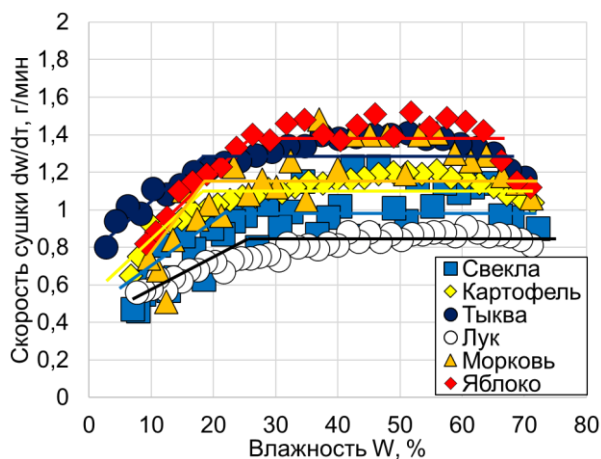


Рисунок 9 – Линии скорости сушки слайсов овощей и фруктов

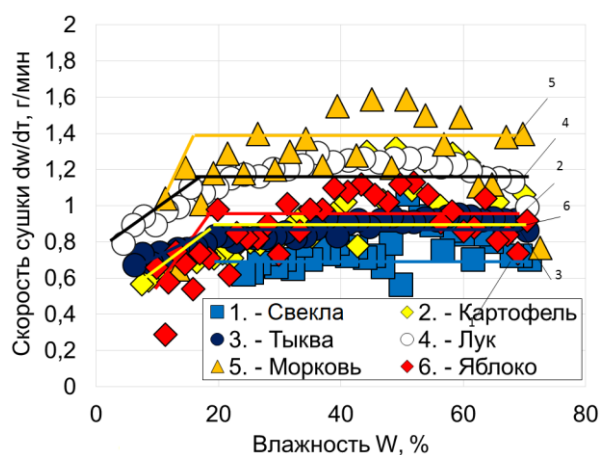


Рисунок 10 – Линии скорости сушки соломки овощей и фруктов

Таблица 1 – Значения коэффициентов уравнения 6

Сырье	Форма	n	m	k	A
Морковь	Слайсы	1,91	-1,28	-0,0037	$0,64 \cdot 10^{-7}$
	Соломка	4,64	-2,88	27,38	$42,8 \cdot 10^3$
Яблоко	Слайсы	1,91	-1,28	-0,0037	$13,6 \cdot 10^{-12}$
	Соломка	4,64	-2,88	27,38	$1,04 \cdot 10^6$
Свекла	Слайсы	1,91	-1,28	-0,0037	$2,84 \cdot 10^{-9}$
	Соломка	4,64	-2,88	27,38	$0,106 \cdot 10^6$
Лук	Слайсы	1,91	-1,28	-0,0037	$1,7 \cdot 10^{-9}$
	Соломка	4,64	-2,88	27,38	$39 \cdot 10^3$
Тыква	Слайсы	1,91	-1,28	-0,0037	$8,05 \cdot 10^{-9}$
	Соломка	4,64	-2,88	27,38	$0,8 \cdot 10^6$
Картофель	Слайсы	1,91	-1,28	-0,0037	$5,1 \cdot 10^{-9}$
	Соломка	4,64	-2,88	27,38	$0,275 \cdot 10^6$

Примечание: A , n , m и k – константы, определяемые опытным путём.

Аналогичные исследования проведены и для сушки в СВЧ поле (рисунки 11-14). На линиях (рисунки 13, 14) исследования сушки овощей и фруктов проводились при толщине слоя 3 мм и удельной мощности излучения 6 кВт/м².

Таким образом, для расчета интенсивности сушки в условиях СВЧ поля предлагается два уравнения (7, 8):

– для слайсов:

$$Sh = 7,1 \cdot 10^{-6} \cdot Bu^{7,18} \cdot H^{0,51} \quad (7)$$

– для соломки:

$$Sh = 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot Bu^{3,49} \cdot H^{0,86} \quad (8)$$

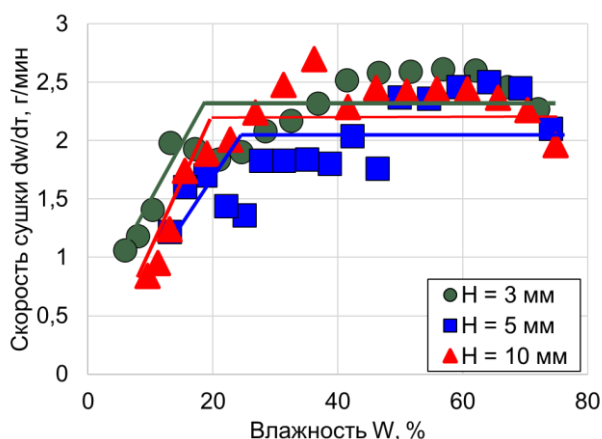


Рисунок 11 – Линии скорости сушки слайсов моркови в СВЧ поле

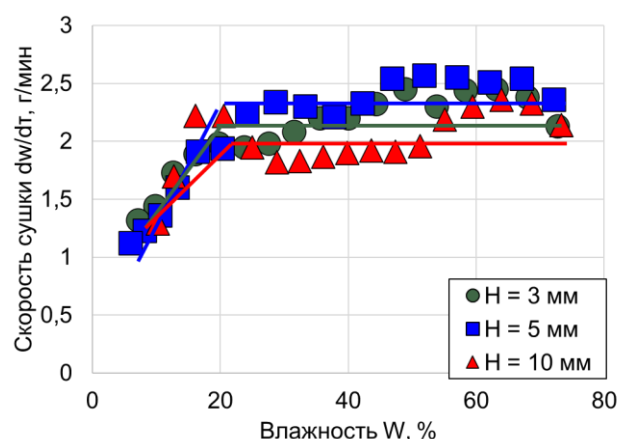


Рисунок 12 – Линии скорости сушки соломки моркови в СВЧ поле

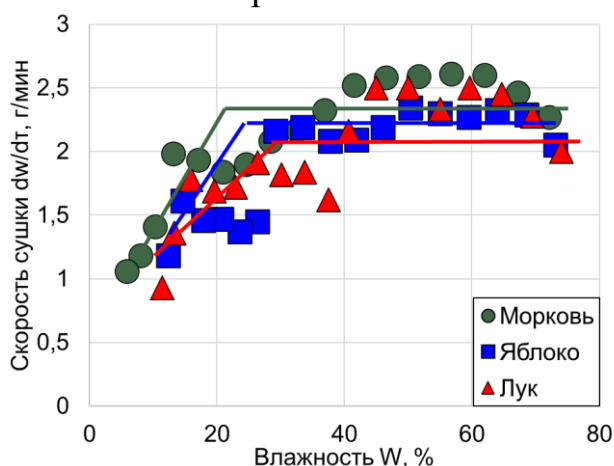


Рисунок 13 – Линии скорости сушки слайсов овощей и фруктов в СВЧ поле

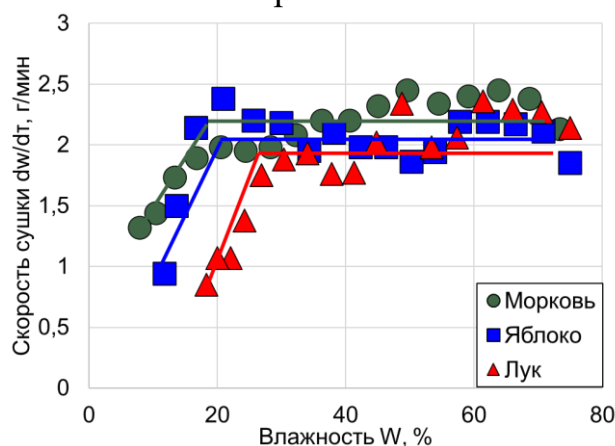


Рисунок 14 – Линии скорости сушки соломки овощей и фруктов в СВЧ поле

Слайсы и соломка были выбраны как наиболее используемые формы готового продукта.

Сравнение кинетики ИК сушки и сушки в микроволновом поле представлено на рисунке 15.

Для анализа из данных экспериментов сделана выборка для трех продуктов (яблоко, морковь, лук), которые сушились в форме слайсов. При этом, тол-

щина слоя была одинаковой, и удельная мощность излучения равнялась 6 кВт/м^2 . Разными были источники электромагнитной энергии (СВЧ и ИК).

Обосновано, что процесс сушки в СВЧ поле до влажности продукта 11-17% влаги при температуре – 40-60 °С характеризуется в 1,6 раза большей скоростью (рисунок 22, линии 1,2,3) и требует в 2,2 раза меньше времени при затрате энергии в 1,5-2 раза меньше, чем сушка в ИК поле.

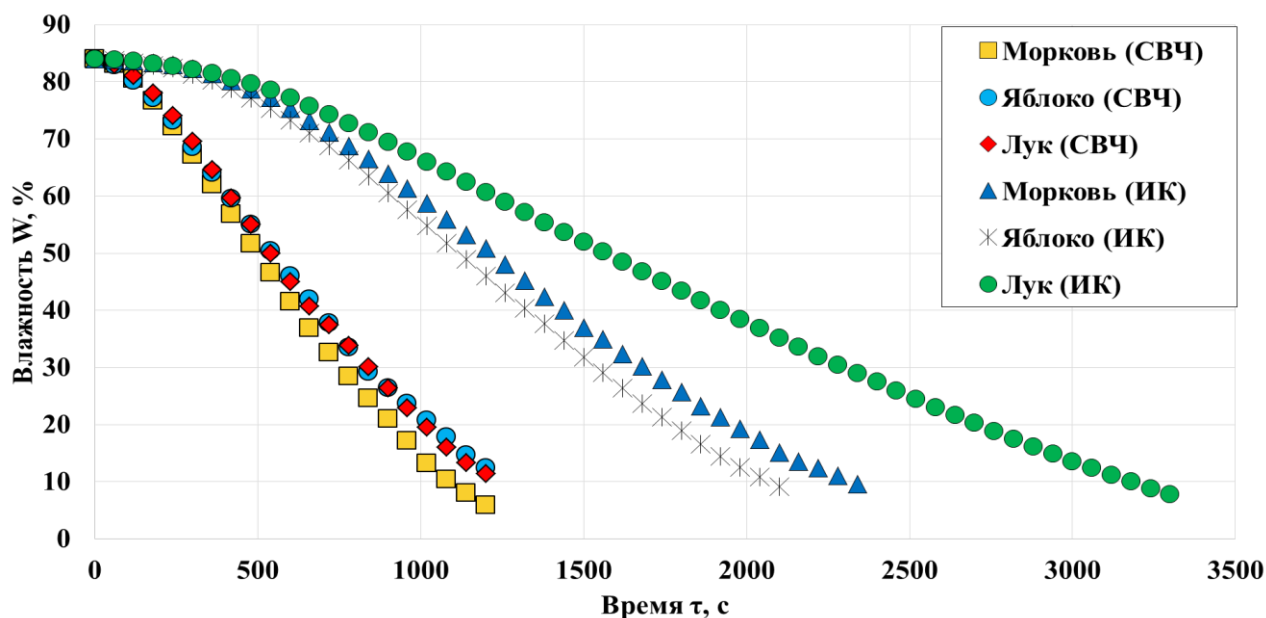


Рисунок 15 – Кинетика сушки

Для экспериментального моделирования процессов выпаривания в ЭМП была проведена классификация жидких гомо- и гетерогенных систем по типу растворителя: на водо-, спирто- и ацетонсодержащие. К водосодержащим были отнесены: соки (гранатовый, яблочный, свекольный и эхинацеи), томатная паста, молоко. В качестве спиртосодержащих исследованы: вино (10 % спирта), экстракт корня мискантуса (42 % раствор спирта) и экстракт кофейного масла. Для расширения возможностей полученных эмпирических уравнений, для проверки гипотезы о преимущественном влиянии теплоты фазового перехода проведены опыты, где экстрагентом был ацетон. В связи с этим, дополняет линейку объектов исследования ацетонсодержащий экстракт масла виноградных косточек.

Эксперименты по определению влияния мощности СВЧ поля на паропроизводительность аппарата проводились на примере яблочного сока. В результате исследований было установлено, что скорость увеличения массы конденсата чётко коррелируется с уровнем подводимой мощности (рисунок 16). При этом, исходя из полученной зависимости можно утверждать, что скорость выделения пара на протяжении основного времени эксперимента постоянная во всем диапазоне концентраций, вплоть до 90 % сухих веществ.

Экспериментальные исследования выпарного модуля проводились в три серии. Первые две заключались в определении влияния уровня подводимой мощности и степени разряжения на паропроизводительность модуля. В качестве исходного продукта выбран сахарный раствор с начальной концентрацией 15 °brix (рисунок 17).

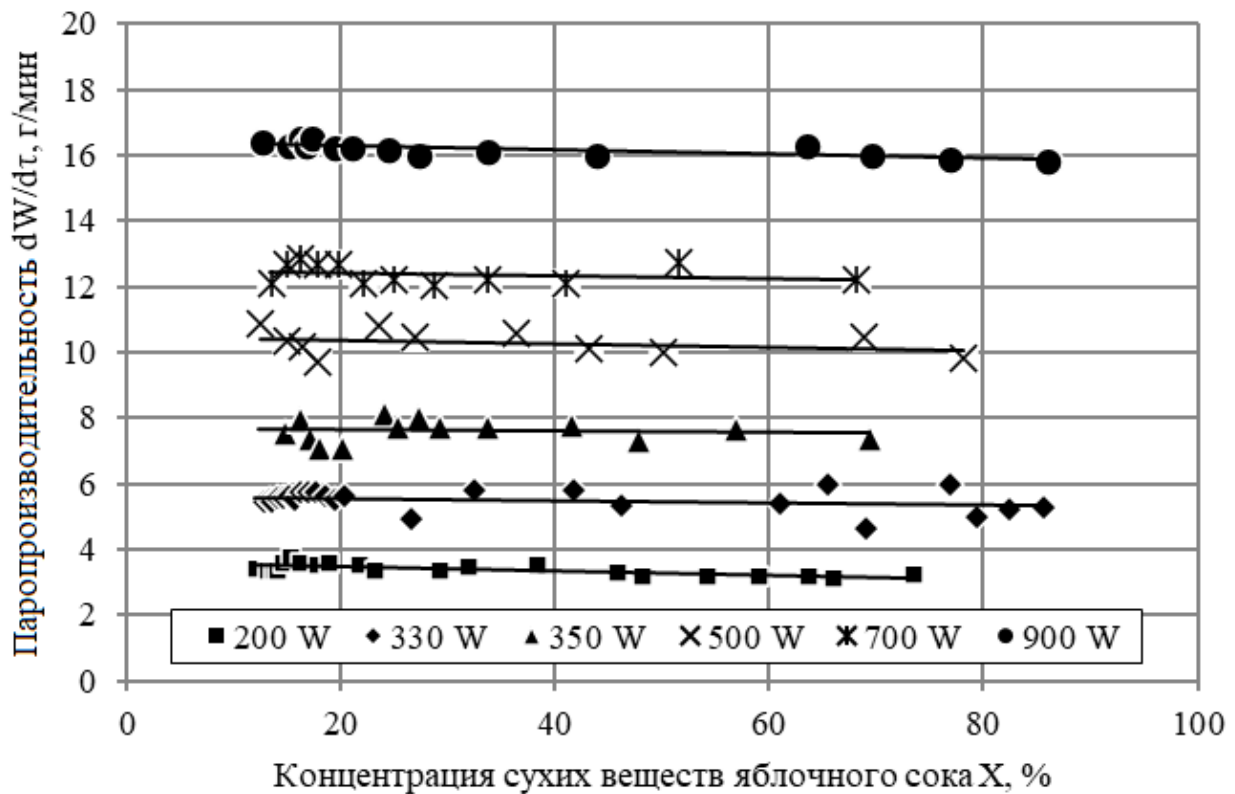
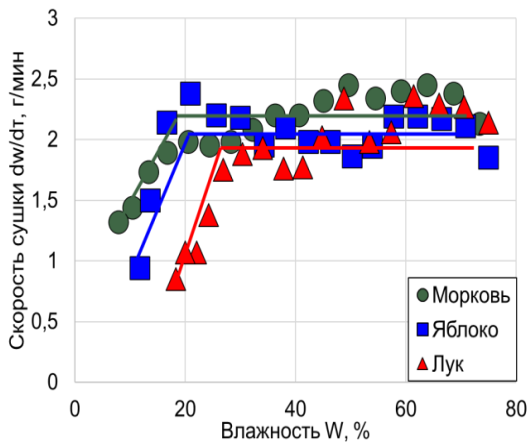
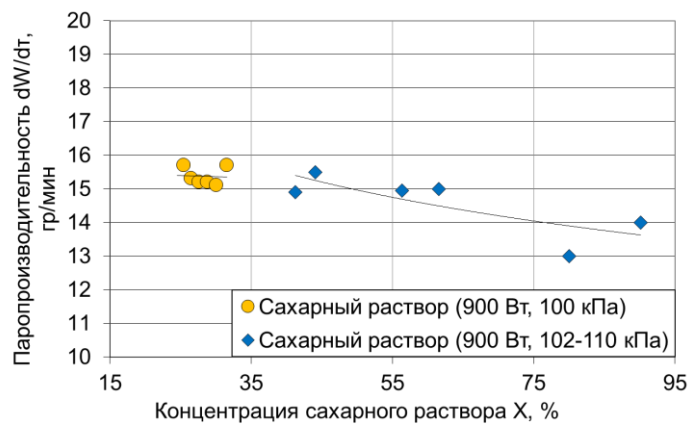


Рисунок 16 – Зависимость скорости процесса выпаривания от концентрации сухих веществ, при различных значениях мощности СВЧ поля



а)



б)

Рисунок 17 – Влияние давления и мощности СВЧ поля на скорость выпаривания сахарного раствора: а – диапазон давлений 7-80 кПа, б – диапазон давлений 100-110 кПа

На этом объекте опыты можно проводить в широком диапазоне температур, поскольку длительная термическая нагрузка не является критичной для данного типа сырья.

Подтверждается опытом промышленного производства сахара, варка утфеля. Третья серия – это исследования влияния типа продукта на паропроизводительность при постоянных максимальных значениях уровня подводимой мощности и вакуума.

Увеличение давления в аппарате приводит к уменьшению скорости выпаривания (рисунок 17).

Эксперименты по исследованию влияния давления на паропроизводительность проводились при постоянной мощности электромагнитного поля 200 Вт и одинаковом объёме продукта. Давление изменялось в диапазоне 0,01-0,02 МПа.

Исследования зависимости скорости выпаривания для различных систем показали расслоение результатов по типу растворителя (рисунок 18).

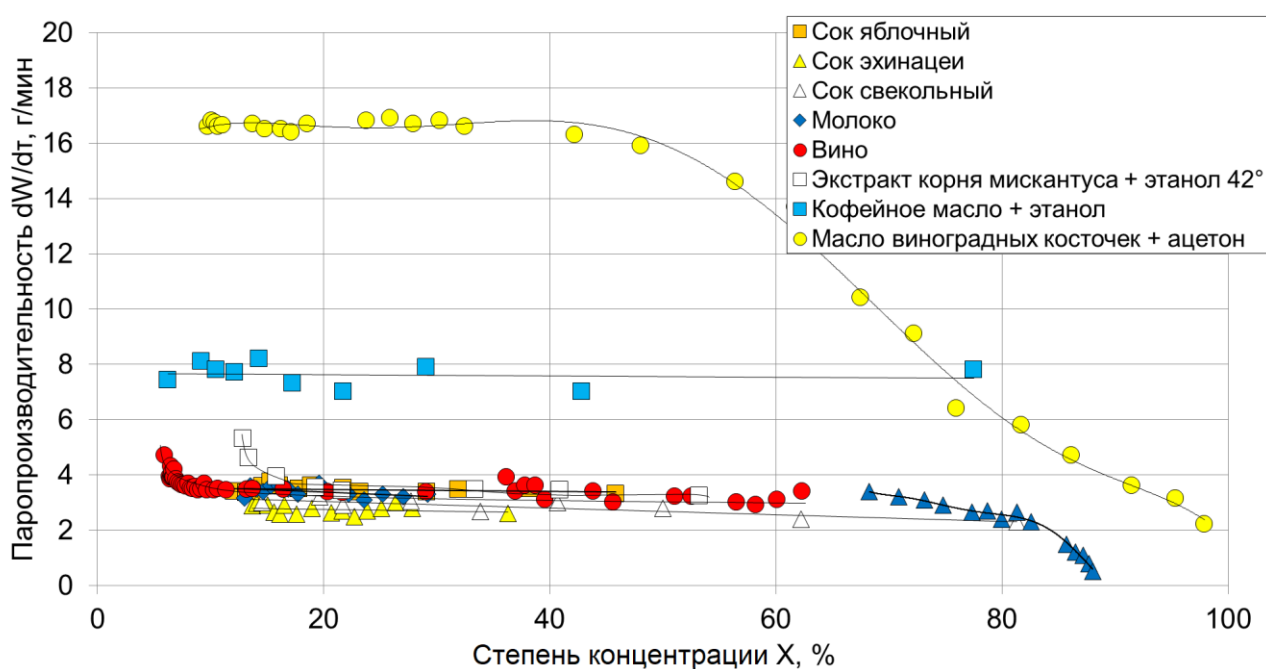


Рисунок 18 – Зависимость скорости выпаривания от концентрации сухих веществ для различных систем

В результате обобщения экспериментальных данных получено критериальное уравнение, справедливое в диапазоне давлений 10-20 кПа:

$$Bu = 1,32 \cdot P^{0,35} \cdot R^{-0,2}, \quad (9)$$

где P – безразмерное давление;

R – безразмерная теплота фазового перехода.

Для диапазона давлений 10-110 кПа было проведено уточнение полученной модели в виде зависимости:

$$Bu = 1,73 \cdot P^{0,07} \cdot R^{-0,2} \quad (10)$$

Полученная модель в критериальной форме позволяет рассчитать режимные параметры микроволновой вакуум-выпарной установки периодического действия для растворов, содержащих полярные молекулы.

Результаты стендовых испытаний показали, что закономерности процесса выпаривания в модуле соответствуют модели (10). Однако в этой модели не учтено КПД системы трансформации электромагнитной энергии в теплоту, которая, зависит от конструктивных характеристик (размеры волновода, выпарной камеры), и от режимных параметров организации процесса, и этот параметр индивидуален для каждого модуля.

Таким образом, попадание воздуха в объем модуля следует избегать, например, периодической кратковременной его откачкой вакуум-насосом.

Были проведены экспериментальные исследования СВЧ вакуум-выпарной установки. Установлено, что изменения паропроизводительности модуля чётко коррелируются с уровнем подводимой мощности ЭМП. Постоянные скорости объясняются особенностями объёмного подвода энергии при использовании электромагнитного поля. Показано, что увеличение паропроизводительности с ростом давления объясняется снижением теплоты парообразования.

Исследовано влияние типа продукта на паропроизводительность модуля. Для решения проблемы предложено использовать безразмерную паропроизводительность W , полученную при делении базового числа энергетического действия Vi_B на текущее Vi_T . Базовое значение числа энергетического действия Vi_B определялось при стабильной (минимальной) мощности для обрабатываемого продукта. Тогда для расчета паропроизводительности установки при работе с разными типами растворов и при разных мощностях электромагнитных генераторов предложено использовать следующее соотношение:

$$W = 1,29 \cdot N^{1,43} \cdot P^{0,08} \cdot R^{-0,2} \quad (11)$$

Полученная зависимость позволяет рассчитать паропроизводительность микроволновой вакуум-выпарной установки непрерывного действия при уровне безразмерной мощности $1 \leq N \leq 2,27$, в диапазоне безразмерного давления $2 \leq P \leq 16$ и при уровне безразмерной теплоты фазового перехода $3,32 \leq R \leq 4,56$. Обеспечивает точность с максимальным отклонением в $\pm 8 \%$.

В ходе проведения экспериментальных исследований было определено влияние режимных параметров на кинетику выпаривания в СВЧ поле и суши в ИК, СВЧ и СВЧ-ИК полях. При обобщении полученных результатов методами теории подобия были получены модели, позволяющие проектировать и оптимизировать установки периодического и непрерывного действия для получения высококачественных пищевых концентратов и сушёных продуктов из сельскохозяйственного сырья.

Раздел 5 Алгоритмы инженерных расчетов и оптимизации оборудования. Производственная апробация технологий и оборудования для обезвоживания

Полученные в результате экспериментальных исследований численные значения уравнения 6 позволили использовать его для разработки алгоритма инженерных расчётов промышленных установок для сушки плодов и овощей под воздействием ЭМП СВЧ и ИК излучения (рисунок 19).

С помощью разработанного алгоритма была рассчитана и создана пилотная ленточная установка для обезвоживания растительного сырья ЭМП СВЧ и ИК диапазонов.

Пилотная ленточная установка (рисунок 20) для обезвоживания растительного сырья электромагнитным полем СВЧ и ИК диапазонов состоит из сушильной камеры 1, в которой размещается кассета 7 с растительным сырьем 6. Мощность ИК генераторов 2 устанавливается регулятором 8, продолжительность работы отображается на аналоговом датчике 4. Регистрация изменения веса происхо-

дит на электронных весах 3. Посредством планшета 5 и контроллера была реализована система автоматизированного сбора и обработки данных, поступающих от электронных весов S1 и датчика температуры S2. В результате на экране отображались термограмма, линии сушки и скорости сушки. Количество потребленной установкой электроэнергии регистрировалось с помощью энергомера.

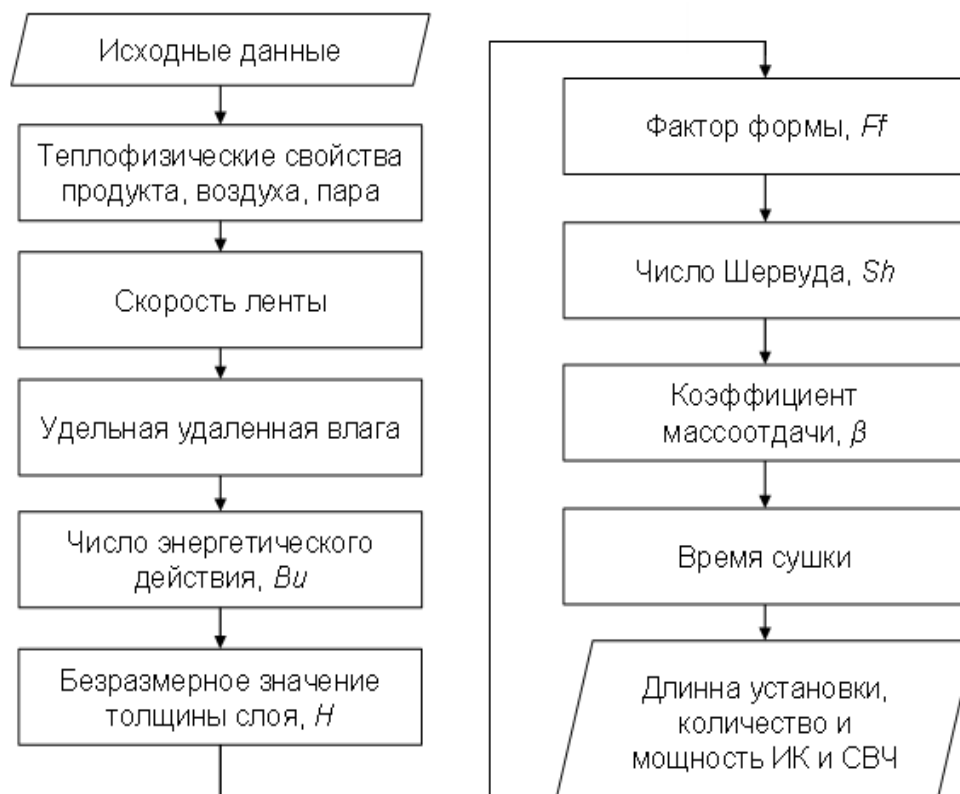


Рисунок 19 – Алгоритм конструктивного расчета сушилки

Лента приводится в движение электродвигателем, с регулируемым количеством оборотов, что позволяет изменять скорость её движения в диапазоне от 0 до 35 мм/с.

Конструкция канала, выполненного в виде запердельного волновода, обеспечивает отсутствие утечек микроволновой энергии через места загрузки и разгрузки продукта.

На пилотной установке были проведены испытания для определения зависимостей, которые характеризуют кинетику процесса нагрева сырья электромагнитным полем и удаления влаги в подвижном слое растительного сырья.

Результаты испытаний пилотной ленточной установки для обезвоживания растительного сырья в электромагнитном поле (таблица 2) показывают, что применение СВЧ и ИК сушильного оборудования позволяет получить высокопроизводительный экологически чистый технологический процесс, гарантирующий высокое сохранение исходных качественных характеристик высушенного сырья при показателях энергоёмкости процесса около 4 МДж/кг удалённой влаги.

Приведенные выше результаты производственных испытаний пилотных образцов сушильной техники согласуются с результатами анализа энергоэффективности, приведенными в разделе 1.

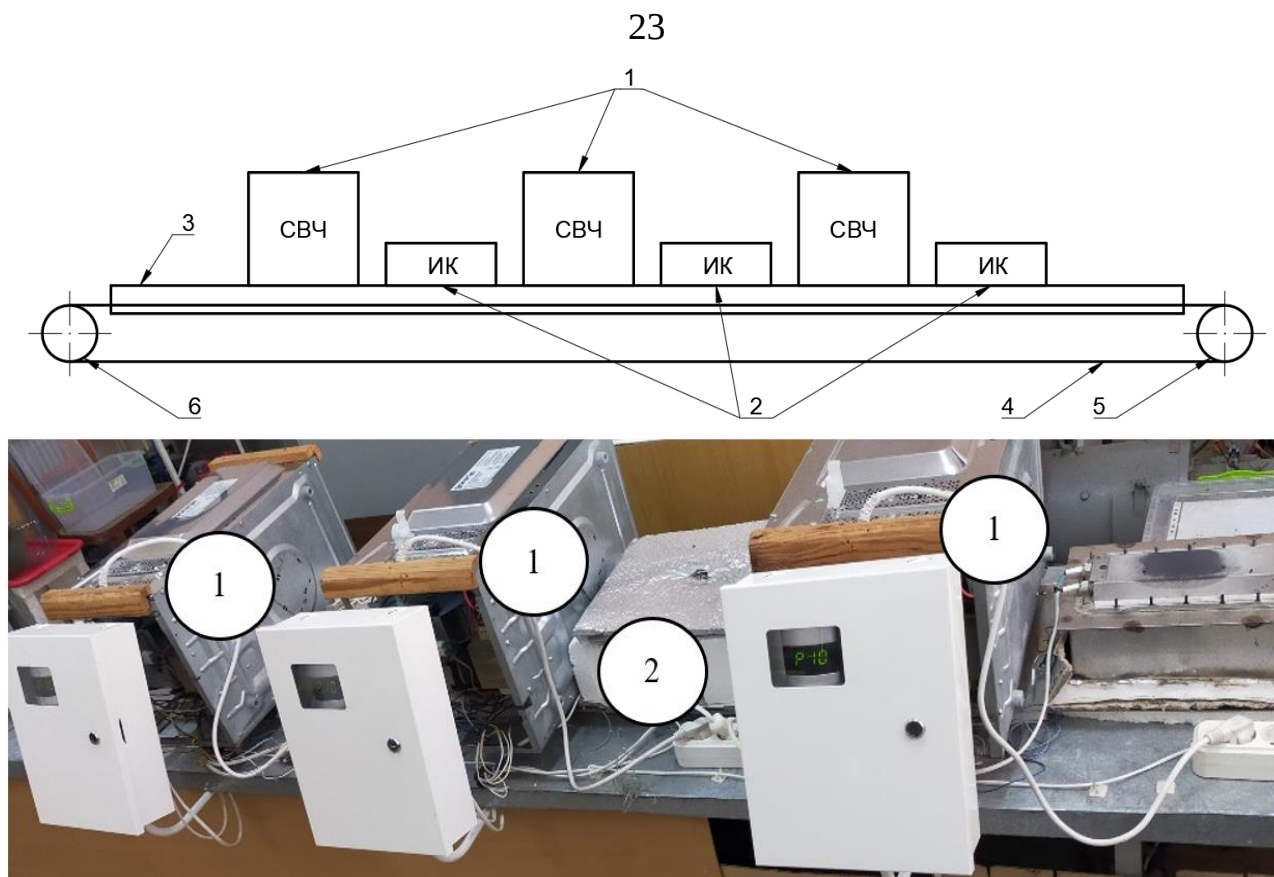


Рисунок 20 – Схема пилотной ленточной сушилки: 1– СВЧ модули, 2 – ИК модули, 3 – радионепроницаемый канал, 4 – лента, 5 – приводной барабан, 6 – натяжной барабан

Таблица 2 – Результаты испытаний на пилотной ленточной сушилке

№	Продукт	Тип энергии	Рекомендованные параметры			Энергозатраты, МДж/кг	Массовая доля влаги	
			мощность, кВт	производительность, кг/ч	скорость ленты, м/с		начальная, %	конечная, %
1	Яблоко	ИК	1,5	5,2	0,002	3,76	85	11
		СВЧ	3					
2	Картофель	ИК	1,5	4,9	0,002	4,0	85	11
		СВЧ	3					
3	Морковь	ИК	1,5	4,2	0,002	4,6	85	10
		СВЧ	3					

Для инженерных расчётов и оптимизации модульной микроволновой вакуум-выпарной установки предложено использовать выпарные модули цилиндрической формы, условно разделенные на две зоны: зона кипения жидкого продукта и зона сепарации вторичного пара, имеющие одинаковый диаметр, что положительно скажется на надёжности модуля, технологичности и стоимости его изготовления (рисунок 21).

Для модуля цилиндрической формы основными размерами являются диаметр (D_m) и высота (H_m). Высота модуля складывается из высоты зоны кипения жидкости (H_{prmax}) и высоты зоны сепарации пара (H_{sep}). Минимальная высота зоны кипения (H_{prmin}) определяется высотой окна волновода для под-

вода микроволновой энергии плюс две глубины проникновения микроволнового поля в продукт. Алгоритм расчета и оптимизации конструктивных параметров СВЧ модуля показан на рисунке 22.

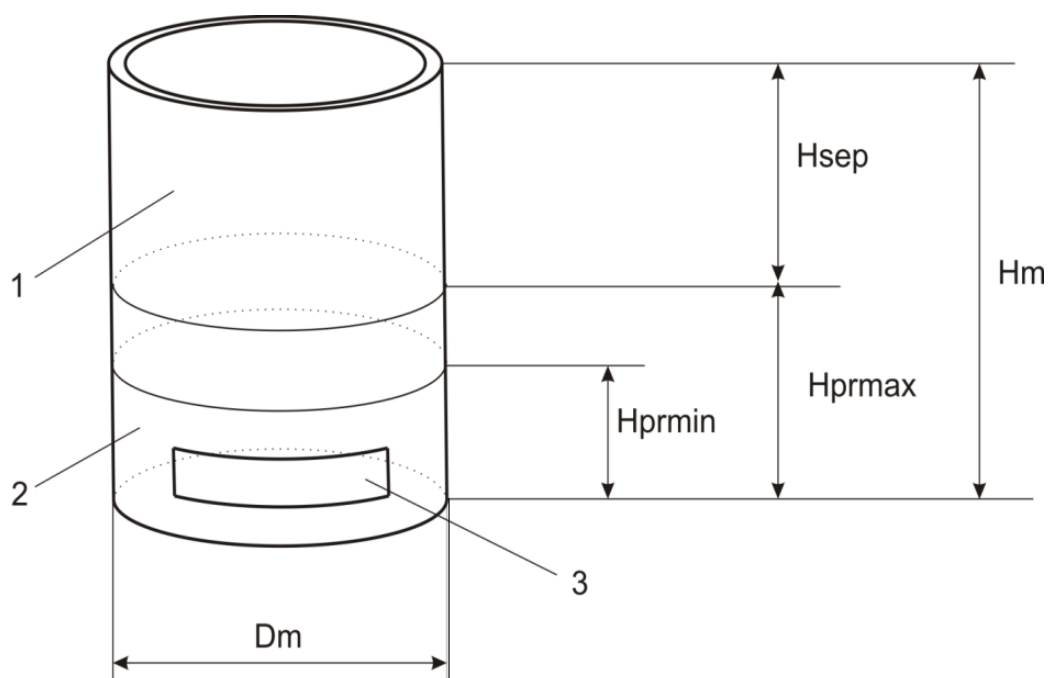


Рисунок 21 – Схема СВЧ модуля: 1 – зона сепарации пара, 2 – зона кипения продукта, 3 – окно подключения волновода

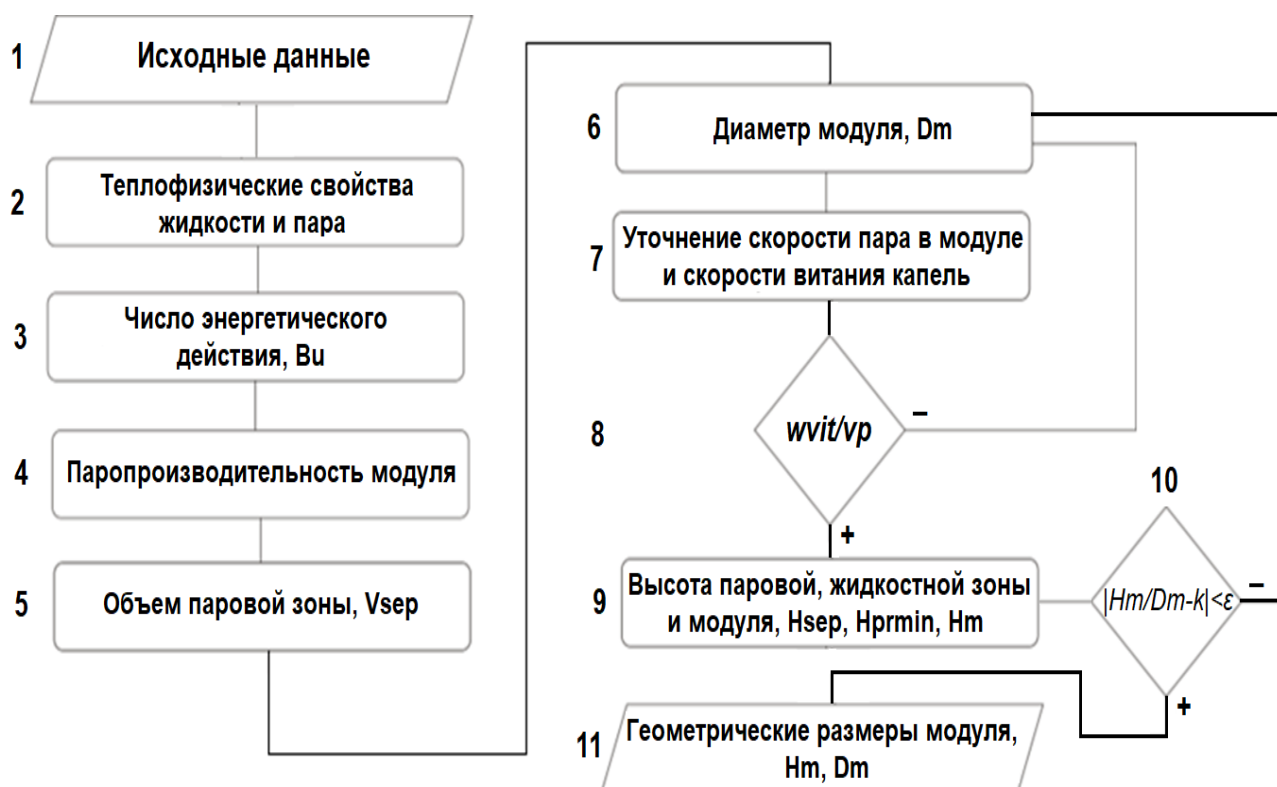


Рисунок 22 – Алгоритм расчета и оптимизации конструктивных параметров СВЧ модуля

Исходными данными для расчета являются мощность магнетрона, частота излучения, вид продукта и давление в модуле. На следующих этапах определяется температура кипения продукта в модуле, теплота парообразования, плотность жидкой и газовой фазы, а также, действительная и мнимая диэлектрические проницаемости среды. Далее проводится расчет параметрического комплекса безразмерного давления и симплекса удельной теплоты фазового перехода, что даёт возможность определить число энергетического действия и паропроизводительность модуля. В зависимости от вида сырья и давления в модуле, определяется допустимая паронапряженность паровой зоны, используя значение паронапряженности при атмосферном давлении и поправочный коэффициент, учитывающий давление в модуле и объем паровой зоны модуля как отношение паропроизводительности к допустимой паронапряженности. Затем определяем допустимую скорость пара в паровом пространстве модуля и диаметр модуля. После этого, уточняется скорость пара в модуле и сравнивается со скоростью витания капли. Максимальная скорость пара выбирается в зависимости от давления в модуле, но не должна превышать скорость витания капли. В случае если скорость пара в модуле превышает скорость витания капли, увеличиваем диаметр модуля в соответствии с уточненным значением предельно допустимой скорости пара, которое равно скорости витания капли. Если скорость пара меньше скорости витания капли, то переходим к этапу девятому и определяем высоту паровой части модуля, минимальный уровень жидкой фазы в модуле и общую высоту модуля.

Алгоритм дополнен блоком оптимизации массогабаритных показателей (рисунок 22, блок 10). Полученное отношение Hm/Dm сравнивается с заданным и в случае несоответствия, корректируется значение диаметра модуля.

В основу реализации оборудования для непрерывного концентрирования растворов в СВЧ поле положен модульный принцип. Он достаточно гибкий, и позволяет реализовывать последовательные, параллельные и разнообразные комбинированные схемы их включения. Предложена принципиальная схема вакуум-выпарной установки с СВЧ модулями с равными мощностями генераторов, где обеспечивается работа при одинаковой нагрузке всех модулей (рисунок 23).

Основными элементами принципиальной схемы являются реакционный объем, где реализуется процесс выпаривания, узлы ввода раствора и выхода концентрата и вторичного пара, системы генерации и ввода СВЧ энергии и корпус установки. Конструкции этих элементов должны обеспечивать решение технологических задач и отвечать комплексным техническим требованиям. Сами модули собраны группами в вертикальных осях и в горизонтальных уровнях.

В результате расчётов, проведенных по алгоритму, представленному на рисунке 22 рассчитан типоразмерный ряд СВЧ вакуум-выпарных модулей. Рабочее давление в камере принято на уровне 7,4 кПа, что соответствует температурам кипения водных растворов около 40 °С. Такое условие принято из режимов эффективной работы данного модуля в установках концентрирования термолабильных продуктов. Для данного модуля предполагается использование излучателя электромагнитной энергии СВЧ диапазона с воздушным охлаждением. Диапазон мощностей промышленно выпускаемых излучателей находится в пределах 600-3000 Вт (таблица 3).

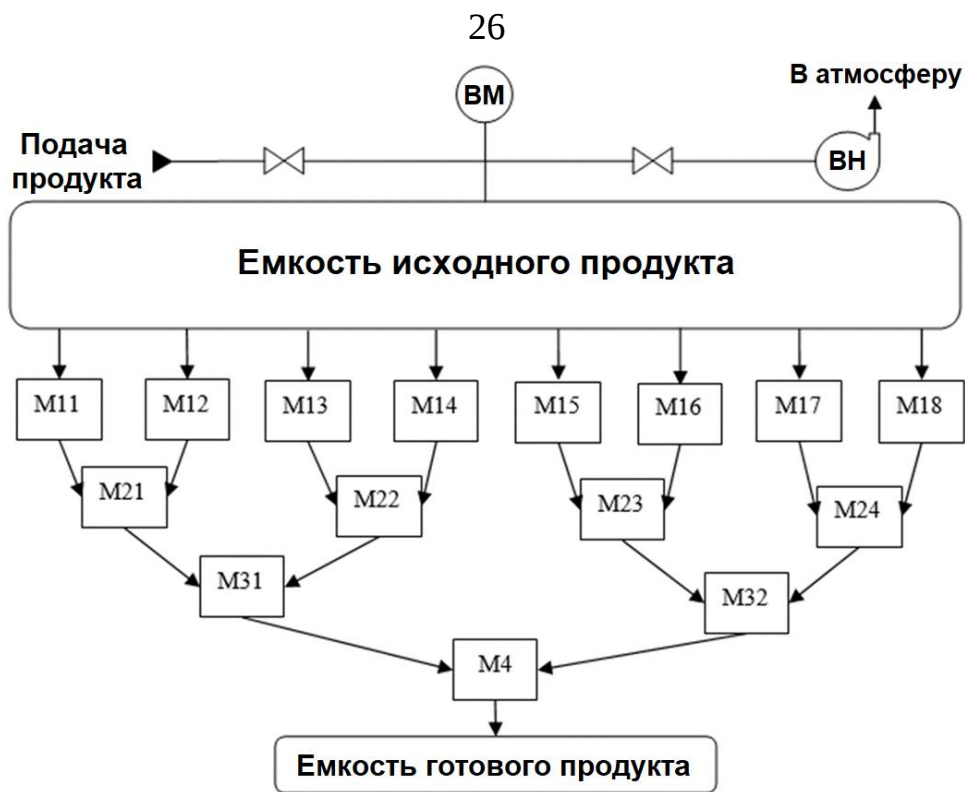


Рисунок 23 – Принципиальная схема вакуум-выпарной установки с СВЧ модулями одинаковой мощности

Для магнетрона мощностью 600 Вт величина паропроизводительности составит 0,615 кг/час, величина переходной зоны составит 21 мм. Таким образом, общая минимальная высота модуля диаметром 100 мм составит 180 мм. При установленной мощности магнетрона 1100 Вт, минимальный объем парового пространства составит 1,4 л при минимальном диаметре 32 мм, скорость движения пара в модуле диаметром 100 мм составит 0,61 м/с. Тогда высота парового пространства составит 179 мм, а высота переходного слоя 39 мм. Для снижения металлоёмкости модуля возможно увеличение его диаметра за счёт уменьшения высоты. Увеличив диаметр до 150 мм скорость пара составит 0,15 м/с и 0,27 м/с для 600 Вт и 1100 Вт мощности излучателя соответственно. Минимальная высота парового пространства составит 43 мм и 79 мм, а высота переходной зоны – 9 мм и 16 мм для 600 Вт и 1100 Вт мощности излучателя.

Представленные в таблице 3 модули могут использоваться как в непрерывном, так и в периодическом режиме. При работе в непрерывном режиме основными параметрами являются производительность модуля по сырью и готовому продукту. Производительность модуля по сырью и концентрированному продукту зависит от коэффициента концентрирования (K_k) и установленной мощности магнетрона. Такие зависимости для разработанных модулей в диапазоне K_k от 1,5 до 8 представлены на рисунках 24, 25.

Разработана конструкция модуля СВЧ вакуум-выпарной установки (рисунок 26). Фото пилотной установки представлено на рисунке 27. Основой предлагаемой конструкции установки является цилиндрический корпус 3, изготовленный из радионепроницаемого металла. В корпусе имеется специальное окно для магнетрона 6, СВЧ энергия которого воздействует на сырье через радиопрозрачный корпус 5, выполненный из тефлона.

Таблица 3 – Типоразмерный ряд СВЧ выпарных модулей

Наименование	Диаметр, мм	Высота, мм	Мощность, Вт	Производительность по выпаренной влаге, кг/ч
M1-06	100	250	600	0,615
M1-07			700	0,717
M1-09			900	0,922
M1-10			1000	1,024
M1-11			1100	1,127
M1Y-06		450	600	0,615
M1Y-07			700	0,717
M1Y-09			900	0,922
M1Y-10			1000	1,024
M1Y-11			1100	1,127
M2-06	150	150	600	0,615
M2-07			700	0,717
M2-09			900	0,922
M2-10			1000	1,024
M2-11			1100	1,127
M2Y-06		300	600	0,615
M2Y-07			700	0,717
M2Y-09			900	0,922
M2Y-10			1000	1,024
M2Y-11			1100	1,127
M2Y-20			2000	2,049
M2Y-30			3000	3,073

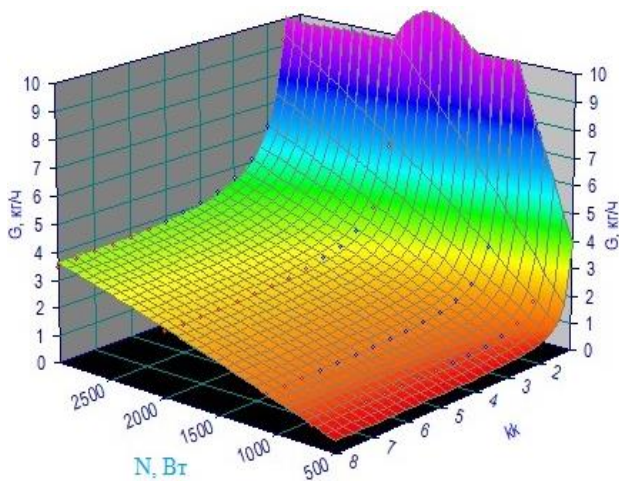


Рисунок 24 – Зависимость производительности модуля по яблочному соку от коэффициента концентрирования и установленной мощности магнетрона

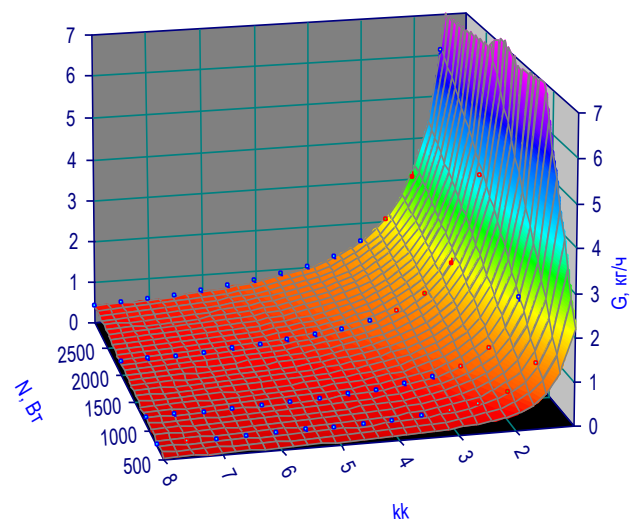


Рисунок 25 – Зависимость производительности модуля по концентрированному яблочному соку от коэффициента концентрирования и установленной мощности магнетрона

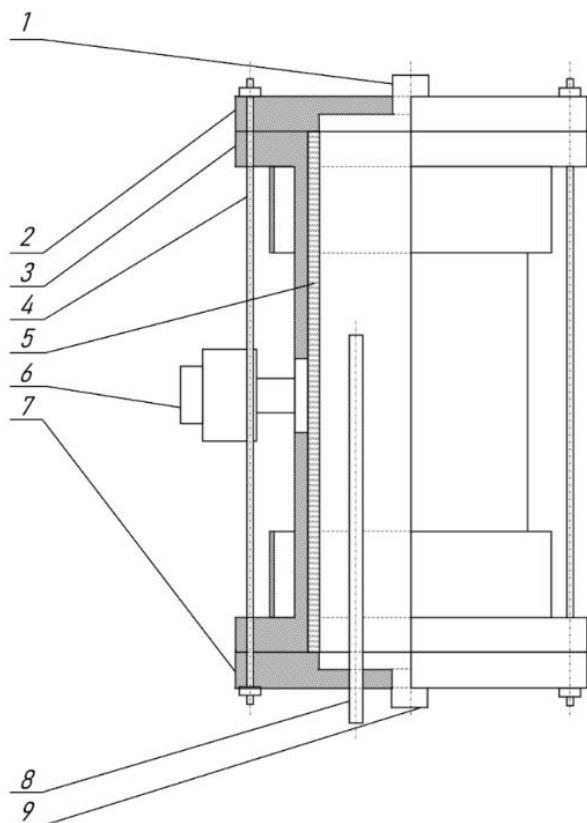


Рисунок 26 – Схема модуля СВЧ вакуум-выпарной установки



Рисунок 27 – Фото пилотной установки СВЧ вакуум-выпарной установки

С торцевых частей корпуса посредством шпилек 4 присоединены верхний 2 и нижний 7 фланцы. Верхний фланец оборудован патрубком 1 для откачки воздуха перед началом процесса выпаривания, а также для выхода вторичного пара.

В нижнем фланце имеются патрубки для непрерывной подачи сырья 8 и непрерывной выгрузки готового продукта 9. Для исследования и разработки инженерной методики расчета и оптимизации СВЧ вакуум-выпарной установки изготовлен экспериментальный стенд.

Так как одним из возможных применений СВЧ вакуум-выпарной установки модульного типа может быть использование её как финальной стадии при многоступенчатом концентрировании продукта с содержанием сухих веществ от 50-60 % до 95 % сухих веществ, когда обезвоживание высококонцентрированного продукта в традиционных выпарных аппаратах наталкивается на трудности, связанные с ухудшением условий теплообмена и циркуляции продукта. Были определены производительности модулей в диапазоне Kk от 1,1 до 1,5 (рисунки 28-29).

Стоит отметить, что увеличение установочной мощности в 2 раза с 1000 до 2000 Вт ведёт к увеличению производительности в 2 раза, а стоимости, приблизительно, в 15 раз (резко возрастает стоимость магнетрона), что делает экономически неоправданным использование, в данном случае 2 и 3 кВт магнетронов.

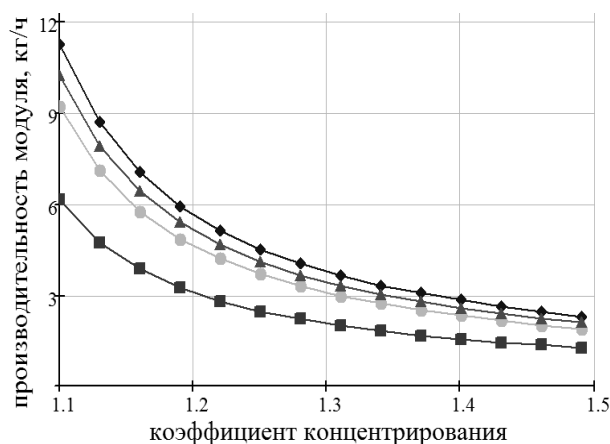


Рисунок 28 – Зависимость производительности модуля по концентрированному яблочному соку от коэффициента концентрирования при установленной мощности магнетрона: ■ 700 Вт, ● 900 Вт, ▲ 1000 Вт, ◇ 1100 Вт

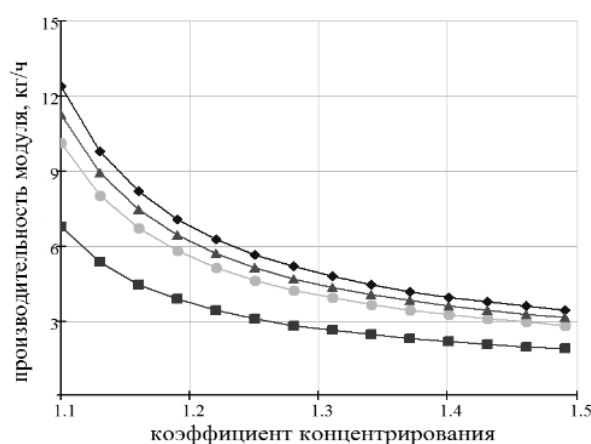


Рисунок 29 – Зависимость производительности модуля по яблочному соку от коэффициента концентрирования при установленной мощности магнетрона: ■ 700 Вт, ● 900 Вт, ▲ 1000 Вт, ◇ 1100 Вт

Для сравнения энергоэффективности традиционных и инновационных технологий обезвоживания было проведено сравнение по показателю энергоэффективности (рисунок 30).

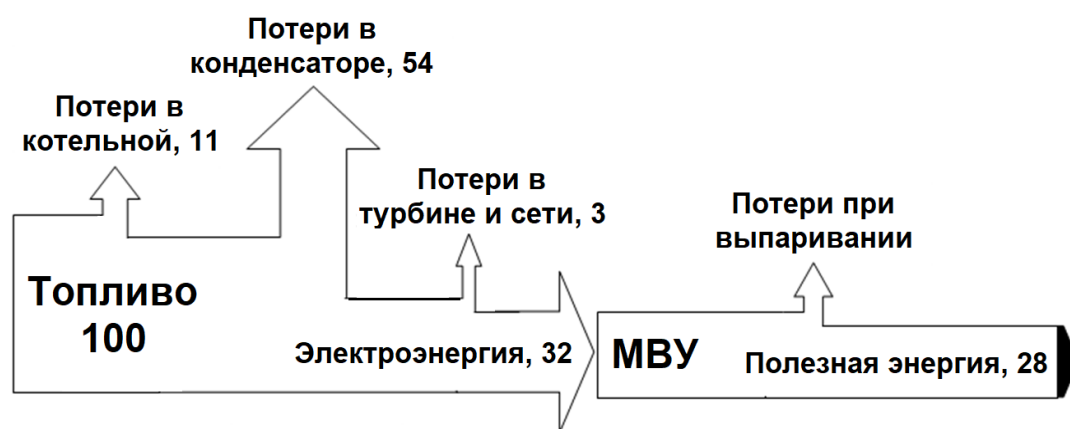


Рисунок 30 – Схема конверсии энергии в инновационной технологии обезвоживания

Инновационная технология обеспечивает удаление одинакового количества влаги при выпаривании и при сушке, что требует затрат энергии на 6 % меньше. По мере повышения доли процесса сушки, эффективность СВЧ вакуум-выпарного аппарата возрастает.

На этой основе проведена оценка эффективности использования энергии в традиционных технологиях сушки и выпаривания и предложенных методов обезвоживания в ЭМП. В технологиях обезвоживания сырья базовой характеристикой источника энергии при расчетах служил нефтяной эквивалент (кг н.э.), который при горении выделяет энергию в 40 МДж/кг н.э. (рисунок 31).

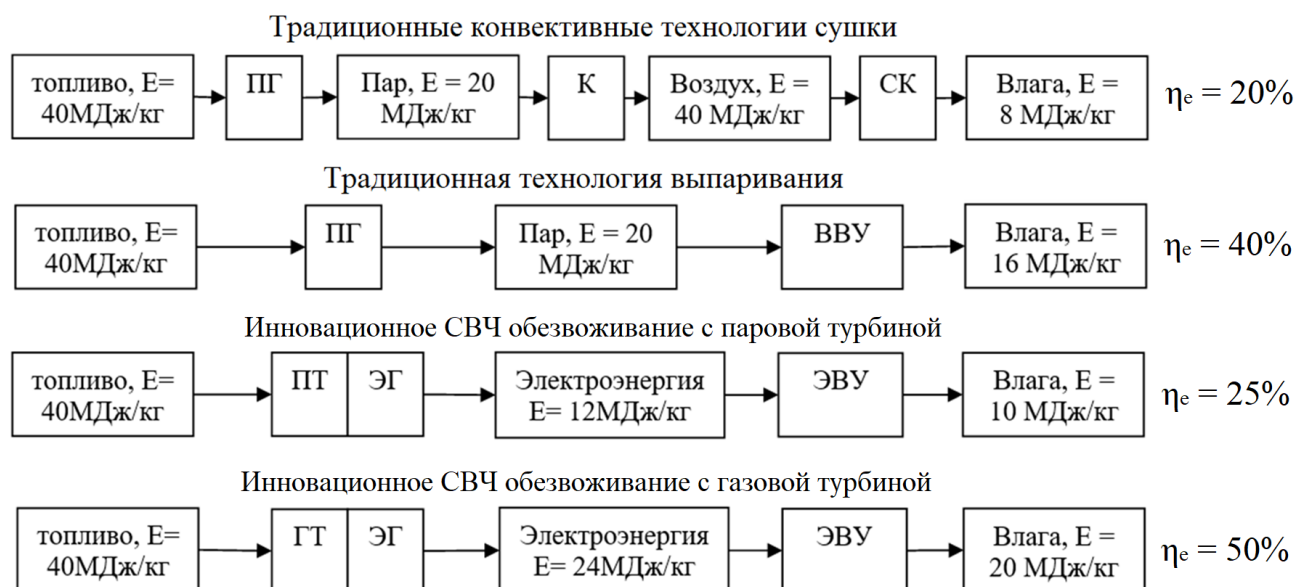


Рисунок 31 – Конверсия энергии в технологиях обезвоживания (все параметры приведены к 1 кг топлива): *ПГ* – парогенератор; *К* – паровой калорифер; *СК* – конвективная сушильная камера; *ВВУ* – вакуум-выпарная установка; *ПТ* – паровая турбина; *ЭГ* – электрогенератор; *ГТ* – газовая турбина; *ЭВУ* – СВЧ вакуум-выпарная установка; η_e – энергетический КПД технологии

Проведенные оценки свидетельствуют об энергетических и экономических преимуществах предлагаемых аппаратов. Исходя из общего энергетического КПД технологий, инновационная с паровой турбиной в схеме конверсии энергии на 5 % эффективнее традиционной сушки. При использовании газовой турбины КПД инновационной схемы возрастает вдвое (50%) и уже может конкурировать с технологиями выпаривания (40 %).

Оценка эффективности использования энергии в традиционных и разработанных технологиях представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Сравнение традиционных и предложенного показателей энергоэффективности различных технологий обезвоживания

Энерготехнология	Коэффициент удельного энергопотребления $KУЭ$, МДж/кг влаги	Удельный расход энергии J , МДж/кг н.э.	Коэффициент энергоэффективности d_o , кг влаги/кг н.э.
Сушка традиционная	4-7	4-9	1-3
Сушка в электромагнитном поле	2-4	10-20	5-6
Выпаривание + сушка традиционная	2,8	8-20	3-6
Выпаривание в электромагнитном поле	2,7	10-20	3,5-7,5

При испытаниях СВЧ установок достигнуто значение показателя эффективности влагоудаления $d_o = 3-7$ кг влаги/кг н.э. Визуально отмечено, что из камеры выходит пароводяная смесь. Установки реализуют режим бародиффузии, что существенно снижает расход энергии. Реально достичь значений $d_o = 50$ кг в/кг н.э. при четком согласовании мощности СВЧ генераторов с характеристиками пищевого сырья.

Проведенные оценки свидетельствуют об энергетических и экономических преимуществах предлагаемых технологий с ЭМП.

Лабораторными исследованиями (таблица 5) было подтверждено, что электромагнитный принцип подвода энергии, воздействуя непосредственно на влагу в объеме продукта, приводит к сохранению полезных веществ и готовый продукт соответствует ГОСТ-32065-2013 Овощи сушеные, ГОСТ-32896-2017 Фрукты сушеные и ГОСТ-34130-2017 Фрукты и овощи сушеные.

Таблица 5 – Показатели качества сушеных фруктов

Показатель	Яблоко (сорт «Фуджи»)	
	конвективная сушка	СВЧ-ИК сушка
Влажность, %	10,4±0,3	9,3±0,2
5-Гидроксиметилфурфурол, мг %	12,2±1,1	0,5±0,1
Фурфурол, мг %	0,7±0,1	0,6±0,1
Процианидин В1, мг %	11,7±0,2	15,5±0,3
(+)-D-Катехин, мг %	14,5±0,2	16,4±0,7
Процианидин В2, мг %	25,4±0,4	37,1±0,6
Хлорогеновая кислота, мг %	208,9±10,0	280,3±14,1
Процианидин С1, мг %	19,8±1,2	21,5±1,1
(-)-Эпикатехин, мг %	57,7±1,9	65,1±2,5
Флоридзин, мг %	3,6±0,1	10,0±0,3
Рутин, мг %	4,3±0,1	6,5±0,1
Кверцетин-3-О-глюкозид, мг %	0,9±0,1	1,8±0,1
Кверцетин-3-О-ксилозид, мг %	0,5±0,1	0,9±0,1
Кверцетин-3-О-арабинозид, мг %	2,5±0,1	3,2±0,1
Флоретин, мг %	9,8±0,4	11,6±0,3
Кверцетин-3-О-рамнозид, мг %	5,4±0,1	6,5±0,1
Изорамнетин-3-О-глюкозид, мг %	17,9±1,3	25,0±1,1
Кверцетин, мг %	0,4±0,1	0,7±0,1
Лимонная кислота, %	0,38±0,05	0,28±0,04
Яблочная кислота, %	5,70±0,05	5,29±0,07
Молочная кислота, %	0,24±0,07	0,21±0,07
Глюкоза, %	21,93±0,45	21,97±0,55
Фруктоза, %	41,31±0,50	41,53±0,45
Сумма сахаров, %	63,24±0,95	63,51±1,0

Предлагаемые разработки были проанализированы с точки зрения коммерческой привлекательности. Экономическая привлекательность СВЧ вакуум-

выпарной установки была оценена также с точки зрения снижения затрат на транспортировку жидких концентратов за счёт увеличения максимальной концентрации сухих веществ в модульной СВЧ вакуум-выпарной установке. Так при транспортировке сока на 3000 км средняя прибыль от предварительного концентрирования его в 1,5 раза составит 2,5 тыс. руб. на тонну, а при концентрировании в 2-4 раза прибыль составит 7,5-10 тыс. руб. на тонну.

Для расчета экономической эффективности использования комбинированной ленточной сушилки для обезвоживания растительного сырья ЭМП СВЧ и ИК диапазонами излучения было выполнено классическое сравнение капитальных затрат на изготовление установки с экономическим эффектом от её внедрения.

Как видно из таблицы 6 в случае производства сушёной свеклы и моркови установка производительностью 5 кг/ч окупится менее чем за сезон. При производстве сушёного картофеля установка производительностью по сырью 5 кг/ч окупится за 2 сезона, увеличение же производительности в 2 раза позволит окупить установку за сезон.

Таблица 6 – Сезонная прибыль от использования установки

Производительность по сырью, кг/ч	Стоимость установки, тыс. руб.	Свекла, тыс. руб.	Картофель, тыс. руб.	Морковь, тыс. руб.	Яблоко слайс, тыс. руб.
5	40	233,76	22,8648	124,008	8,15
10	80	527,52	105,7296	308,016	43,71
20	160	1115,04	271,4592	676,032	147,41
50	400	2877,6	768,648	1780,08	458,53
100	800	5815,2	1597,296	3620,16	977,06

При производстве яблочных слайсов установка производительностью 50 кг/ч окупится за 1 сезон, а для меньшей производительности срок окупаемости составит 1,1 и 1,9 сезона при производительности 20 и 10 кг/ч соответственно. Для яблок собственного производства срок окупаемости установки будет в пределах сезона.

Таким образом были разработаны алгоритмы инженерных расчетов установок непрерывного действия: ленточной сушилки с комбинированным СВЧ и ИК энергоподводом и микроволновой вакуум-выпарной установки; проведены расчёты типоразмерного ряда СВЧ вакуум-выпарных модулей разной производительности; технические задания на установки; созданы пилотные установки; проведена система энергетического менеджмента; оценка качества готовой продукции; технико-экономическая оценка режимов и параметров технологий для обезвоживания сырья с применением инновационного оборудования; приведены результаты производственных испытаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании многолетних исследований (2012-2024 гг.) по научно-практическому обоснованию энергоэффективного оборудования для тепловой обработки сельскохозяйственного сырья получены следующие научные данные:

1. Теоретически и экспериментально обоснована методология обезвоживания сельскохозяйственного сырья путем адресной доставки энергии к полярным молекулам с использованием электромагнитных источников энергии СВЧ и ИК диапазонов.

2. Разработана и математически описана теоретическая модель:

– процесса выпаривания сельскохозяйственного сырья с помощью микроволновых источников энергии, определяющая зависимость числа энергетического воздействия от параметрических комплексов безразмерного давления и безразмерной теплоты парообразования;

– процесса сушки сельскохозяйственного сырья при комбинированной СВЧ и ИК обработке, определяющая зависимость числа энергетического воздействия от параметрических комплексов безразмерной толщины слоя и фактора формы сырья.

3. Получены экспериментальные модели, описывающие:

– процесс выпаривания с использованием микроволновой вакуум-выпарной установки периодического действия (диапазон безразмерного давления $2 \leq P \leq 22$, безразмерной теплоты фазового перехода $1 \leq R \leq 4,56$, точность с максимальным отклонением $\pm 8 \%$) и непрерывного действия (диапазон безразмерной мощности $1 \leq N \leq 2,27$, безразмерного давления $2 \leq P \leq 16$, безразмерной теплоты фазового перехода $3,32 \leq R \leq 4,56$, точность с максимальным отклонением $\pm 8 \%$);

– процесс сушки с использованием установки для пищевого сырья в неподвижном слое при инфракрасном, микроволновом подводе энергии, а также на ленте транспортёра при комбинированном подводе энергии от микроволновых и инфракрасных источников энергии. В результате математической обработки базы экспериментальных данных получены значения коэффициентов теоретической модели, в зависимости от вида и формы пищевого сырья.

4. Разработан алгоритм расчета:

– ленточной комбинированной СВЧ-ИК сушилки непрерывного действия: скорость движения ленты транспортёра – $w_l = 0,002$ м/с, длина установки $L_{уст} = 7$ м, время нахождения продукта в установке $\tau_{суш} = 3500$ с, мощность СВЧ излучателей $N_{уст\ СВЧ} = 7,2$ кВт и мощность ИК излучателей $N_{уст\ ИК} = 9$ кВт;

– микроволновой вакуум-выпарной установки модульного типа непрерывного действия с основными характеристиками: геометрия рабочего объема; мощность; количество и распределение источников ЭМП в рабочем объеме аппарата; скорость потока продукта через установку (для установки непрерывного действия) или время полного цикла (для установки периодического действия). Для магнетрона мощностью 600 Вт паропроизводительность составит 0,615 кг/час, величина переходной зоны – 21 мм, общая минимальная высота модуля диаметром 100 мм – 180 мм.

Разработано техническое задание на ленточную комбинированную СВЧ-ИК сушилку непрерывного действия; микроволновую вакуум-выпарную установку непрерывного действия.

5. Созданы пилотные модели установок для обезвоживания сельскохозяйственного сырья и разработаны:

– технология выпаривания при низкой температуре (до 40 °С) жидких пищевых продуктов, которая позволяет получать готовую продукцию высокой концентрации (до 95 % сухих веществ);

– технология сушки различных видов сырья до влажности продукта 11-17% при температуре –40-60 °С с использованием ЭМП при комбинированном СВЧ и ИК диапазоне и ускоряющая процесс в 2,2 раза.

6. Разработанные режимы и параметры технологий с применением инновационного оборудования прошли опытно-промышленную проверку:

– выпаривания с использованием микроволновой вакуум-выпарной установки модульного типа непрерывного действия показали ее эффективность для обезвоживания высококонцентрированного продукта до 95 % сухих веществ, что на 25-35 % выше, чем при традиционных технологиях. Общий объем готовой продукции – 81,4 кг с концентрацией сухих веществ 26-33 %;

– сушки с использованием ленточной комбинированной СВЧ-ИК сушилки непрерывного действия показали, что время получения готового продукта и энергоёмкость процесса меньше, чем в традиционных технологиях, в 5-6 раз и 2,0-2,2 раза соответственно. Общий объем готовой продукции – 10,7 кг с влажностью 12-14 %.

Разработки рекомендованы к внедрению.

7. Технико-экономическая оценка режимов и параметров технологий обезвоживания сырья с применением инновационного оборудования показала, что их использование повышает общий энергетический КПД процесса на 6 % энергии в сравнении с традиционными технологиями. Обеспечивает выход сухого продукта в зависимости от типа начального сырья при производительности установки 5 кг/ч по исходному сырью до 1224 кг/год. Увеличение производительности до 100 кг/ч приводит к повышению расчетного экономического эффекта в 25-120 раз.

Рекомендации производству

Разработанная установка микроволновой вакуум-выпарной установки модульного типа (патент РФ на полезную модель № 213932) может быть использована для производства жидких и сухих концентратов пищевых продуктов на стадии предварительного концентрирования сырья и на финальной стадии процесса при многоступенчатом концентрировании для обезвоживания высококонцентрированного продукта с содержанием сухих веществ от 50-60 % до 95 % сухих веществ.

Разработанная установка ленточной сушилки с комбинированным СВЧ-ИК электромагнитным подводом энергии (патент РФ на полезную модель № 214723) рекомендуется для производства сухих фруктовых и овощных продуктов (сухофрукты, фруктовые и овощные чипсы, сухие приправы).

Рекомендации для научного процесса

Предложенная методология исследований процессов обезвоживания в условиях воздействия ЭМП может использоваться при изучении технологий адресной доставки энергии к полярным молекулам сырья в задачах интенсифи-

кации процессов тепломассопереноса и получения новых образцов готового продукта.

При изучении влияния электромагнитных источников энергии СВЧ и ИК диапазона на процесс обезвоживания пищевого сырья в условиях вакуума, атмосферного или избыточного давления предложено использовать полученные теоретические и экспериментальные модели процессов сушки и выпаривания с целью расчета соответствующих значений скорости влагоизвлечения и паропроизводительности.

В образовательном процессе результаты диссертационной работы изучаются обучающимися в рамках дисциплин учебного плана «Машины и оборудование для переработки сельскохозяйственного сырья» и «Технологическое оборудование предприятий отрасли».

Результаты исследований используются кафедрами факультета механизации и пищевых технологий Института «Агротехнологическая академия» ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского» в образовательном процессе при обучении по направлениям подготовки: 19.03.02, 19.04.02 «Продукты питания из растительного сырья», 19.03.03, 19.04.03 «Продукты питания животного происхождения», 35.03.06, 35.04.06 «Агроинженерия, а также 4.3.3 «Пищевые системы» (аспирантура).

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

В периодических изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ:

1. **Gavrilov A.V.** Parameters of Modular Microwave Vacuum Evaporators / **A.V. Gavrilov**, Yu.B. Gerber // Food Processing: Techniques and Technology, 2024, 54(1). Pp. 135-145. doi: 10.21603/2074-9414-2024-1-2495.

2. Исследование влияния режимных параметров ленточной ИК-сушилки на кинетику процесса сушки моркови / **А.В. Гаврилов**, Ю.Б. Гербер // Инженерные технологии и системы, 2023. Том 33, № 3. – С. 417-434. doi: 10.15507/2658-4123.033.202303.417-434.

3. Процессы адресной доставки энергии и тепломассопереноса в системах с нано-, микро- и макроэлементами / **А.В. Гаврилов**, Ю.Б. Гербер // Инженерные технологии и системы, 2023. Том 33, № 1. – С. 128-139. doi: 10.15507/2658-4123.033.202301.128-139.

4. Гербер Ю.Б. Обоснование параметров технологии производства йогурта с добавлением плодов зизифуса / Ю.Б. Гербер, **А.В. Гаврилов** // Инженерные технологии и системы, 2022. Том 32, № 1. – С. 41-53. doi: 10.15507/2658-4123.032.202201.041-053.

5. **Гаврилов А.В.** Экспериментальное моделирование процессов выпаривания водных растворов в условиях вакуума и микроволнового поля // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина» (с 2020 Агроинженерия). – Москва, 2020. Вып. № 1 (95). – С. 41-50. doi: 10.34677/1728-7936-2020-1-41-50.

6. Gerber Yu.B. Machine processing of milk in dairy production / Yu.B. Gerber, **A.V. Gavrilov** // Food Processing: Techniques and Technology, 2019, 49(3). Pp. 375–382. doi: 10.21603/2074-9414-2019-3-375-382.

7. Гербер Ю.Б. Моделирование процесса тепловой обработки жидких продуктов в пластинчатом теплообменнике с использованием комплексной энергозамещающей установки / Ю.Б. Гербер, **А.В. Гаврилов**, Н.С. Киян // Инженерные технологии и системы, 2020. Том 30, № 2. – С. 200-218. doi: 10.15507/2658-4123.030.202002.200-218.

8. **Гаврилов А.В.** Анализ современных энерготехнологий переработки растительного сырья // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина» (с 2020 Агроинженерия). – Москва, 2019. Вып. № 5 (93). – С. 31-39. doi: 10.34677/1728-7936-2019-5-31-39.

9. Gerber Yu.B. Thermal treatment in milk processing: using a complex energy- substitution equipment during preliminary water heating / Yu.B. Gerber, **A.V. Gavrilov**, A.P. Verbitsky // Food Processing: Techniques and Technology, 2019, 48(3). Pp. 124–132. doi: 10.21603/2074-9414-2018-3-124-132.

10. Гербер Ю.Б. Энергетические показатели работы термосмешивающей системы в линии переработки молока с использованием комплексной энергозамещающей установки / Ю.Б. Гербер, **А.В. Гаврилов**, Н.С. Киян // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина» (с 2020 Агроинженерия). – Москва, 2018. Вып. № 6 (88). – С. 65-69.

Патенты на полезные модели:

11. Пат. № 213932 РФ, МПК F 26 В 3/347. Устройство микроволновой вакуум-выпарной установки непрерывного действия / Гербер Ю.Б., Гаврилов А.В.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского». – №2022111823, заявл. 28.04.2022; опубл. 05.10.2022, Бюл. № 28.

12. Пат. № 214723 РФ, МПК F 26 В 3/30, 3/347, 17/04. Устройство комбинированной СВЧ-ИК сушки зерновых / Гербер Ю.Б., Гаврилов А.В.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского». – №2022111822, заявл. 28.04.2022; опубл. 11.11.2022, Бюл. № 32.

В изданиях, индексируемых в международных базах цитирования *Scopus* и *Web of Science*:

13. Burdo O. Electrodynamic apparatuses for solutions' concentration / O.G. Burdo, I.V. Sirotiyuk, N.V. Ruzhitskaya, **A.V. Gavrilov**, D.S. Goncharov // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2022. Т. 58. № 3. Pp. 290-298. doi: 10.3103/S1068375522030073 ISSN: 1068-3755 eISSN: 1934-8002.

14. O. G. Burdo, F. A. Trishyn, S. G. Terziev, **A. V. Gavrilov**, I. V. Sirotiyuk. Electrodynamic Processes as an Effective Solution of Food Industry Problems.

Surf. Engin. Appl. Electrochem. 2021. Vol. 57. pp. 330 – 344. doi: 10.3103/S1068375521030030.

15.O. Burdo, I. Bezbakh, A. Zykov, S. Terziev, **A. Gavrilo**v, I. Sirotiyuk, I. Mazurenko, Yunbo Li. Development of power-efficient and environmentally safe coffee product technologies. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 103. Is. 11. Pp. 6 – 14. doi: 10.15587/1729-4061.2020.194647.

16.Burdo O.G. System of Innovative Energy Technologies of Food Raw Material Dehydration / Burdo O.G., Terziev S.G., **Gavrilo**v A.V., Syrotiyuk I.V., Shcherbich M.V. // Problemele energeticii regionale. 2020. Vol. 46. Is. 2. Pp. 92–107. doi: 10.5281/zenodo.3898317.

17.Burdo O., **Gavrilo**v A., Kashkano M., Levtrynskaya Y., Sirotiyuk I., Pylypenko E., Terziev S. Energy monitoring of innovative energy technologies of plant raw material processing. Problemele energeticii regionale. 2019. Vol. 43. Is. 2. pp. 23–38. doi: 10.5281/zenodo.3367058.

18.Burdo O. Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials / O. Burdo, I. Bezbah, N. Kepin, A. Zykov, I. Yarovyi, **A. Gavrilo**v, V. Bandura, I. Mazurenko // Eastern-European journal of Enterprise Technologies, 2019, 5/11 (101). Pp. 24-32. doi: 10.15587/1729-4061.2019.178937.

19. Gerber J. Optimization of energy costs for drying ferrocene-containing wastes of winemaking / J. Gerber, A. Zavaly, **A. Gavrilo**v, A. Olshevskaya, N. Kian // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, XII International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry 10-13 September 2019, 012014. Pp.1-8. doi: 10.1088/1755-1315/403/1/012014.

20.Gerber Y. Development of curd product technology with the addition of grape seed oil / Y. Gerber, **A. Gavrilo**v, V. Omelchuk, E. Oshchepkova // E3S Web of Conferences 175, XIII International Scientific and Practical Conference “State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2020”, 2020, 08006. doi:10.1051/e3sconf/202017508006.

21.Gerber Y. Improvement of curd mass production technology / Y. Gerber, E. Oshchepkova, **A. Gavrilo**v, D. Ermolin // E3S Web of Conferences 284, Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, 2021, 02014. doi:10.1051/e3sconf/202128402014.

22.Gavrilo

A.V. Study of the features of modeling microwave vacuum evaporation / **A.V. Gavrilo**v, Yu.B. Gerber // BIO Web of Conferences 78, International Scientific-Practical Conference “Modern Trends of Science, Innovative Technologies in Viticulture and Winemaking”, 2023, 78, 06003. doi: 10.1051/bioconf/20237806003.

Статьи и материалы конференции:

23.Burdo O. Experimental studies of the kinetics of infrared drying of spent coffee grounds / O. Burdo, I. Bezbakh, S. Shyshov, A. Zykov, **A. Gavrilo**v, O. Vsevolodov, I. Sirotiyuk, S. Terziev // Technology audit and production reserves. № 1/1 (51), 2020. Pp. 4-10. doi:10.15587/2312-8372.2020.195863.

24. **Гаврилов А.В.** Исследование энерготехнологий процессов обезвоживания растительного сырья // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – Симферополь, 2018. Вып. 16 (179). – С. 82-89.

25. **Гаврилов А.В.** Процессы транспортировки и тепломассопереноса в технологиях переработки пищевого сырья // Ю.Б. Гербер, **А.В. Гаврилов** // Мехатроника, автоматика и робототехника. Санкт-Петербург, 2023. № 11. – С. 101-104. doi:10.26160/2541-8637-2023-11-101-104.

26. **Гаврилов А.В.** Энерготехнологии процессов обезвоживания растительного сырья // Сборник тезисов докладов участников Российской теоретической и научно-практической, юбилейной конференции «Агробιοлогические основы адаптивно-ландшафтного ведения сельскохозяйственного производства» (посвященной 100-летию создания Академии биоресурсов и природопользования). Симферополь, 12-16 октября 2018 г. – С. 150-154.

27. Энерготехнологии процессов обезвоживания растительного сырья / **А.В. Гаврилов**, Е.В. Носова // Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности: сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Повышение и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности», посвященного 110-летию А.Н. Плановского (ISTS «EESTE-2021»): Т. 1 / М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н. Косыгина», 2021. – С. 79-82. DOI: 10.37816/eeste-2021-1-79-82.

28. Бурдо О.Г. Гибридные процессы транспортировки и тепломассопереноса в системах с нано-, микро- и макроэлементами / О.Г. Бурдо, **А.В. Гаврилов**, И.В. Сиротюк, И.И. Яровой // Тезисы докладов и сообщений. XVI Минский международный форум по тепло- и массообмену XVI Minsk International Heat and Mass Transfer Forum 16–19 мая 2022 г. Научное электронное издание. – Минск, 2022. – С. 727-730.

Учебные пособия:

29. Гербер Ю.Б. Технология и оборудование переработки и хранения сельскохозяйственной продукции / Ю.Б. Гербер, **А.В. Гаврилов**, С.В. Чунихин, В.М. Ковтун // Симферополь, «СОНАТ», 2009. – 416 с.

30. Гербер Ю.Б. Машины и оборудование для переработки сельскохозяйственной продукции / Ю.Б. Гербер, **А.В. Гаврилов**, Д.В. Ермолин, С.В. Чунихин // Симферополь: ПОЛИПРИНТ, 2020. – 436 с. Рекомендовано гриф Ученого совета ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского» № 15 от 21 ноября 2019 г.

Гаврилов Александр Викторович

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать 11.04.2025. Формат 60х84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ № 32/1-2025.

Напечатано с оригинал-макета заказчика в типографии ИП Гальцовой Н.А.
Российская Федерация, Республика Крым, г. Симферополь,
пгт. Аграрное, ул. Парковая, 7, кв. 908
E-mail: nisfo@mail.ru Тел. +7 (978) 781-38-81