ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КРЫМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В. И. ВЕРНАДСКОГО»
ИНСТИТУТ «АГРОТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»

На правах рукописи

ГАВРИЛОВ АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ

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

4.3.3 – Пищевые системы

Диссертация
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор техн. наук, профессор
Гербер Юрий Борисович

Симферополь – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 8

РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩЕГО СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ СЫРЬЯ 16

1.1. Проблемы обеспечения населения фруктами и овощами 17

1.2. Рынок концентрированных соков 20

1.3. Проблемы концентрирования жидких продуктов 24

1.4. Производство сушеных фруктов и овощей 28

1.4.1. Сушка с использованием энергии солнца 31

1.4.2. Конвективная сушка 32

1.4.3. Диэлектрическая сушка 34

1.4.4. Инфракрасная сушка 41

1.4.5. Ультразвуковая сушка 45

1.5. Применение возобновляемой энергии в процессах термообработки 46

1.6. Теплоэнергетический аудит предприятий 49

1.7. Анализ научно-технических противоречий и формулировка научной гипотезы 56

ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 1 59

РАЗДЕЛ 2. МЕТОДИКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ 61

2.1. Методологические основы исследований 61

2.2. Системный анализ технологических комплексов для производства концентрированных пищевых продуктов 63

2.2.1. Методы системного моделирования энерготехнологических комплексов 63

2.2.2. Методика проведения энергетического менеджмента пищевых технологий 65

2.3. Характеристика объектов исследования 68

2.4. Методы исследования энергетических характеристик 73

2.5. Методы экспериментальных исследований процессов сушки и выпаривания 75

2.5.1. Методика экспериментального моделирования процессов сушки 75

2.5.2. Методика экспериментального моделирования процессов выпаривания 81

2.5.3. Методики стендовых исследований СВЧ вакуум-выпарной установки 87

2.6. Методики определения качественных характеристик продуктов 88

2.7. Оценка погрешностей измерений 89

ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 2 90

РАЗДЕЛ 3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ СЫРЬЯ ПУТЕМ АДРЕСНОЙ ДОСТАВКИ ЭНЕРГИИ К ПОЛЯРНЫМ МОЛЕКУЛАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ СВЧ И ИК ДИАПАЗОНОВ 91

3.1. Методы математического моделирования процессов обезвоживания . 91

3.2. Концептуальная модель обезвоживания в электромагнитных полях ... 94

3.2.1. Формулировка научно-технических гипотез 94

3.2.2. Механизм процесса обезвоживания в инновационной установке . 95

3.3. Особенности моделирования процессов обезвоживания в условиях электромагнитного поля 99

3.3.1. Энергетика и статика комбинированных технологий обезвоживания 100

3.3.2. Особенности моделирования кинетики процесса сушки при граничных условиях II рода 102

3.3.3. Особенности моделирования процесса выпаривания при граничных условиях II рода 105

3.4. Математическое моделирование процессов выпаривания в условиях электромагнитного поля 108

3.4.1. Параметрическая модель процессов выпаривания в СВЧ ВВУ ... 108

3.4.2. Формирование нестационарной математической модели процесса выпаривания при граничных условиях II рода 110

3.4.3. Преобразование краевой задачи в модель обобщенных переменных 113

3.5. Математическое моделирование сушки в условиях электромагнитного поля СВЧ и ИК диапазона 115

3.5.1. Постановка задачи моделирования 115

3.5.2. Математическая модель сушки в электромагнитном поле 118

3.5.3. Приведение краевой задачи сушки к модели в обобщенных переменных 121

3.6. Задача сравнения эффективности различных видов сушки 126

3.7. Задачи экспериментального моделирования 129

ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 3 131

РАЗДЕЛ 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ В ЭМП С ПРИМЕНЕНИЕМ ИННОВАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ 132

4.1. Сушка растительного сырья в неподвижном слое в ИК поле 132

4.1.1. Кинетика сушки овощей и фруктов 132

4.1.2. Анализ результатов исследований 163

4.1.3. Сравнение энергетических затрат конвективной и ИК сушки 171

4.2. Сушка растительного сырья в неподвижном слое в СВЧ поле 174

4.2.1. Кинетика сушки овощей и фруктов в СВЧ поле 174

4.2.2. Анализ результатов исследований сушки в СВЧ поле 186

4.3. Результаты влияния вида электромагнитного поля на процесс сушки 189

4.4. Стендовые исследования ленточной сушилки с комбинированным ИК и СВЧ энергоподводом 191

4.4.1. Коэффициент диффузии 204

4.5. Исследование процесса выпаривания в условиях СВЧ поля в вакууме 206

4.5.1. Кинетика выпаривания продуктов в условиях СВЧ поля 206

4.5.2. Обобщение результатов исследований 217

4.6. Стендовые исследования СВЧ модуля вакуум-выпарной установки . 233

4.6.1. Результаты стендовых исследований статики СВЧ вакуум-выпарного модуля 233

4.6.2. Результаты экспериментальных исследований СВЧ вакуум-выпарного модуля 236

4.6.3. Испытание модуля в режиме полунепрерывной работы 253

4.6.4. Испытание модуля в режиме непрерывной работы 254

4.6.5. Обобщение результатов исследований 256

ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 4 263

РАЗДЕЛ 5. АЛГОРИТМЫ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ И ОПТИМИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ АПРОБАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ 266

5.1. Методика конструктивного расчета ленточной СВЧ–ИК сушилки 266

5.2. Разработка пилотной установки многозонной комбинированной ленточной СВЧ–ИК сушилки 273

5.3. Энергетические характеристики разработанной сушилки 277

5.4. Апробация промышленного образца ленточной СВЧ–ИК сушилки .. 277

5.5. Экономический эффект внедрения инновационного оборудования на производстве 278

5.6. Инженерная методика расчета и оптимизации СВЧ вакуум-выпарных установок 282

5.6.1. Геометрия рабочего объема 284

5.6.2. Режимные параметры модуля 292

5.6.3. Определение паросодержания кипящего раствора 297

5.7. Разработка пилотной СВЧ вакуум-выпарной установки 300

5.7.1. Принципиальная схема инновационной СВЧ вакуум-выпарной установки 300

5.7.2. Предлагаемая конструкция СВЧ вакуум-выпарной установки 304

5.7.3. Конструкция стенда для исследований СВЧ вакуум-выпарной установки 306

5.8. Энергетические характеристики разработанной СВЧ вакуум-выпарной установки 308

5.9. Исследование бизнес-перспектив разработок 311

5.10. Качественные характеристики продуктов, полученных при сушке и выпаривании в электромагнитном поле 318

ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 5 322

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 324

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ 327

РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ НАУЧНОГО ПРОЦЕССА 328

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 329

ПРИЛОЖЕНИЯ 377

ВВЕДЕНИЕ

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 непременным 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 сырье, 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 процессов 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 исследований:

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 обобщенных переменных, 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. Впервые 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 на процесс обезвоживания сельскохозяйственного сырья в ЭМП СВЧ и ИК диапазонов, совокупное действие которых усиливает теплопередачу за счёт разных движущих сил: бародиффузионных – для снижения внутреннего диффузионного сопротивления и конвективных – для удаления влаги с поверхностного слоя сырья. Подвод энергии непосредственно к влаге по всему объему сырья осуществляется микроволновыми источниками (генераторами СВЧ поля), а поверхностный – инфракрасными (генераторами ИК поля).

Обоснован процесс бародиффузии при подводе энергии ЭМП СВЧ диапазона к полярным молекулам сырья, движущей силой которого является возникновение гидродинамического потока в капиллярах за счёт разности давлений внутри капилляра, при образовании в нём пара, и на его поверхности, что приводит к разрыву клеток капилляра и выбросу пара и жидкости. Отсутствие градиента влагосодержания обеспечивает экономию теплоты фазового перехода жидкости в пар.

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 эксперементальные 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 электромагнитном поле СВЧ-ИК диапазонов.

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

Впервые 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 ºС 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 электромагнитном поле 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.

Автор занимался разработкой теоретических моделей процессов обезвоживания сельскохозяйственного сырья путем адресной доставки энергии к полярным молекулам в ЭМП, проводил экспериментальные исследования, разработал алгоритмы инженерных расчетов и оптимизации оборудования, провел производственную апробацию режимов и параметров технологии выпаривания и сушки с применением инновационного оборудования, провел технико-экономическую оценку и предложил рекомендации производству и научно-образовательному процессу, занимался публикацией научных статей. 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, TPACEE-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. Общий объем публикаций по теме диссертации составил 68,05 печатных листа, соискателю из них принадлежит 37,43 печатных листа.

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

РАЗДЕЛ 1.
АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩЕГО СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ СЫРЬЯ

В современном мире остро стоит проблема обеспечения человека продуктами питания, которые способствуют укреплению его здоровья в целом и иммунитета в частности. К разряду таких продуктов относятся фрукты и овощи, а также натуральные соки из них. С точки зрения потребления фрукты – это растительные продукты с ароматным вкусом, которые естественно сладкие или обычно подслащенные перед употреблением [339]. Помимо придания вкуса и разнообразия рациону человека, они служат важными и незаменимыми источниками витаминов и минералов, хотя они не являются основными источниками белка, жира и энергии. То же самое верно и в случае с овощами, которые также играют важную роль в питании человека, поставляя дефицитные компоненты и добавляя разнообразие в рацион [340]. Практически весь пищевой витамин С, важный компонент человеческого рациона, получают из фруктов и овощей, некоторые из которых богаты провитамином А (b-каротином) (например, манго, морковь и т. д.). Они являются важными поставщиками кальция, фосфора и железа. Углеводы во фруктах и овощах и представлены в виде низкомолекулярных сахаров или высокомолекулярных полимеров, таких как крахмал. Целлюлоза, гемицеллюлоза, пектиновые вещества и лигнин, характерные для растительных продуктов, вместе образуют пищевые волокна, значение которых в рационе человека трудно переоценить.

Фруктовые и овощные соки обеспечивают широкий спектр микроэлементов, которые хорошо подходят для здорового питания. Данные исследований показывают, что потребители, которые употребляют 100 % фруктовый сок в

умеренных количествах, имеют более здоровый образ жизни и более позитивные результаты в отношении здоровья в целом [303].

Как и все фрукты и овощи, соки богаты калием, магнием, фолиевой кислотой, витамином А и витамином С. В исследовании, в котором сравнивались люди, потреблявшие соки (100 % из фруктов) с теми, кто этого не делал, было обнаружено, что потребители сока имеют более адекватное потребление питательных веществ [304]. Соки также содержат другие биодоступные растительные компоненты, такие как полифенолы; соединения, обладающие сильной антиоксидантной и противовоспалительной активностью. Даже диетическое волокно может быть частью сока. Благодаря высоким уровням витамина С, потребление сока способствует нормальному функционированию иммунной системы и способствует увеличению поглощения железа. В целом, соки обеспечивают легкий для употребления напиток с широким спектром полезных компонентов, естественно полученных из фруктов, особенно по сравнению с безалкогольными напитками.

1.1. Проблемы обеспечения населения фруктами и овощами

В связи с вышесказанным, фрукты и овощи приобрели коммерческое значение, и их рост в коммерческих масштабах стал важным сектором сельскохозяйственной промышленности. В последнее время мировое производство фруктов и овощей существенно возросло благодаря прогрессу в области сельскохозяйственных технологий. Следовательно, растет процент продукции, требующей подходящих методов послеуборочного хранения и обработки для обеспечения увеличения срока годности [273]. Также увеличивается производство и потребление переработанных фруктов и овощей.

Текущее мировое производство фруктов по данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации (ФАО) в 1999 г. составляло около 444,65 млн тонн (т) [201]. Китай с производством 59,5 млн т (13,4 %) является

ведущим производителем фруктов в мире. Второе место занимает Индия с 38,56 млн т (8,7 %), за ней следуют Бразилия (8,45 %), США (6,4 %) и Италия (4,3 %). При этом мировое производство фруктов неуклонно растет и в 2022 году уже составило более 800 миллионов тонн. На текущий момент рост мирового производства фруктов составляет около 3 % в год. В лидерах производства остается Китай, с 20 % всего мирового объема производства, далее идут Индия (13 %), Бразилия (6 %), США (4 %) и Индонезия (3 %) [232]. Производство фруктов в России более 2,5 миллионов тонн в год, в основном – семечковые культуры, такие как яблоки, груши, и др.

Мировое производство овощей составляет около 628,75 млн тонн. Основными странами-производителями овощей были Китай, Индия, США, Турция, Италия, Япония и Испания. Китай был крупнейшим производителем, на который приходилось около 250,0 млн т (39,8 %), тогда как Индия была на втором месте с долей около 59,4 млн т (9,45 %).

В 2020 году Российский импорт свежих фруктов и овощей составил 7 млн тонн. Основу импорта составляют фрукты, которые не могут выращиваться в России в силу природно-климатических условий. В последние годы наблюдается тенденция к снижению объемов импорта фруктов и реализации программы импортозамещения. Сложившаяся ситуация требует уделить максимальное внимание вопросам сохранности и эффективной переработки произведенной отечественной продукции.

Большинство фруктов и овощей содержат более 80 % воды и поэтому являются скоропортящимися. Потери вследствие гниения составляют большую часть их потерь, которые, по оценкам, составляют более 30–40 % в развивающихся странах в тропиках и субтропиках из-за ненадлежащих условий обращения, транспортировки и хранения [339]. Также серьезные потери действительно происходят в качественном составе продукта, а именно потери основных питательных веществ, особенно витаминов и минералов.

Необходимость сокращения потерь скоропортящихся продуктов после уборки урожая имеет первостепенное значение для повышения их доступности, особенно

в нынешних условиях, когда ограничения на производство продуктов питания (земли, воды и энергии) постоянно возрастают. Все больше осознается, что одного лишь производства большего количества продуктов лучшего качества недостаточно и что оно должно идти рука об руку с подходящими методами послеуборочной консервации, чтобы минимизировать потери, тем самым увеличивая запасы и доступность питательных веществ, а также создавая экономический стимул для производства [339].

Одной из основных целей обработки или консервирования пищевых продуктов является превращение скоропортящихся продуктов, таких как фрукты и овощи, в стабилизированные продукты, которые можно хранить в течение длительных периодов времени, чтобы уменьшить их послеуборочные потери. Переработка увеличивает доступность сезонных товаров, сохраняя их питательную и эстетическую ценность, и добавляет разнообразия к однообразной диете.

Переработка фруктов и овощей позволяет создавать удобные и готовые к употреблению полуфабрикаты и пищевые концентраты, потребление которых на душу населения быстро увеличилось во всем мире за последние два-три десятилетия. Производство пищевых концентратов возникло в Советском Союзе в начале 30-х годов и в первое же десятилетие перешло в самостоятельную отрасль промышленности. В годы Великой Отечественной войны усилилось развитие промышленности пищевых концентратов. В послевоенное время пищеконцентратные предприятия были технически перевооружены, значительно расширился ассортимент продукции, совершенствовались технологии производства. В настоящее время пищевые концентраты превратились в продукцию массового потребления. Это позволяет расширить рынки фруктов и овощей.

Основными группами пищевых концентратов являются: сухие завтраки, сухой картофель в виде муки, хлопьев и гранул; готовые пищевые продукты из злаков; макаронные изделия, прошедшие тепловую обработку; супы, бульоны и заготовки для их приготовления; сладкие палочки и соленые снеки; продукты быстрого приготовления; кондитерские изделия и десерты; гранулированный растворимый

кофе; какао; напитки с добавлением лекарственных растений, кисели, плодово-ягодные и овощные соки, зерновые и пряно-ароматические настойки и концентраты. Также к жидким концентрированным системам можно отнести томат-пасту и сгущенное молоко.

Таким образом в проблеме обеспечения населения иммунно-укрепляющими продуктами питания можно выделить 2 направления:

– обеспечение продолжительного хранения овощей и фруктов;

– производство концентрированных фруктовых и овощных соков.

1.2. Рынок концентрированных соков

Натуральный фруктовый концентрированный сок – это жидкий пищевой продукт, полученный с помощью переработки сока прямого отжима, из которого удалили воду, в количестве достаточном для того, чтобы повысить значение числа Брикса на 50 % от значения числа Брикса в восстановленных соках из того же вида фруктов.

Жидкие концентраты овощных и фруктовых соков могут быть использованы как в качестве одного из основных ингредиентов при восстановлении соков, сокосодержащих напитков, нектаров, так и в качестве натурального красителя. Эти концентраты не имеют индекса «Е», что позволяет с успехом применять их в детском и оздоровительном питании. Особенно актуальны концентраты с окрашивающим эффектом типа: сок черной смородины, бузины, кожуры винограда, гибискуса, моркови, свеклы, черной моркови и другие. Их успешно применяют в производстве соков и соковых напитков на основе овощей и фруктов. Также очень интересная линейка концентратов овощей, усиливают восприятие конечного продукта и его ингредиентов, например, соки чеснока, лука, паприки, петрушки и другие.

Для производства концентратов применяют как натуральные, так и сульфитированные (консервированные сернистым ангидридом) соки. Экстракты из

сульфитированных соков, выпускают только I сортом и в основном используют для промышленной переработки, например, для производства сухих киселей. Наименование концентрат получает по наименованию сока, из которого он изготовлен (например, клюквенный, вишневый). Использование купажированных соков в производстве концентратов запрещается. Не допускается также добавление в концентраты различных веществ, в том числе искусственных красителей, сахарозы, декстрина и любых пищевых кислот.

Одним из наиболее важных параметров в производстве фруктовых соков является уровень сахара и уровень сухих веществ, измеренный в градусах Брикс (в процентах по весу в растворе). Кислотное содержание является еще одним важным показателем качества. Поэтому большое значение трейдерами и их клиентами, такими как оптовые или розничные торговцы придается соотношению этих двух значений, то есть соотношению сладкий/кислый (отношение Брикс/кислота). В целом европейцы в южной части Европы предпочитают более сладкие фрукты, чем северные европейцы.

По внешнему виду концентраты после разведения их водой должны представлять собой прозрачную жидкость, которая не дает в течение двухчасового стояния осадка. Рябиновый, черничный и голубичный экстракты могут быть непрозрачными.

В концентратах I сорта допускается не более 0,3 % по массе легко отфильтровываемого осадка пектиновых и белковых веществ. В вишневом и яблочном концентратах может быть небольшой осадок солей органических кислот в виде растворимых кристаллов. Вкус и запах концентратов должен соответствовать сокам, из которых они изготовлены. Все концентраты должны иметь полную растворимость в воде, в них не допускается присутствие посторонних примесей. Срок хранения фруктовых концентрированных соков зависит от температуры хранения концентрата, начиная от года при температуре 10 °С, и, чем температура ниже, тем срок хранения выше, но при нарушении температурного режима срок резко снижается.

Рынок фруктов и фруктовых соков специфичен тем, что часто основные потребители продукции находятся на значительном удалении от места произрастания этих продуктов. Также для многих продуктов характерна сезонность их производства. В связи с этим в мировой экономике широко развит рынок концентрированных соков.

Имеет место обширная и разнообразная международная торговля соковыми концентратами, поставляемыми из разных стран мира. Большинство торговых потоков фруктовых соков в Европу и Россию составляют жидкие концентраты, которые необходимо перерабатывать потребителям конечных продуктов. Таким образом, плоды собирают в стране происхождения, из фруктового сока удаляют воду для поддержания качества, продления срока годности и сокращения расходов на транспортировку и хранение. Остаток представляет собой концентрат фруктового сока, который может быть отправлен в страну назначения. Концентраты можно транспортировать при температуре окружающей среды или заморозить (при t = 18 °C).

Хотя импорт фруктовых соков внутри ЕС выше, чем внешний импорт, наибольшая часть включает реэкспорт импортных фруктовых соков из развивающихся стран.

В диапазоне крупнейших поставщиков фруктовых соков из развивающихся стран, которые завоевывают долю рынка ЕС в последние годы являются: Молдова (концентрированный яблочный сок), Чили (менее 20 °Brix яблочный сок), Украина (концентрированный яблочный сок) и Филиппины (смеси соков).

Типы фруктовых соков с наибольшим ростом импорта в ЕС – это апельсиновые и яблочные соки NFC, а затем концентрированный виноградный сок, который часто используется в «без сахара» фруктовых продуктах в качестве подсластителя.

Наибольшую долю экспорта составляет реэкспорт апельсинового сока. Также значительная доля яблочного сока.

Крупнейшей страной-потребителем фруктов и нектаров в ЕС в 2014 году была Германия (2 405 миллионов литров), за которой следуют Франция, Великобритания,

Испания и Польша. Однако страной с наибольшим потреблением фруктовых соков в ЕС на душу населения является Мальта с ежегодным потреблением 33,6 литра на человека, за которой следуют Германия, Нидерланды, Финляндия и Кипр. Самые популярные ароматы – апельсиновые (38,8 %), ароматические смеси (19 %), яблони (14,9 %), ананасы (3,6 %) и персик (3,5 %). Европа является крупным производителем фруктовых соков, но производство концентратов фруктовых соков ограничено.

По данным Елисеевой [65] Россия потребляет около 20–22 л сока на человека в год, что в 1,5 раза меньше европейского потребления из чего следует, что российский соковый рынок далек от насыщения. Объем производства натуральных осветленных и концентрированных соков в России в 2021 г. составил 3,86 млрд л. При этом объем импорта натуральных и концентрированных соков составил 1,23 млрд л. Ограничение развития производства соков связано с тем, что значительная часть восстановленных соков производится из импортных концентратов. Несмотря на то, что в последнее время наметилась тенденция к смещению потребительского спроса в сторону натуральных соков прямого отжима, необходимость производства концентрированных соков остается актуальной в связи с ограниченностью регионов произрастания продукции и, следовательно, значительными транспортными расходами на доставку сока потребителю. Сезонность производства фруктов и овощей также обеспечивает экономическую привлекательность хранения соков в концентрированном виде. Кроме того, снижение спроса на восстановленные соки отчасти связано с недоверием потребителя к качеству импортных концентратов. Производство качественных отечественных концентратов может способствовать обеспечению населения качественными и недорогими отечественными восстановленными соками.

1.3. Проблемы концентрирования жидких продуктов

Концентрированный продукт получают путем удаления из него части воды. Основными способами удаления части воды из жидкого продукта является выпаривание, вымораживание и мембранные методы разделения. Анализ литературы показал, что, несмотря на значительные преимущества, мембранные методы разделения применяются, в основном, для очистки продуктов и не являются эффективными для достижения высоких концентраций продукта при крупнотоннажном производстве [8, 9, 100, 102, 330]. Концентрирование соков вымораживанием основано на том, что кристаллизуется растворитель, а растворенные вещества (сахара, кислоты и др.) остаются в растворе. Концентрирование вымораживанием позволяет сохранить свойства исходного продукта. Это направление является перспективным и нашло отражение во многих работах [9, 18, 101, 200]. Одним из новых направлений в криоконцентрировании является блочное вымораживание [9, 18, 101, 200]. Специфика технологий криоконцентрирования приводит к значительному усложнению промышленных установок, обеспечивающих непрерывный процесс криоконцентрирования, или к необходимости организовывать периодический процесс с соответствующими затратами. Выпаривание является одним из наиболее распространенных методов концентрирования и считается наиболее разработанным и экономичным [144, 187, 203]. Несмотря на то, что теплота фазового превращения воды в пар на порядок больше теплоты превращения воды в лед, современные выпарные установки позволяют достичь уровня энергозатрат, который можно сравнить с лучшими технологиями криоконцентрирования. Существует возможность частично улавливать в дистилляционной колонне ароматические вещества. Однако из-за того, что не удается избежать термического разложения некоторых компонентов, вызываемое ферментативными реакциями уже при 50–70 °C, в последнее время большое распространение получили вакуум-выпарные установки (ВВУ).

Традиционным путем повышения энергетической эффективности процесса при сохранении качества продукта является использование многоступенчатых ВВУ [21, 347]. Если вторичный пар, образовавшейся под действием первичного источника энергии, использовать в качестве греющего во втором корпусе аппарата, расход энергии сократится примерно на 50 %.

Тот же принцип можно использовать в следующих корпусах и сэкономить еще больше энергии [255, 280]. Однако с увеличением числа корпусов, разница температур в каждом корпусе уменьшается. По этой причине греющие поверхности каждого корпуса нужно увеличить, чтобы обеспечивать необходимую производительность по выпаренной влаге при меньшей разности температур. На практике можно считать, что площадь поверхностей теплообмена во всех корпусах растет пропорционально числу корпусов. Итак, капитальная стоимость установки значительно увеличивается, а дополнительная экономия энергии уменьшается. Так, в трехступенчатом аппарате расход энергии сократится в среднем на 67 %, в четырехступенчатой – на 75 %. Также для снижения затрат энергии на процесс используется и энергия отводимого вторичного пара [86].

Как видно энергия, подводится в установку с греющим паром, удаляется из нее вместе с конденсатом вторичного и греющего пара, а также отводится в конденсаторе. Оценить соотношение подведенной и отведенной энергии позволяют диаграммы энергетических потоков.

Существуют схемные решения организации работы ВВУ, основанные на применении различных вариантов устройств по сжатию вторичного пара и возвращение его в качестве источника тепла, такие как использование эжекторов [69, 316], применение компрессоров или газодувок [168], и различные их вариации.

Эффективность такого пути решения проблемы энергосбережения сильно зависит от экономических показателей этих устройств: в частности коэффициент полезного действия (КПД). Этот параметр достаточно мал для эжекторов. В не меньшей степени, это зависит от уровня отработки этих устройств и данных по их стоимости. Так паровые эжекторы работают по принципу струйного насоса. В них нет движущихся частей, исключается механический износ.

Преимуществом паровых эжекторов является простота устройства, дешевизна и надежность в работе. Применение парового эжектора аналогично дополнительного корпуса выпарного аппарата. Однако КПД его невысокий и составляет не выше 40–50 %.

Повторное использование скрытого тепла с помощью механической рекомпрессии является наиболее технологичным способом эксплуатации выпарных аппаратов [168]. Количество электрической энергии, необходимой для сжатия вторичного пара до давления греющего пара, значительно меньше энтальпии вторичного пара (то есть меньше энергии, которую несет в себе вторичный пар). Принцип действия такого устройства аналогичен с тепловым насосом. Энергия конденсата пара часто используется для подогрева исходного раствора. Повторное использование тепловой энергии достигает 95 %. Некоторое количество тепловой энергии рассеивается, обычно отводится охлаждающей водой через конденсатор. В зависимости от условий может потребоваться добавление небольшого количества свежего пара или конденсация небольшого количества избыточного пара для поддержания такой схемы, поскольку сам выпарной аппарат реутилизирует теплоту конденсации для обеспечения стационарных рабочих условий. В качестве машин для сжатия пара в выпарных установках используются высоконапорные воздуходувки или турбокомпрессоры. Дополнительные капиталовложения в устройства для механического сжатия делают выпарные аппараты с механической рекомпрессией вторичного пара (МРП) более дорогими, чем выпарные аппараты с термической рекомпрессией вторичного пара (ТРП). На мировом рынке лидерами по производству испарительных установок с механической рекомпрессией пара являются фирмы Veolia Italia (Италия), GEA Wiegand (Германия). Данные установки отлично зарекомендовали себя при разрежении до 0,4 атм. Однако для условий более глубокого вакуума применения установок с механической рекомпрессией становится менее эффективным из-за повышения как капитальных, так и эксплуатационных расходов.

В последние годы оказались популярными и перспективными схемы обеспечения работы вакуум-выпарных установок (ВВУ) на основе использования

тепловых насосов (ТН) в качестве источников подвода тепла, которые, при соблюдении требований технологии, могут решать и задачи отвода тепла, возникающих в ВВУ, связанные с конденсацией вторичного пара, образующегося как побочный результат при испарении [168, 317]. Такой аппарат использует два источника (горячий и холодный) для испарения и конденсации влаги. Необходимые тепло и холод создаются встроенным тепловым насосом (компрессор циркулирует хладагент). Потребление энергии снижается примерно в 5 раз, поскольку большая часть энергии (скрытая теплота) утилизируется для выработки нового пара. Уровень потребления электроэнергии зависит от компрессии промежуточной среды и представляет энергию, необходимую для повторного использования. В зависимости от температуры продукта, поступающего на выпаривание, используется или дополнительная теплота от горячего источника, или холод от холодного. Однако, основной проблемой выпарных аппаратов остается то, что с повышением концентрации раствора растёт его вязкость, интенсивность циркуляции раствора в аппарате снижается, растёт термическое сопротивление пограничного слоя и его температура. Удачных решений этой проблемы не найдено. На практике ограничиваются значением конечной концентрации готового продукта (от 25 до 60 %).

В настоящее время перспективным представляется использование электромагнитной энергии СВЧ диапазона для концентрирования растворов с полярным растворителем [121, 155, 160, 235, 270]. Особенностью нагрева продукта в СВЧ поле является его объемное действие и отсутствие теплопередающей поверхности [208]. Указано, что при микроволновом воздействии, энергия подводится непосредственно к молекулам воды в продукте, так как сухие вещества, как правило, радиопрозрачны [15, 204, 363]. Очаги парообразования возникают во всем объеме и выполняют функцию греющей поверхности. Таким образом, эквивалентная площадь поверхности теплообмена должна возрастать на порядки. Отсутствие требования теплопроводности к стенкам аппарата в котором концентрируется продукт стимулирует его применение для концентрирования агрессивных сред. Так предложено использовать аппараты с микроволновым

подводом энергии для концентрирования кислот и газов [64, 98, 344]. В работах китайских ученых предлагается использовать СВЧ аппарат для непрерывного концентрирования яблочного сока [211]. Микроволновое концентрирование позволяет увеличить производительность, коэффициент концентрирования и эффективность, но наблюдалось снижение качества соков, из-за резкого возрастания температуры, и возникновения локальных зон перегрева [197, 211, 274, 296]. Также было проведено сравнение концентрирования гранатового и виноградного соков в условиях вакуума при использовании микроволнового подвода энергии с традиционной технологией концентрирования [186, 224, 360, 392]. Показано, что микроволновой нагрев позволяет получить продукцию более высокого качества за счет сокращения времени проведения процесса. Аналогичные сравнения были проведены и при концентрировании яблочного, апельсинового и ананасового соков [138–140, 142, 169, 185, 264]. Также было отмечено увеличение степени концентрирования и качества полученного концентрата. Для концентрирования поликомпонентных овощных смесей предложена технология двухстадийного вакуум-выпаривания с целью сохранения в них термолабильных веществ [105]. Показанные преимущества позволяют сделать вывод о перспективности использования вакуум-выпарных установок с подводом СВЧ энергии для производства высококачественных концентратов фруктовых и овощных соков. Однако имеющиеся в литературе данные описывают только некоторые лабораторные исследования, которые показывают возможность применения данной технологии, но не дают методик для определения режимных и конструктивных параметров промышленных вакуум-выпарных установок с подведением СВЧ энергии.

1.4. Производство сушеных фруктов и овощей

В промышленных масштабах для консервирования фруктов и овощей использовалось несколько технологических процессов; основные из них –

консервирование, замораживание и обезвоживание. Среди них обезвоживание предлагает высокоэффективные и практичные средства консервации для снижения послеуборочных потерь и компенсации дефицита продукции.

Техника обезвоживания, вероятно, самый старый метод консервации пищи, практикуемый человечеством. Удаление влаги предотвращает рост и размножение микроорганизмов, вызывающих гниение, и сводит к минимуму многие разрушительные реакции, вызванные воздействием влаги. Это значительно снижает вес и объем, сводит к минимуму затраты на упаковку, хранение и транспортировку, а также обеспечивает возможность хранения продукта при температуре окружающей среды. Эти особенности особенно важны для развивающихся стран, а также при приготовлении пищи для военных и в космических продуктах.

Резкий рост затрат на энергию способствовал резкому росту интереса к сушке во всем мире за последнее десятилетие [286, 313, 322, 337, 408]. Достижения в технологиях и разработка новых методов сушки стали доступными для широкого спектра обезвоженных продуктов, особенно для мгновенно восстанавливаемых ингредиентов, из фруктов и овощей со свойствами, которые невозможно было предвидеть несколько лет назад. Рост популярности пищеконцентратов вызвал потребность в таких ингредиентах. В связи с изменением образа жизни людей сейчас существует большой спрос на широкий ассортимент сушеных продуктов с упором на высокое качество и свежесть [281, 288, 309, 321, 328, 411].

Процесс сушки включает в себя использование тепла для испарения влаги и некоторых средств удаления водяного пара после его отделения из тканей фруктов и овощей [117, 176]. Следовательно, это комбинированная и одновременная операция тепломассообмена, для проведения которой необходимо подавать энергию. Таким образом, сущность процесса сушки заключается в подводе теплоты к высушиваемому продукту, извлечении влаги из его внутренних слоев на поверхность и удалении этой влаги в виде паров в окружающую среду. Согласно классификации методов тепловой сушки, в основу которой положен способ подвода теплоты к высушиваемому материалу, различают следующие основные виды

сушки: конвективная, кондуктивная, под воздействием энергетических полей, комбинированные способы [45–47, 51, 67, 80, 82, 83, 92, 94, 118, 134].

Существует несколько типов сушилок и методов сушки, используемые для удаления влаги из самых разных фруктов и овощей, каждый из них имеет определенные преимущества для конкретной ситуации [350]. Так естественная сушка на солнце плодовых культур все еще практикуется для некоторых фруктов, таких как чернослив, виноград и финики, процессы атмосферной дегидратации используются для яблок, чернослива и некоторых овощей. Установки, реализующие непрерывные процессы сушки, такие как туннельные сушилки, ленточные сушилки и сушилки в псевдоожиженном слое, в основном используются для овощей [275, 291, 353, 398, 410]. Распылительная сушка подходит для концентратов фруктовых соков [135, 320, 345], а процессы вакуумной дегидратации – для фруктов с низким содержанием влаги и высоким содержанием сахара [289].

Факторы, от которых зависит выбор конкретной сушилки или метода сушки, включают форму сырья и его свойства, желаемую физическую форму и характеристики продукта, необходимые условия эксплуатации и эксплуатационные расходы. Наиболее распространенными применительно к фруктам и овощам являются три основных типа процессов сушки: инфракрасная и конвективная сушка [298, 307, 355, 399]; конвективная сушка, которая включает установки периодического действия, такие как сушильные камеры, и шкафные сушилки и установки непрерывного действия (туннельные, ленточные, установки для сушки в псевдоожиженном слое, в фонтанирующем слое, распылительные, барабанные) [114, 343, 380]; установки с СВЧ нагревом [299, 310, 323, 378]; и обезвоживание под вакуумом. Недавно для обезвоживания стали использоваться и такие низкотемпературные и низкоэнергетические процессы, как осмотическая дегидратация [113].

1.4.1. Сушка с использованием энергии солнца

Одним из старейших способов использования солнечной энергии для сохранения излишков сельскохозяйственного производства со времен зарождения цивилизации была сушка. Кроме того, это был самый дешевый способ консервации, с помощью которого активность воды снижалась до необходимого уровня, чтобы не происходило порчи продукции. Он использовался в основном для сушки фруктов, таких как виноград, чернослив, финики и инжир. Этот метод прост, однако его использование вызвало много технических проблем, связанных с традиционным способом сушки на прямых солнечных лучах. Эти проблемы включают влияние погодных условий, таких как дождь и облачность; возможное засорение продукта пылью, заражение насекомыми, порча его птицами и животными; отсутствие возможности управления условиями сушки; и возможность химической, ферментативной и микробиологической порчи из-за длительного времени сушки. Недавнее повышение стоимости ископаемого топлива, связанное с истощением запасов и дефицитом, привело к возобновлению интереса к сушке на солнце.

H.R. Bolin и D.K. Salunkhe провели исчерпывающий обзор методов сушки как с использованием только солнечной энергии, так и с дополнительным источником энергии, а также обсудили вопросы сохранения качества (питательных веществ) и экономические аспекты проведения процесса [133]. Они предположили, что для производства высококачественной экономически выгодной продукции сушка должна быть быстрой. Время сушки можно сократить двумя основными способами: повышая температуру продукта до такой степени, чтобы влага могла легко испаряться, в то же время постоянно удаляя влажный воздух, и обрабатывая продукт, подлежащий сушке, таким образом, чтобы препятствия для влаги, например, плотные гидрофобные слои кожи или длинные пути миграции воды были сведены к минимуму. Развитие сушки фруктов и овощей с использованием энергии солнца до 1990 года было рассмотрено Джаяраманом Н. и Дас Гуптой [240].

В 2010 году этим вопросом занимались Гербер Ю.Б. и Завалий А.А. [33, 40, 42, 70–72]. Также исследования встречаются и в современных источниках [278, 293, 348,

Основным недостатком сушильных систем с использованием солнечной энергии является их высокая капиталоемкость. В этих сушилках, несмотря на низкие эксплуатационные расходы, приходится вкладывать большие средства в оборудование. Основная экономическая проблема состоит в том, чтобы уравновесить ежегодные затраты на дополнительные инвестиции и экономию топлива. Поэтому солнечная сушка может быть экономичной только при снижении стоимости оборудования или в случае увеличения стоимости топлива.

1.4.2. Конвективная сушка

В настоящее время большая часть обезвоженных фруктов и овощей производится методом конвективной сушки, который является наиболее простым и экономичным среди различных методов [108, 109, 184]. На основе этой технологии были разработаны, изготовлены и коммерчески используются различные типы сушилок. В этом методе нагретый воздух контактирует с влажным материалом, подлежащим сушке, для облегчения тепломассопереноса; в основном задействована конвекция. Двумя важными аспектами массопереноса являются перенос воды на поверхность высушиваемого материала и удаление водяного пара с поверхности. Основные концепции, различные методы сушки и различные типы сушилок горячим воздухом обсуждаются разными авторами в обзорных статьях и книгах [143, 226, 338–340, 373].

Чтобы получить обезвоженные продукты высокого качества по разумной цене, обезвоживание должно происходить довольно быстро. На скорость и общее время сушки влияют четыре основных фактора: физические свойства пищевых продуктов, особенно размер и геометрия частиц, характер обтекания продукта воздухом, физические свойства воздуха (температура, влажность, скорость); и конструктивные характеристики сушильного оборудования [226]. Выбор метода сушки пищевого продукта определяется желаемыми характеристиками качества,

сырьем и экономичностью. Для сушки кусковых фруктов и овощей обычно используются туннельные, ленточные, камерные, пневматические и конвейерные сушилки. Среди них камерные сушилки работают в периодическом режиме, ленточная сушилка является непрерывной, а туннельная сушилка – полунепрерывной.

Однако конвективные способы сушки связаны с перемещением значительных объемов теплоносителя. Выбросы теплого отработавшего теплоносителя предопределяют низкую эффективность использования энергетических ресурсов [147, 199, 245, 287]. Совершенствование способов подвода тепла непосредственно связано с интенсификацией теплообмена и снижением удельных расходов тепла. Традиционным способом интенсификации процессов тепломассообмена при конвективной сушке является увеличение температуры и расхода сушильного агента. В современных конвективных сушилках температура сушильного агента обычно лимитируется предельной температурой нагрева сырья. Повышение скорости движения сушильного агента с одной стороны интенсифицирует процессы тепломассообмена продукта с сушильным агентом, а с другой стороны, приводит к повышению потерь теплоты с отработанным сушильным агентом. Таким образом, имеет место противоречие между скоростью конвективной сушки и её энергоэффективностью. Кроме того, при конвективной сушке в продукте возникает температурный градиент, направленный в сторону, противоположную градиенту влагосодержания, что также замедляет процесс конвективной сушки.

Чтобы улучшить эффективность конвективных сушилок в последнее время широко используется технология теплового насоса [39, 146, 167]. Особенно это актуально в условиях низкотемпературной сушки высоковлажных материалов при высокой влажности окружающего воздуха. В простейшей конструкции сушильный агент пропускается через испаритель холодильной системы. Это охлаждает воздух до температуры ниже точки росы, что приводит к конденсации водяного пар из воздушного потока. Затем этот холодный воздух проходит через конденсатор над системой охлаждения, чтобы повторно нагреть воздух до температуры сушки.

Большинство доступных сушилок с тепловым насосом рециркулируют весь воздух, но также существуют и сушилки без рециркуляции. Оба типа сушилок могут быть очень энергоэффективными [146].

Три основных преимущества сушилок с тепловым насосом [146]:

1. Сушка при низких температурах может улучшить качество продукта.

2. Более высокая энергоэффективность достигается за счет того, что используется скрытая теплота парообразования.

3. Условия сушки и, следовательно, скорость сушки не зависят от условий окружающей среды.

Помимо этих преимуществ, существует ряд факторов, который ограничивает применение сушки с тепловым насосом. К ним относятся такие факторы как: использование электроэнергии, которая обычно дороже, чем другие формы, более высокие капитальные затраты и то, что максимальная температура сушки ограничена свойствами используемых в настоящее время хладагентов, что составляет примерно 60–70 °C. Типичные температуры сушки в сушилке с тепловым насосом находятся в диапазоне от 30 °C до 60 °C. Ожидается, что сушка с использованием этого метода улучшит сохранение летучих ароматов, уменьшит ухудшение цвета, а также потерю термолабильных витаминов [283].

Одной из возможностей повышения эффективности организации сушильных процессов является совершенствование методов подвода теплоносителя. Такими методами непосредственного подвода энергии к продукту является ультразвуковая, инфракрасная и микроволновая сушка [400, 401]. Причем для микроволновой сушки характерна селективность подвода энергии, так как сухая часть овощей и фруктов в большинстве является диэлектриком и практически радиопрозрачна для микроволнового излучения.

1.4.3. Диэлектрическая сушка

Механизм сушки с помощью микроволн и диэлектрической энергии сильно отличается от обычной сушки. При обычной сушке влага сначала уносится с

поверхности, а оставшаяся вода медленно диффундирует к поверхности. Хотя потенциал передачи энергии для нагрева – это градиент температуры, который приводит к передаче энергии внутрь материала, потенциал передачи массы – это градиент концентрации массы, существующий между влажным внутренним пространством и более сухой поверхностью. Часто это медленный процесс с ограниченной скоростью диффузии, который требует высоких внешних температур для создания необходимой разницы температур.

При микроволновой сушке тепло генерируется внутри высушиваемого продукта за счет взаимодействия молекул воды и радиочастотной энергии (915 и 2450 МГц) [222, 385, 407]. При внутреннем тепловыделении в микроволновых и диэлектрических системах массоперенос в первую очередь происходит из-за общего градиента давления, установленного из-за быстрого образования пара внутри материала [219, 233, 237, 243, 276]. Большая часть влаги испаряется перед тем, как покинуть образец. Если образец изначально очень влажный и давление внутри образца растет очень быстро, жидкость может быть удалена из образца под влиянием общего градиента давления. Чем выше начальная влажность, тем сильнее влияние градиента давления на общий вынос массы. Таким образом, в действительности происходит своего рода «перекачивающее» действие, выталкивающее жидкость на поверхность, часто в виде пара. Это приводит к очень быстрому высыханию без необходимости перегрева атмосферы и, возможно, к поверхностному упрочнению или другим явлениям перегрева поверхности. Большая часть работ по сушке фруктов и овощей с использованием микроволновой энергии была описана Декаро [182]. Преимуществами использования микроволновой энергии являются проницаемость, которая обеспечивает равномерный нагрев материалов, на которые падает излучение; избирательное поглощение излучения жидкой водой; и возможность легкого управления подводимой мощностью, чтобы регулировать скорость нагрева материала, влага часто удаляется в виде пара; поэтому не переносит другие материалы на поверхность [178, 257, 258, 267]. При необходимости можно создать достаточно высокую плотность излучения, что приведет к резкому повышению температуры и

давления внутри материала [268, 277, 297]. Это может значительно сократить время сушки за счет дополнительного переноса влаги в жидкой форме под действием градиента давления. Однако высокая стоимость единицы энергии по сравнению с обычной энергией и высокая начальная стоимость оборудования ограничивают его использование для сушки. Также продукты в процессе диэлектрической сушки могут быстро нагреваться и высыхать, но слишком быстрый нагрев может иметь разрушительные последствия. Необходимо соблюдать осторожность, чтобы материал не мог обгореть, сгореть или растрескаться или вызвать закалку, то есть поверхность может высохнуть так быстро, что пар сможет выйти из материала, что приведет к повышению внутреннего давления и к разрыву или взрыву [271, 402].

Часто сушку с диэлектрическим нагревом комбинируют с конвективной, что обычно это повышает эффективность и экономичность процесса сушки [116, 125, 128, 162, 221, 227, 228, 253, 377]. Горячий воздух сам по себе относительно эффективен при удалении свободной воды на поверхности или вблизи нее, тогда как уникальное насосное действие диэлектрического нагрева обеспечивает эффективный способ удаления внутренней свободной воды, а также связанной воды [272, 279, 290, 292]. Путем их правильного комбинирования можно использовать преимущества каждого из них, повысить эффективность и снизить затраты на высыхание [239, 311, 314, 393]. Возможны варианты, когда микроволновое излучение добавляется в начале, в середине или в конце процесса конвективной сушки, тем самым вызывая его значительную интенсификацию.

Использование предварительного микроволнового подогрева на начальной стадии сушки приводит к тому, что внутренняя часть объема продукта нагревается до температуры испарения, при этом выталкивая влагу на поверхность и заставляя конвективную сушилку работать в наиболее эффективных условиях при более высоких температурах [265, 295, 312, 396]. Кривая сушки более крутая, а время сушки сокращается.

Во втором случае, микроволновая энергия добавляется во втором периоде, когда скорость сушки начинает падать [180, 366, 403]. Поверхность материала при этом сухая, а влага сосредоточена в центре. Добавленная электромагнитная энергия

генерирует внутреннее тепло и повышает давление пара внутри материала, заставляя влагу попадать на поверхность, откуда она легко удаляется. Эффективность сушки при этом резко увеличивается и каждая добавленная единица электромагнитной энергии эквивалентна 6-8 единицам энергии, подводимой конвективным способом. Это наиболее эффективно для толстых, трудно нагреваемых материалов.

Наименее эффективной конвективная сушка становится на завершающем этапе досушивания, когда две трети времени могут быть потрачены на удаление последней трети воды. Использование микроволновой энергии на этом этапе заменяет неэффективную конвективную сушку внутренним выделением тепла. Конвективная сушка также может быть ускорена, тем самым увеличивая производительность сушилки, в то же время, обеспечивая увлажнение поверхности продукта, тем самым повышая эффективность. Этот метод требует тщательного контроля конечной влажности и выравнивания влажности во избежание пересушивания и подгорания продукта.

Несмотря на указанные ранее ограничения, совершенствование техники для генерации микроволнового излучения способствует бурному развитию этого способа сушки и применению его для обезвоживания овощей, фруктов и другой сельскохозяйственной продукции [120, 123, 127, 161, 188, 193].

Использование этого вида энергии нашло свое применение при окончательной сушке картофельных чипсов [122, 192, 284, 356]. Но, несмотря на многочисленные исследования микроволновой сушки картофеля, она пока широко не применяется в промышленных масштабах. Микроволновая сушка используется для заключительных стадий сушки (от 30 до 6 %) различных картофельных продуктов. Например, ломтики сырого картофеля толщиной 0,21 мм можно высушить до конечной влажности 2–3 % в течение примерно 4 минут в микроволновом поле. Увеличение толщины сырых ломтиков до 0,32 мм приводит к эффектам варки, а также к снижению скорости сушки [362]. Одновременная конвективная и микроволновая сушка ломтиков картофеля может преодолеть эту проблему, однако этот тип оборудования для обработки картофеля требует дальнейшего

промышленного развития, и научных исследований. Также описано практическое промышленное применение микроволновой финишной сушилки картофельных чипсов [362]. Установка мощностью 25 кВт может обрабатывать около 320 кг/час чипсов. Сообщается, что качество продукта (цвет, текстура и т. д.) хорошее, тогда как абсорбция масла была примерно на 5 % меньше по сравнению с чипсами, обработанными традиционным способом. Об аналогичных качественных преимуществах сообщалось в других исследованиях [130, 300]. В исследованиях сушка в микроволновой установке значительно сократила время сушки картофеля, а также позволила получить сушеный продукт лучшего качества [137]. Это говорит о том, что применение микроволновой энергии для завершения процесса сушки картофеля и картофельных чипсов имеет потенциал для промышленного использования. Особенно интересна сушка лука тем, что дает существенные преимущества с точки зрения выравнивания влажности, снижения затрат энергии на окончательную сушку на 30 % и уменьшения количества бактерий на 90 %. Здесь конвективным способом производится снижение уровня влажности с 80 до 10 %, а микроволнами – с 10 до 5 % [349]. Это идеальный пример сочетания двух форм энергии в наиболее экономичной форме.

В течение многих лет существует большой интерес к возможности использования микроволн для сублимационной сушки [242, 246, 247, 254, 358, 376]. Проблема сублимационной сушки состоит в том, что по мере уменьшения фронта влажности продукт становится труднее сушить из-за пониженной теплопроводности материала. Микроволновое излучение может быть идеальным для обеспечения необходимого тепла удаляющейся влаге. К сожалению, при низком давлении вакуума, связанном с сублимационной сушкой, повышается возможность ионизации газов, вызывая плазменный разряд, который может сжечь продукт. Есть признаки того, что эти и другие проблемы были преодолены, и коммерческие системы микроволновой сублимационной сушки в настоящее время осуществимы и могут, фактически, уже использоваться для сушки кофе [148, 359].

Микроволновая вакуумная сушилка представляет собой интересную альтернативу сублимационной сушке, и промышленные образцы используются для

производства концентратов фруктовых соков, чайного порошка и ферментов [132, 315, 364, 409]. Также были успешно проведены опытно-промышленные испытания для сушки таких овощей, как грибы, лук и спаржа. Экспериментальная микроволновая вакуумная установка используется для сушки соевых бобов. Считается, что эксплуатационные расходы на микроволновую вакуумную сушку находятся где-то посередине между распылительной сушкой и сублимационной сушкой [179, 285, 305].

Проводилось исследование микроволновой вакуумной сушки концентратов апельсинов, лимонов, грейпфрутов, ананасов, клубники и др. [162, 164, 182]. Действовала одна полномасштабная установка для вакуумной сушки апельсинового и грейпфрутового соков с использованием установки мощностью 48 кВт и частотой 2450 МГц, которая сушила концентрат апельсинового сока 63 °Brix до 2 % влажности за 40 минут. Микроволновая вакуумная сушка клюквы была исследована с использованием лабораторной сушилки, работающей или в непрерывном, или в импульсном режиме [390]. Было обнаружено, что импульсное применение микроволновой энергии более эффективно, чем непрерывное применение. Исследования процесса сушки в вакуум-аппарате с микроволновым энергоподводом показали высокую пищевую и энергетическую ценность у плодов смородины черной, высушенных в микроволновом вакуум-аппарате [24]. Применение микроволновой сушки экстракта шлемника обыкновенного и желе ежевики показало ее эффективность по результатам анализа характеристик сушки, растворения, физико-химических свойств и антиоксидантной способности [177, 269].

Сублимационная сушилка в сочетании с микроволновой доставкой энергии была использована для сушки функциональных снеков из окры. В работе проведено сравнение четырех различных типов сушки: конвективной, сублимационной, микроволновой вакуумной и комбинированной конвективной сушки в сочетании с микроволновой вакуумной [241]. Анализ физико-химических показателей и показателей эффективности сушки показал эффективность микроволновой вакуумной сушки.

Основная проблема с аппликаторами резонатора – это однородность микроволнового поля в нагрузке. Чтобы обеспечить равномерность нагрева, обычно используют перемещение или поворот продукта в аппликаторе с помощью конвейеров или поворотных столов; обеспечение режимов вращения, которые часто напоминают медленно вращающиеся вентиляторы и увеличивают количество мод в камере, вызывая отражающее рассеяние энергии; использование нескольких входов для микроволновой энергии; использование нескольких микроволновых источников с небольшими различиями в частоте, которые вызывают разные режимы; и выбор размеров резонатора для поддержки максимального количества мод, так называемый резонансный многомодовый резонатор. Комбинированная конвективная сушка с дополнительным микроволновым энергоподводом с использованием нового аппликатора для уменьшения эффекта перегрева краев была исследована для сушки яблок и грибов [175, 205]. В других исследованиях было обнаружено, что микроволновая сушка тонкослойной моркови приводит к значительному сокращению времени сушки и повышению качества продукта при сушке на низком уровне мощности [318, 357].

Для сушки замороженных ягод черники микроволновую сушку комбинируют с техникой псевдоожиженного слоя (MWSB) [206]. Сушка MWSB характеризовалась значительным сокращением времени сушки и улучшенным качеством продукта по сравнению с образцами, высушенными в сублимационной, камерной конвективной и традиционной сушкой в псевдоожиженном слое.

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод о том, что микроволновая сушка нашла промышленное применение в комбинации с вакуумной и сублимационной сушкой, где ввиду специфики процесса конвективный энергоподвод практически исключен, а затраты энергии на проведение процесса, как и капитальные затраты достаточно велики. При атмосферном давлении микроволновая сушка находит ограниченное применение при досушивании тонких продуктов, таких как картофельные чипсы. Определенные проблемы существуют с организацией непрерывного процесса сушки. Это связано с тем, что необходимо обеспечить отсутствие утечек излучения. Использование этого метода подвода

энергии представляется весьма перспективным для сушки такого высоковлажного сырья как овощи и фрукты, особенно в сочетании с другими методами подведения энергии, однако разработка промышленных микроволновых сушилок ещё требует проведения научных и инженерных изысканий.

1.4.4. Инфракрасная сушка

Одним из все более популярных, быстро распространяющихся методов нагрева продукта для сушки является инфракрасное (ИК) излучение. Хотя этот тип теплопередачи использовался случайно в прошлом вместе с другими типами теплопередачи во время обезвоживания, теперь инфракрасные сушилки предназначены для использования лучистого тепла в качестве основного источника [335, 351, 367, 381, 397].

Традиционной сферой применения ИК сушилок является обезвоживание пленок и полотен с покрытием и корректировка профилей влажности при сушке бумаги и картона. Теоретические работы и результаты лабораторных экспериментов по инфракрасной сушке красок, покрытий, клеев, чернил, бумаги, картона, текстиля и т. д. можно найти в литературе [174, 260, 294, 370]. С другой стороны, растет интерес к инфракрасной сушке, применяемой к другим продуктам, таким как продукты питания [302, 352, 404, 406]. Большинство классических работ по инфракрасной сушке пищевых продуктов было опубликовано в СССР и странах бывшего СССР, США и странах Восточной Европы [223]. Еще Гинзбург описал ИК сушку зерна, муки, овощей, макарон, мяса, рыбы и т. д. и показал, что ИК сушку можно успешно применять для пищевых продуктов [44, 218]. Если Лебедев рассматривал фундаментальные основы сушки инфракрасными лучами таких материалов, как песок, глина и дерево, то несколько позднее проводились исследования комбинированного радиационно-конвективного энергоподведения при сушке овощей и фруктов [73, 79, 93]. В настоящее время существует множество промышленных применений сушки сельскохозяйственных продуктов с помощью ИК излучения. Многие авторы указали на преимущества и недостатки

использования ИК сушки [70–72, 189, 223, 266, 300, 341]. На самом деле ИК сушка имеет много положительных качеств, главным из которых является сокращение времени сушки [119, 190, 191]. Кроме того, преимуществами ИК сушки пищевых продуктов являются: универсальность ИК нагрева, простоту необходимого оборудования, легкое расположение ИК нагревателей в конвективных, контактных и микроволновых сушилках, короткие переходные процессы, а также значительную экономию энергии [131, 141, 145, 166, 183]. Также к преимуществам ИК сушки можно отнести: высокую эффективность преобразования электрической энергии в тепло для электрического ИК излучения, проникновение излучения непосредственно в изделие, не нагревая при этом окружающую среду, равномерное нагревание продукта, простоту программирования и управления циклом нагрева для различных продуктов, а также адаптация к изменяющимся условиям, выравнивание профиля влажности в продукте и низкий уровень порчи продукта, источники ИК излучения недорогие по сравнению с диэлектрическими и микроволновыми источниками; имеют длительный срок службы и низкие эксплуатационные расходы [153, 195, 196, 230, 234].

С другой стороны, ИК сушилки имеют и свойственные им недостатки такие как сложность масштабирования. ИК сушилки наиболее эффективны для сушки поверхностей [252]. Тем не менее, прилагаются большие усилия для улучшения этой технологии, чтобы адаптировать ее для сушки толстых материалов с успешными результатами. При проектировании и эксплуатации необходимо учитывать потенциальную опасность возгорания.

Для создания ИК сушилки непрерывного действия инфракрасные модули обычно проектируются и конструируются из стандартных инфракрасных излучателей, интегрированных в обычные сушилки таким образом, что инфракрасное излучение непосредственно задерживается продуктом, подлежащим сушке. Эти излучатели выбираются в зависимости от конкретного приложения. Для создания надежной конструкции также необходимо знать эффективность преобразования электрической энергии в инфракрасную для излучателей, используемых в сушилке. Также важным вопросом является расположение излучателей в камере для

обеспечения равномерности распределения теплового потока по поверхности продукта. При использовании ИК излучателей эта равномерность обеспечивается отражателями (рефлекторами) определенной геометрической формы и размещения. Киптелая Л.В. и Загорулько А.Н. для исследования данной задачи спроектировали несколько разнообразных видов экспериментальных ИК сушилок, в которых осуществлялся процесс сушки плодоягодного сырья при разных технологических режимах и геометрической формы и размещения рефлектора [74]. Также этими исследователями показано, что при достижении равномерного распределения теплового потока от источника (ИК излучателя) на приемную поверхность использование ИК излучения в технологии сушки плодоягодного сырья, позволяет максимально сохранить БАВ в продукте [259].

Одним из способов интенсификации процесса сушки растительного сырья является применение инфракрасного излучения выделенной длины волны. В работах Демидова и др. была доказана эффективность этого метода сушки для семян подсолнечника и семенного фонда семян подсолнечника [56, 57]. В экспериментах по сушке морской капусты и водорослей [58–60] показано, что применение инфракрасного излучения выделенной длины волны позволяет исключить перегрев материала и проводить процесс сушки в более "мягком" температурном режиме, обеспечивая сохранение всех качеств исходного продукта. Это происходит из-за снижения температуры испарения влаги при инфракрасном излучении. Дальнейшие исследования показали справедливость этого утверждения для сушки шинкованной свеклы, чешуек репчатого лука и листьев брусники [61–63].

Ввиду ряда обозначенных преимуществ, ИК сушка в сочетании с конвективной или вакуумной становится все более популярной [220, 303, 342, 368–371, 387]. Известно исследование, которое показало улучшение качества сушеного картофеля, повышение тепловой эффективности процесса сушки и снижение энергозатрат на получение готового продукта за счет использования ступенчатого режима радиационно-конвективной сушки [66]. Исследователи отмечают высокую пищевую ценность полученных картофельных пластин, что обусловлено высокой

сохранностью ценных термолабильных веществ из-за применения «мягких» температурных режимов сушки и высокой интенсивностью влагоудаления. Сушку картофельных плит в ИК диапазоне исследовали также Афзал и Абэ [110]. Интенсивность излучения составляла от 0,125 до 0,500 Вт/см^2. Они заметили, что скорость сушки увеличивалась с увеличением толщины картофельной плиты из-за более низкой энергии активации для десорбции влаги. Позже они продемонстрировали, что сушка картофеля с помощью ИК излучения – это процесс с падающей скоростью, и скорость сушки зависит от уровня интенсивности излучения [111, 112].

Прерывистая (пространственная или временная) подача инфракрасного излучения потенциально способна сберечь энергию, снизить потребление воздуха в конвективных сушилках и повысить качество термочувствительных продуктов [316]. Григорьев И.В., Рудобашта С.П, и Очиров В.Д показали, что при использовании импульсного ИК облучения и при обеспечении на облучаемом объекте высоких значений энергетической освещённости, необходимый для достижения предельной температуры промежуток времени, существенно короче, чем при обычных режимах постепенного непрерывного облучения, и при объекты с высокой удельной теплоёмкостью этом нагреваются быстрее [48–50, 91, 95]. В исследованиях отмечается необходимость учитывать спектральные характеристики излучателя и облучаемого сырья при определении параметров импульсного ИК нагрева [1, 2, 50]. Алтухов показал, что благодаря высокой проникающей способности ИК излучения определённой мощности с соответствующей длиной волны органические и биоорганические молекулы диссоциируют микроорганизмы, споры, грибки, а также разрушают и уничтожают вирусы [2]. Данные особенности импульсного ИК излучения позволяют получать продукты длительного хранения. Многочисленные исследования показали эффективность применения импульсного ИК излучения для получения продукции высокого качества при сушке сахаросодержащих корнеплодов и моркови [1–7, 106, 170, 386]. Благодаря применению «мягких» температурных режимов сушки и высокой интенсивности влагоудаления прерывистая радиационно-конвективная

сушка позволяет получить такие продукты как помело, грушевые чипсы, персиковые чипсы и чипсы из хурмы и киви [87, 231, 316, 333, 390]. Исследователи отмечают их высокую пищевую ценность [68, 90, 334].

Сушилки для непрерывных листов или больших поверхностей (например, досок), использующие комбинацию встречных струй и лучистых нагревателей, расположенных между струями, уже доказали свою промышленную целесообразность. Кроме того, использование лучистого нагрева в условиях вакуума – это технически надежный процесс сушки определенных продуктов. Чтобы полностью использовать потенциал технологий инфракрасной сушки, необходимо провести много фундаментальных и промышленных исследований и разработок.

1.4.5. Ультразвуковая сушка

Относительно новым и сравнительно малоисследованным направлением в сушке является процесс сушки с использованием ультразвуковых колебаний [361]. В работе сообщалось об использовании ультразвуковой энергии для удаления воды из разбавленного раствора обезжиренных продуктов [172]. В этом процессе жидкость сначала распыляется через сопло, а затем сушится путем кавитации с использованием энергии ультразвука. Сообщалось об ультразвуковой технологии сушки овощей с использованием мощного ультразвукового генератора [207]. В этом методе для исследования сушки морковных ломтиков использовались ультразвуковые колебания высокой интенсивности, и эффективность этого метода сравнивалась с эффектами традиционной сушки и принудительной сушки на воздухе с помощью ультразвукового излучения в воздухе. Достигнуто резкое сокращение времени сушки при сохранении качества. В исследовании дана оценка влияния комбинации ультразвука и вакуума на кинетику сушки папайи при 60 °C и использовались четыре метода: ультразвуковая, вакуумная сушка, вакуумная сушка с ультразвуком и контрольная (без ультразвука и вакуума) сушка [244].

Установлено, что ультразвуковая обработка ускорила процесс вакуумной сушки папайи и минимизировала потерю изучаемых биологически активных соединений и цвета продуктов. Однако исследования в этом направлении носят пока единичный характер, и ультразвуковое воздействие может быть применено как интенсифицирующий фактор в комбинации с другими методами сушки [113, 361, 384, 388, 405]. Определение параметров ультразвукового воздействия для широкого круга продуктов, также требует дополнительных исследований.

1.5. Применение возобновляемой энергии в процессах термообработки

В современной эпохе, характеризующейся ограниченностью ресурсов и растущей потребностью в устойчивых и экологичных решениях, применение возобновляемой энергии в процессах термообработки фруктового и овощного сырья приобретает нарастающую актуальность. Этот подход обеспечивает энергоэффективность и экологические преимущества, снижает операционные расходы, а также соответствует строгим нормативам по снижению выбросов углекислого газа и устойчивости производства. Таким образом, использование возобновляемой энергии становится ключевым направлением совершенствования оборудования для переработки фруктового и овощного сырья.

В секторе продуктов питания, напитков и сельского хозяйства 51 % интеграции солнечного технологического тепла происходит на уровне снабжения, а 27,3 % – на уровне процесса [365].

Согласно последнему отчету Solar Heat Worldwide, общее количество коллекторных солнечных систем по всему миру к концу 2022 года составило около 891 с общей установленной площадью 1,13 млн м^2 [381].

В зависимости от географических и экономических условий страны солнечная тепловая энергия может поставляться в виде горячей воды, горячего воздуха или пара до 400 °C для широкого круга отраслей промышленности. Например, обычные плоские пластинчатые или вакуумные трубчатые коллекторы могут легко

обеспечить температуру ниже 100 °C, тогда как модифицированные со сверхвысоким вакуумом и концентраторами могут обеспечить температуру около 200 °C [236].

Типы процессов также играют важную роль при выборе солнечных коллекторов и интеграции солнечных систем в традиционные системы. Ключевой перспективой внедрения технологий использования солнечной энергии в мировых промышленных секторах является более высокое потребление тепловой энергии, чем электрической. Ограниченные ресурсы ископаемого топлива, которых, как предполагается, хватит до 2060 года, и растущие выбросы парниковых газов являются актуальными проблемами, постоянно отдающими приоритет замене ископаемого топлива возобновляемыми источниками энергии [383].

Основными общими препятствиями на пути создания систем технологического нагрева с использованием солнечной энергии в промышленности являются низкая цена на ископаемое топливо, высокая стоимость установки солнечного оборудования, а также отсутствие адекватных исследований, необходимых для интеграции солнечных технологий в существующие отрасли промышленности [202, 263].

Геоколлекторные системы используются в пищевой, промышленности при производстве напитков, пастеризации, нагреве, сквашивании молочных продуктов [43, 325], дезинфекции воды [36, 379], сушке [249], кондиционировании воздуха.

Горячая вода, необходимая для мытья, стерилизации тары, а также пастеризации молока, может быть легко получена с помощью солнечных нагревателей [375]. Из-за необходимости термического нагрева и охлаждения пищевая промышленность, особенно молочная, пользуется большим спросом в области применения солнечной энергии.

В солнечных тепловых системах для подачи пара при температуре 140 °C и 200 °C и давлении от 4 до 12 бар используются параболические отражатели Френеля [308].

Также используются плоские пластинчатые коллекторы для предварительного нагрева горячей воды от 20 °C до 80 °C [238].

Использование воды, нагретой солнечной энергией, полностью или частично снижает затраты на топливо при производстве пара [306].

Рассмотрено применение солнечных коллекторов при производстве приправ в системах предварительного нагрева воды и генерации пара [354]. Для первого процесса наиболее подходящими были плоские солнечные коллекторы, тогда как для генерации пара наиболее эффективной была каскадная система, состоящая из фотоэлектрических и плоских коллекторов.

Эйхольцер и др. исследовали интеграцию солнечной тепловой установки на пивоварне, расположенной в Шотландии [194]. Модель усреднения по времени и модель временного среза использовались для оценки потенциала рекуперации тепла для применения пинч-анализа.

Кумар и др. изготовили и экспериментировали с солнечной системой для технологического нагрева, состоящей из плоского пластинчатого коллектора и фотоэлектрического теплового коллектора, соединенных последовательно. Упомянутые авторы заявили, что разработанная система весьма эффективна в снижении потребности в промышленном топливе [194].

Большинство статей касается классификации отраслей, подходящих для интеграции солнечного тепла, на основе типа процесса и соответствующего температурного диапазона.

Предыдущие исследования в основном сосредоточены на выборе и сравнительной эффективности анализ и разработка солнечных коллекторов.

Исследования развития и модификации интеграции солнечного тепла проводились редко.

1.6. Теплоэнергетический аудит предприятий

Серьёзный анализ энергоэкологических проблем в индустриально развитых странах проводится регулярно, собираются и систематизируются данные как об отдельных промышленных объектах [282, 319], так и о состоянии окружающей среды в целом [124, 171]. Исследований, подобных «модели римского клуба», в рамках Государственных программ, в стране, к сожалению, не проводилось. Программные работы имеют декларативный характер, разработчики не имеют возможности дать глубокое научное обоснование проектам [75, 329]. Поэтому, анализ проблемы можно осуществить только на основании общих закономерностей, изложенных выше, и некоторой специфике, климатических условий страны и тенденций, которые к настоящему времени сложились. Это чрезвычайно актуальная проблема, поскольку преимущество в развитии получат страны, которые сумеют первыми выйти из энергетического и экологического кризисов. Решение этих кризисов требует комплексного подхода.

Исследования проводились на основе известных методов энергетического менеджмента [23]. Тепловые потери определялись по расчётно-экспериментальной методике (Раздел 2.3). Сравнение проводилось по приведенным затратам энергии к единице выпускаемой продукции.

Выполнен энергетический аудит пищевых предприятий, которые специализируются на переработке растительного сырья и молока. Опыт показывает, что картины помесячных расходов ресурсов типичны. На рисунке 1.1 в безразмерной форме представлена картина помесячного расхода ресурсов и выпуска продукции молочного завода. За 1 принято максимальное значение ресурса и продукта. Относительно максимального рассчитаны все текущие значения.

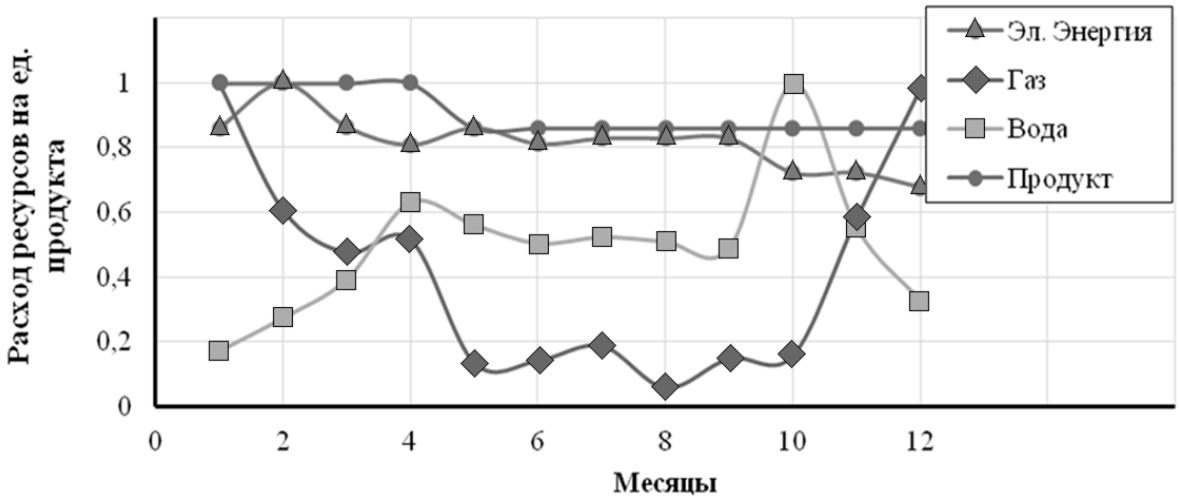


Рисунок 1.1. Результаты энергетического мониторинга молочного завода

Для сравнения рассмотрим результаты энергетического аудита (рисунок 1.2) винзавода [97].

Поскольку, на предприятии нет измерителей тепловой энергии, регистрируется только общий расход газа в котельной, то произведённая тепловая энергия рассчитывалась по тепловому балансу:

$$\Sigma Q_i = V \cdot \rho \cdot Q_P \cdot \eta \qquad (1.1)$$

где V – объем израсходованного за месяц газа, м^3;

ρ – его плотность, кг/м^3;

Q_P – теплота сгорания газа, Дж/кг;

η – КПД системы тепловой генерации.

Далее, определялось: какая часть расходуется технологическими аппаратами, а какая – системой отопления. Поскольку, отдельных измерителей расхода тепловой энергии технологией и системой отопления нет, то методика дальнейших исследований включала следующие этапы.

На первом этапе проводился расчёт удельных расходов энергии на технологические нужды для тех месяцев, когда отопление не функционирует. Таким образом, средние значения j_{TT} (удельных затраты энергии на технологию), определялись для 6, 7, 8 и 9 месяцев каждого года (МДж/л). На первом этапе определены средние значения j_{TT}. Используя полученные средние значения j_{TT}

определялся расход тепловой энергии на технологические задачи для месяцев, когда работало отопление:

$$Q_i^T = G_i \cdot j_{TT} \tag{1.2}$$

где G_i – месячный объем продукции, л.

Результаты мониторинга трех лет работы приведены на рисунке 1.2.

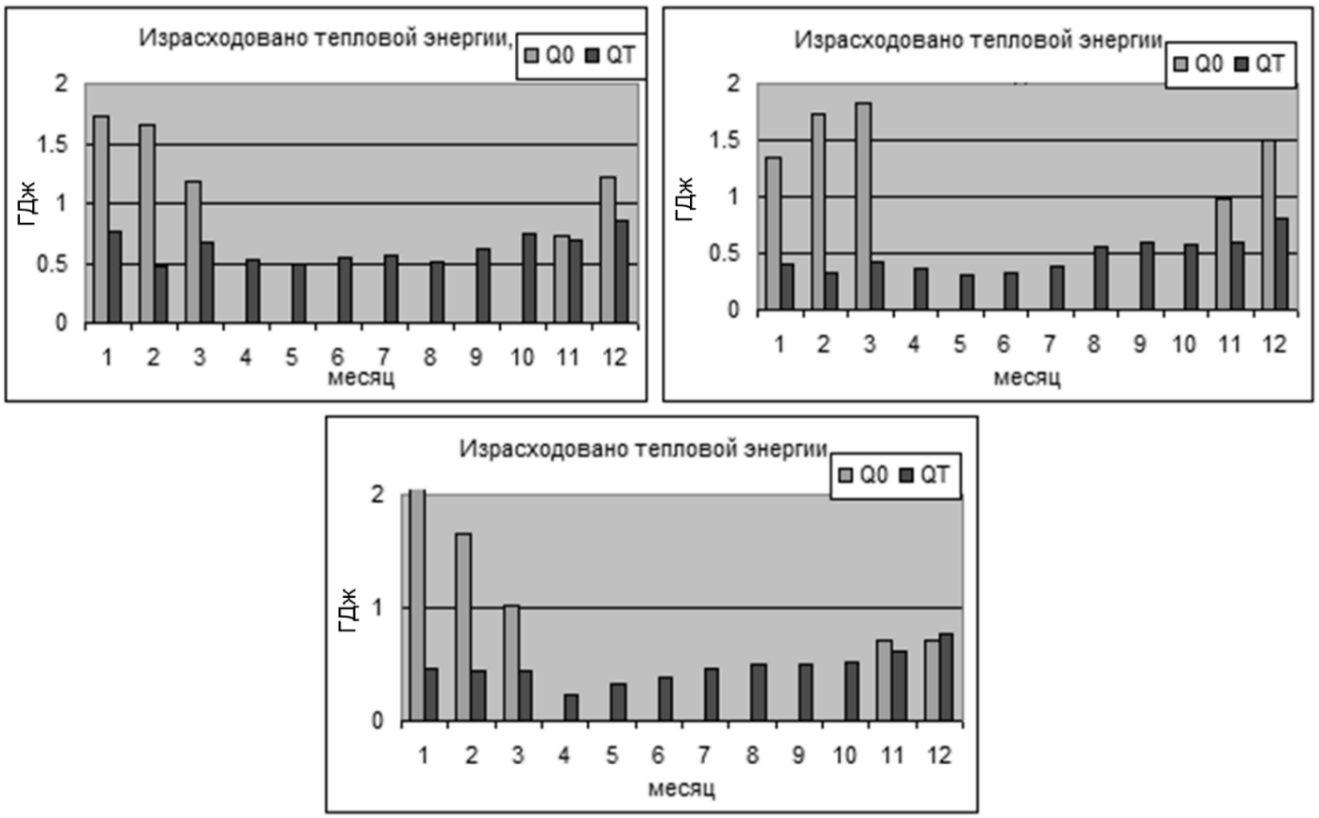


Рисунок 1.2. Результаты энергетического мониторинга винзавода:
а) 2020 г., б) 2021 г., в) 2022 г

Анализ данных (рисунки 1.1, 1.2) дает возможность сделать такие выводы:

– расход электроэнергии и воды удовлетворительно коррелируются с объёмом выпуска продукции;

– периодичность отопительного сезона имеет существенное воздействие на объем и распределение потребления газа, что является важным фактором для множества экономических, экологических и энергетических стратегий.

Такие положения справедливы для большинства пищевых производств. Однако на производствах, которые выпускают сухое молоко, сухие пищевые кон-

центраты и т.п., используются мощные сушильные установки, которые вносят отличия в энергетический баланс [22, 248]. Кроме того, при энергетических исследованиях таких предприятий возникает серьёзная проблема выявить конкретное влияние каждой технологии обезвоживания в общем балансе. Например, пищеконцентратное производство выпускает растворимый кофе и концентраты различных блюд. Метод энергетического аудита заключался в том, что последовательно исследовались летние месяцы (когда отсутствует отопление), и месяцы, когда распылительная сушилка кофе не работала (рисунок 1.3, месяцы 4, 5, 6).

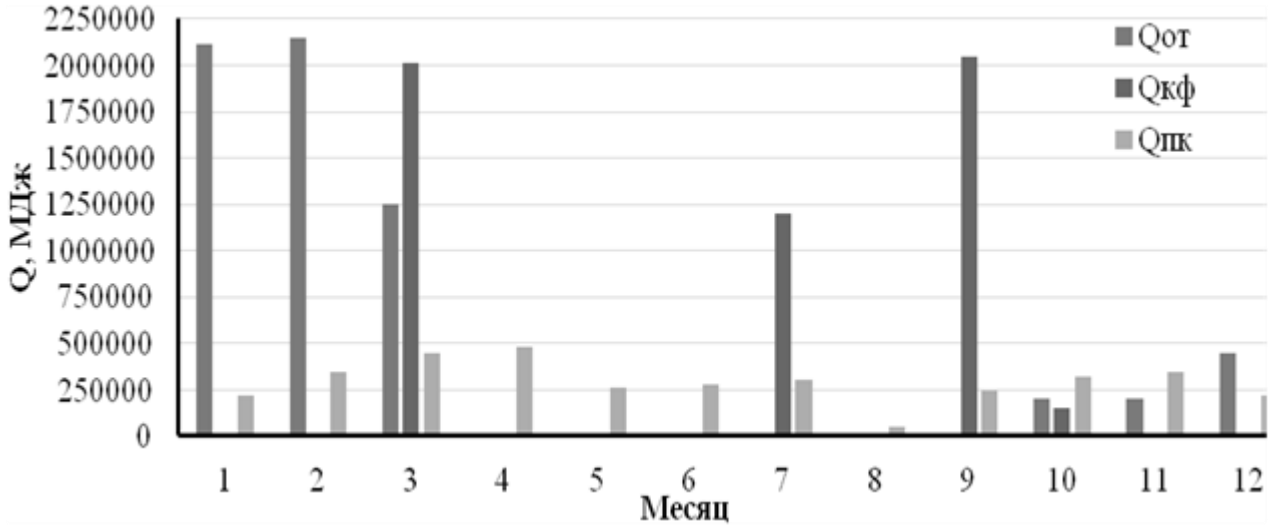


Рисунок 1.3. Результаты энергетического мониторинга пищеконцентратного завода

Из диаграммы (рисунок 1.3) следует, что расходы на распылительную сушку $\left(Q_{\text{КФ}}\right)$ соизмеримы с расходами на отопление $\left(Q_{\text{ОТ}}\right)$ в зимнее время. Расходы энергии на сушку при производстве пищевых концентратов $\left(Q_{\text{ПК}}\right)$ относительно стабильны.

Результаты энергоаудита технологической линии производства кисломолочных продуктов

Технологическая линия представлена на рисунке 1.4. Сначала оценивается качество молока и производится его приёмка, молоко перекачивается центробежными насосами 1 из автомолокоцистерн.

Принятое молоко проходит первичную обработку, в процессе которой оно сначала очищается от механических примесей на фильтрах или сепараторах-молокоочистителях, а затем охлаждается до 4–6 °С на пластинчатых охладителях 4 и насосами 1 по трубам через бачок 5 направляется в емкости хранения 3. Молоко хранится в емкостях 3 и нормализуется. После нормализации молоко подают в выдерживатель, где добавляют необходимые закваски и выдерживают при необходимой температуре.

Рисунок 1.4. Технологическая линия производства кисломолочных продуктов.
1 – центробежный насос; 2 – счетчики; 3 – емкость; 4 – пластинчатый охладитель;
5 – уравнительный бачок 6 – пластинчатая пастеризационно-охлаждающая установка; 7 – сепаратор – молокоочиститель;
8 – гомогенизатор; 9 – выдерживатель

Проведён энергетический анализ линии. Удельные энергозатраты (на килограмм продукции) линии представлены в таблице 1.1.

Эффективность аппарата определяется количеством энергии, затрачиваемой на процесс для достижения требуемого технологического эффекта. В таблице: $Э$, кВт – количество электрической энергии, потребляемой установками, Q, кВт – количество тепловой энергии, потребляемой установками, $Э_{уд}$, кДж/кг – удельные затраты энергии на производство продукции.

Удельные затраты энергии на производство продукции рассчитывали по формуле:

$$Э_{уд} = \frac{Э + Q}{G} \quad (1.3)$$

где G – производительность линии, кг/с.

Таблица 1.1. Удельные энергозатраты линии

Оборудование	$Э$, кВт	Q, кВт	$Э_{уд}$, кДж/кг
Насосы	0,8	–	6
Сепаратор-молокоочиститель	7,5	–	9,4
Пластинчатый охладитель	–	50,5	63,1
Сепаратор-нормализатор	7,5	–	9,4
Гомогенизатор	75	–	93,8
Пластинчатый пастеризатор	–	328,7	410,9
Выдерживатель	–	150	187,5
Удельные энергозатраты линии			592,6

Для более удобного анализа результаты представлены в виде диаграммы.

После анализа данных видно (рисунок 1.5), что самый большой сегмент – пастеризация составляет 410,9 кДж/(кг продукции) и выдерживатель 187,5 кДж/(кг продукции).

Снизить энергетические затраты на процесс тепловой обработки сырья при производстве кисломолочных продуктов можно при использовании комплексного энергозаменяющего устройства (КЭУ). Двухконтурная подача теплоносителя в выдерживатель позволяет снизить удельные энергетические затраты на работу системы в среднем на 25 % (рисунок 1.6). По сравнению с существующим базовым вариантом снижение удельных энергозатрат составит 51,5–78,5 %, в зависимости от погодных условий [34, 36, 38, 43, 215, 217].

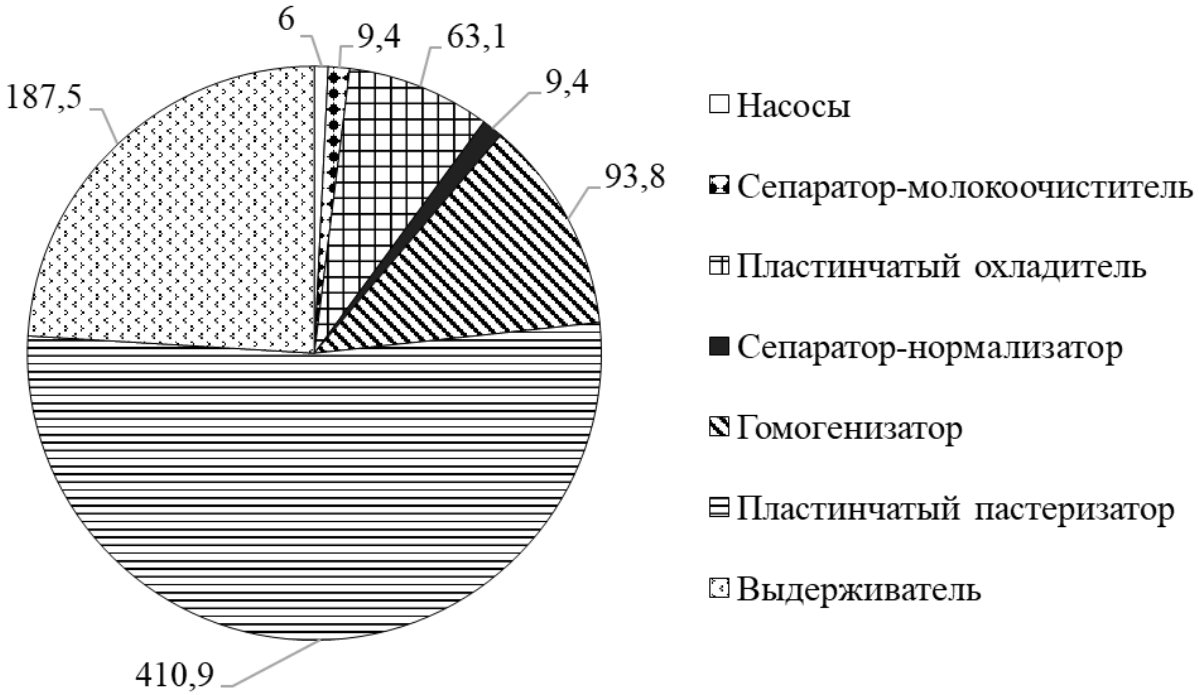


Рисунок 1.5. Удельные энергозатраты существующей производственной линии, кДж/кг

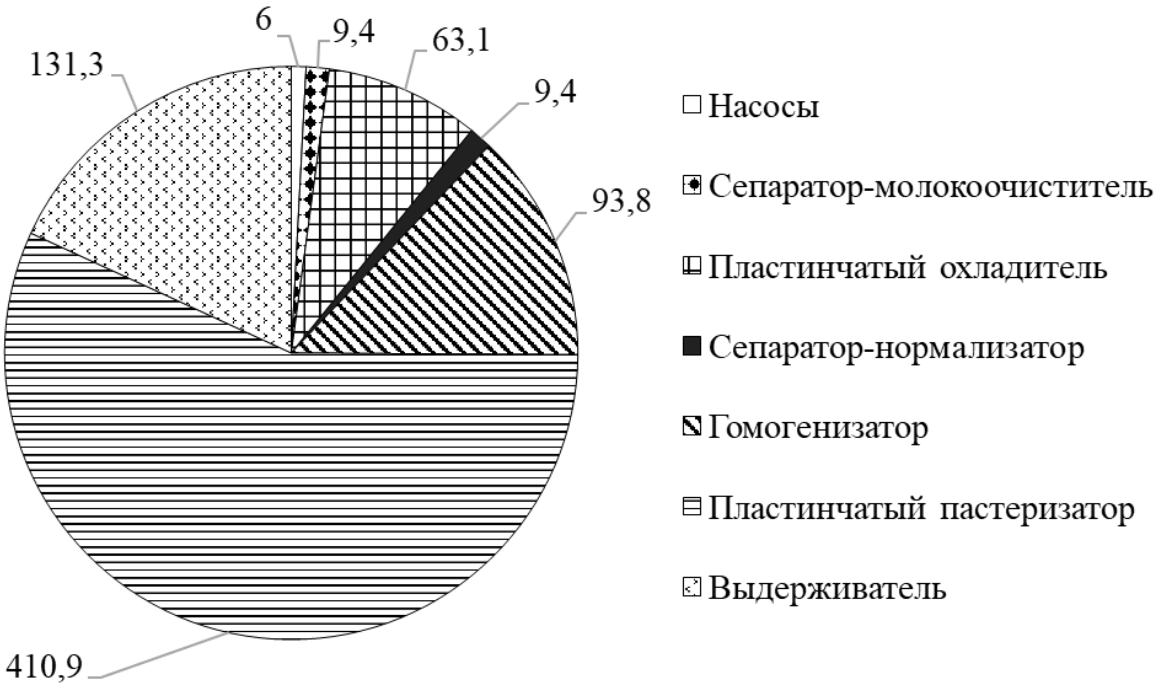


Рисунок 1.6. Удельные энергозатраты модернизированной производственной линии, кДж/кг

1.7. Анализ научно-технических противоречий и формулировка научной гипотезы

Основной задачей переработки сырья с целью его дальнейшего хранения и транспортировки является обезвоживание. Для получения жидких концентратов основным методом является выпаривание, а для получения сухих продуктов – сушка.

Традиционно выпаривание осуществляется в вакуум-выпарных аппаратах. Конструкции этого оборудования достаточно хорошо отработаны и проверены временем. Использование многоступенчатых выпарных систем и систем с термотрансформаторами энергии вторичного пара, таких, как тепловые насосы и системы с механической рекомпрессией вторичного пара позволяет достичь достаточно высокой эффективности использования энергии. Главной проблемой остается металлоемкость оборудования. Снижение площади теплообменной поверхности требует увеличения движущей силы, т.е. полезной разности температур. Однако такое увеличение имеет с одной стороны физические и технические ограничения, связанные с необходимостью создания более глубокого вакуума, а с другой – требованием обеспечения качества продукта. Большие температурные напоры могут приводить к локальным перегревам продукта у поверхности теплообменных стенок и пригорания сухого продукта к стенкам в результате интенсивного кипения в пристеночной области. Особенно это критично при достижении высоких концентраций продукта, в связи с возрастанием его вязкости. Также несколько уменьшить теплообменную поверхность можно за счет увеличения коэффициента теплопередачи что и делается в пластинчатых выпарных аппаратах [54]. Альфа Лаваль и GEA Wiegand успешно производят пластинчатые выпарные аппараты, отличающиеся компактностью и меньшей металлоемкостью. Однако принципиальные вопросы, связанные с ограничением движущей силы при кипении при теплопередаче через стенку, не могут быть решены. Только устранив саму теплопередающую поверхность можно передавать практически

неограниченное количество энергии продукту. При передаче энергии через стенку центры парообразования при кипении находятся непосредственно на этой стенке в микротрещинах, кавернах и шероховатостях. При высоких плотностях передачи энергии на поверхности могут возникнуть зоны, окруженные со всех сторон растущими паровыми пузырьками. В случае если жидкий растворитель в этой зоне испарится в эти растущие паровые пузырьки до того, как они оторвутся от поверхности, то сухое вещество из раствора попадет на перегретую поверхность и образуется нагар. Если часть этого подгоревшего вещества будет впоследствии растворена продуктом, это приведет к ухудшению качества последнего. В отличие от этого при объемном микроволновом подведении энергии очагами парообразования являются пузырьки газа в местах локального перегрева, а величина локального перегрева является незначительной ввиду существенного отличия диэлектрических свойств воды и водяного пара. Когда в какой-то точке жидкости возникнет избыточная напряженность электромагнитного поля, в этой точке в зародыше парового пузырька произойдет интенсивное испарение жидкости, что поглотит избыточную энергию. Далее вследствие того, что паровой пузырек является радиопрозрачным для микроволнового излучения, по сравнению с жидкой фазой, пик поглощения излучения сместится в жидкую фазу не вызывая перегрев парового пузырька. И, даже если предположить ситуацию, когда небольшой объем жидкой фазы окажется окружен паровой и испарится в неё с образованием твердой фазы, то так как большинство сухих веществ, растворенных в фруктовых и овощных соках, являются диэлектриками и практически радиопрозрачны, по сравнению с водой, перегрева твердой фазы на наступит и она растворится в жидкой без ухудшения качества продукта.

Таким образом, реализация процесса выпаривания при подведении энергии электромагнитным микроволновым излучением создаются условия для зарождения парообразования во всем объеме жидкости, что позволит избежать перегрева продукта в термическом пограничном слое ввиду отсутствия такового. Это позволяет получить продукт высокой концентрации, без привкуса «варки», без

изменения цвета и аромата. При моделировании этих процессов граничные условия третьего рода заменяются граничными условиями второго рода.

Иначе обстоит дело при сушке. Энергозатраты на процесс сушки значительно превышают затраты энергии на процесс выпаривания. Отчасти это объясняется необходимостью затрачивать дополнительную энергию на преодоление энергии связи влаги с материалом. Но даже в первый период сушки, когда удаляется в основном свободная влага, ситуация не изменяется. Причиной тому является большое количество низкопотенциальной теплоты, которая выбрасывается с отработавшим сушильным агентом. Повышение эффективности конвективной сушки связано с увеличением коэффициентов тепло- и массоотдачи в процессе сушки, что требует повышения температуры и скорости движения сушильного агента. Однако увеличение температуры ограничено предельно допустимыми температурами продукта, а увеличение скорости сушильного агента приводит к повышению потерь энергии с отработавшим тепломассоносителем. Таким образом в классической конвективной сушке имеется неразрешимое противоречие: с одной стороны, для обеспечения качества продукта, необходимо увеличивать интенсивность процесса, но с другой стороны, методы интенсификации процесса приводят либо к ухудшению качества продукта, либо к увеличению энергозатрат на процесс.

Перспективным путем решения данной проблемы представляется организация непосредственной доставки энергии к продукту или даже к влаге, находящейся в продукте без использования промежуточного теплоносителя. Такую доставку можно организовать, используя электромагнитное излучение микроволнового и инфракрасного диапазонов. При этом, учитывая опыт, рассмотренных выше исследований, рационально попеременно комбинировать микроволновые и инфракрасные источники излучения. Так микроволновое излучение, проникая в середину продукта, вызывает в нем градиенты температур и давлений, под действием которых влага мигрирует от середины продукта к его поверхности. А инфракрасное излучение, являясь поверхностным, по сути, эффективно удаляет влагу с поверхности продукта.

Таким образом, организация процессов удаления влаги из сырья с твердой фазой (аналог традиционной сушки), и из пищевых растворов (аналог традиционной выпарки) в режиме объемного подвода электромагнитной энергии позволит решать ключевые противоречия современных технологий: обеспечить стабильные параметры скорости сушки во всем диапазоне процесса и устранить потери энергии с отработавшим теплоносителем в конвективных установках, и, проводить выпаривание при постоянных значениях паропроизводительности до необходимой концентрации сухих веществ. Инструментом реализации таких режимов является эффект бародиффузии, возникающий в результате согласования параметров электромагнитного поля и параметров сырья. Такой эффект позволит при анализе данных энергетического аудита обосновать режимы работы оборудования на уровне эффективности, превышающей уровень современный техники.

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

ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 1

1. Фрукты и овощи богаты ценными компонентами, важными для здоровья человека, особенно в условиях неудовлетворительной экологической ситуации и угрозы коронавирусной инфекции. В таких условиях задача обеспечения населения фруктами, овощами и соками их них становится стратегической и представляет первостепенную важность для сохранения народонаселения страны.

2. В связи с сезонностью произрастания овощей и фруктов на территории Российской Федерации, а также ограниченностью территорий, на которых возможно выращивание определенных сортов овощей и фруктов, что связано с

климатическими условиями, актуальным является сохранение полученного урожая в виде концентрированных соков и высушенных овощей и фруктов, при условии максимального сохранения их качества, пищевой и оздоровительной ценности, а также экономической привлекательности. Снижение потерь сельскохозяйственной продукции путем ее своевременной консервации одним из предложенных выше методов позволит снизить долю импорта этой продукции, что соответствует принятой стратегии импортозамещения.

3. Производство качественных и недорогих отечественных концентратов фруктовых и овощных соков позволит вернуть доверие населения к восстановленным сокам и повысить спрос на них. Перспективным способом получения высококачественных высококонцентрированных соков является выпаривание в условиях вакуума с подведением СВЧ энергии. Отсутствие теплопередающей поверхности позволяет избежать значительных локальных перегревов продукта и его пригорания и позволяет получить продукты с высокими концентрациями сухих веществ без потери качества.

4. В традиционной конвективной сушке существует противоречие, связанное с влиянием расхода сушильного агента на интенсивность процесса и его энергоэффективность. Решение этого противоречия видится в отказе от использования промежуточного теплоносителя и использовании комбинированной системы с чередующимися ИК и СВЧ источниками излучения, что позволит организовать эффективное удаление влаги из продукта при сохранении его качества.

РАЗДЕЛ 2.
МЕТОДИКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выполненный в разделе 1 критический анализ позволил выявить перспективные сырье и готовые продукты, установить проблемные вопросы в процессах переработки этого сырья, определить недостатки в конструкциях традиционного оборудования, показать возможности современных подходов в организации процессов тепломассопереноса и предложить принципиальные схемы инновационных проектов, основанных на этих подходах. Следующим этапом является планирование и теоретическое обоснование решения поставленных задач научных исследований.

2.1. Методологические основы исследований

Методология представлена блок-схемой (рисунок 2.1). Первый этап исследований выполнен в разделе 1. Здесь на основе тенденций рынков, климатических условий Причерноморья обоснованы перспективные объекты исследований. Сформулированы достижения и проблемы в процессах переработки такого сырья. Важными вопросами, которые рассмотрены в первом разделе, являются формулировка научно-технических противоречий и выдвижение гипотез, и как указанные противоречия можно решать. Гипотезы сформулированы на основе лучшей практики межотраслевых подходов при решении подобных задач. Результатом стали принципиальные схемы инновационных проектов.

Естественно, разработка инновационных проектов требует проведения комплексных исследований. Методология (рисунок 2.1) предусматривает как 1 этап – проведение аналитических исследований, которые определят задачи серий экспериментального моделирования. Здесь устанавливаются физические закономерности влияния ключевых факторов на статические, кинетические и

энергетические закономерности исследуемых процессов. Эти закономерности необходимы для получения эмпирических моделей, которые доступны для инженерных методов расчета проектируемого оборудования.

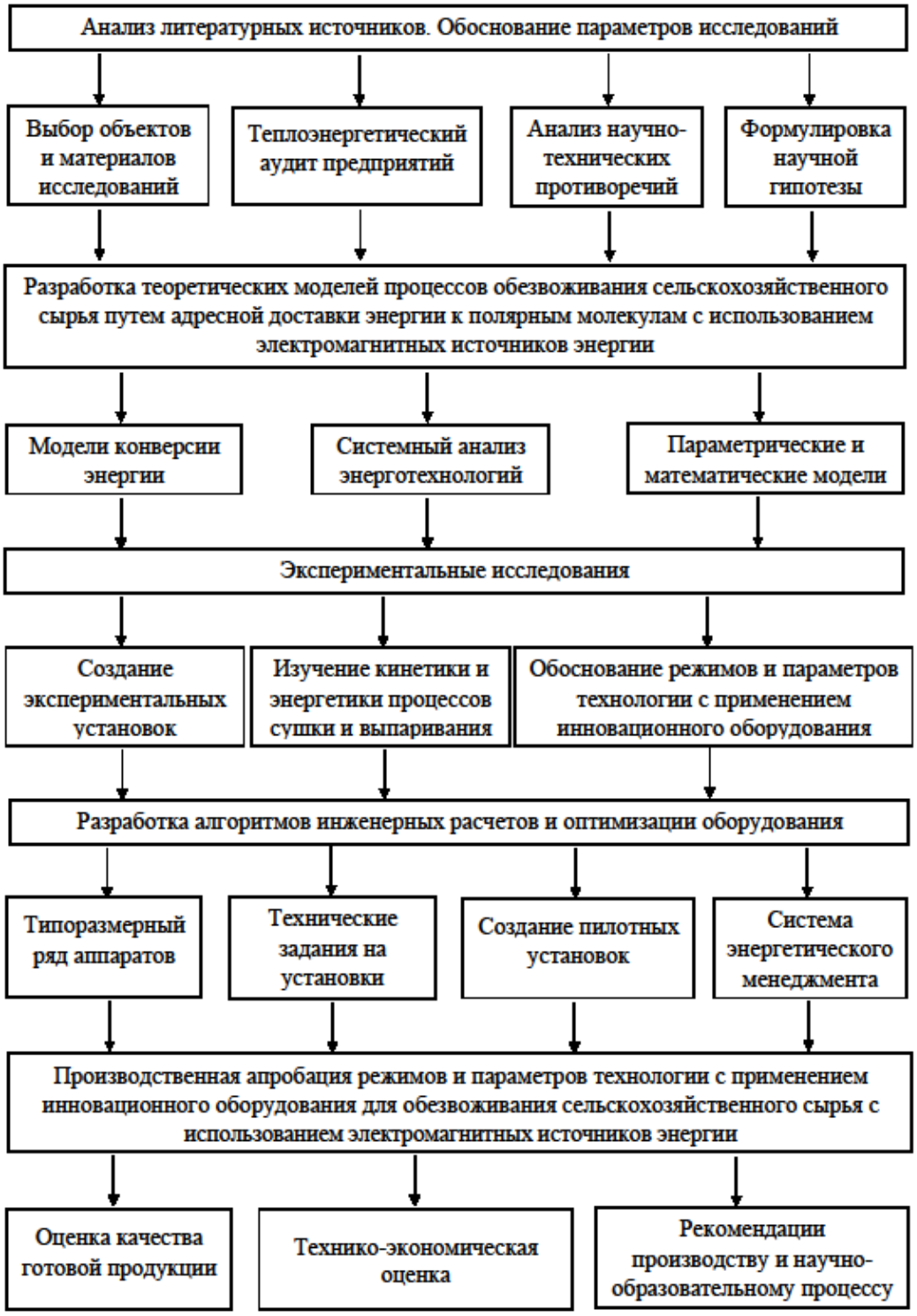


Рисунок 2.1. Методика научных исследований процессов обезвоживания в ЭМП

Таким образом, методология предусматривает важную роль при аналитическом моделировании. На первом этапе работы аналитические исследования определяют рациональный, обоснованный объем экспериментального моделирования. Это сократит затраты на реализацию исследований. На втором этапе работы эмпирические модели активно использовались в задачах оптимизации, что существенно сократило затраты на изготовление опытных образцов оборудования.

Естественно, адекватность расчетных и оптимизационных задач требует проверки. Это проводится на последнем этапе исследований (рисунок 2.1).

Согласно программе исследований первым этапом является теплоэнергетический аудит предприятий, который связан с производством концентрированных пищевых продуктов.

2.2. Системный анализ технологических комплексов для производства концентрированных пищевых продуктов

2.2.1. Методы системного моделирования энерготехнологических комплексов

Системный анализ энерготехнологий является эффективным инструментом снижения затрат энергии в производстве. Современные промышленные теплотехнологии – это сложные системы, которые включают преобразователи энергии, распределительные сети и потребителей. Причем, преобразователи тепловой энергии на прямом потоке энергии приводят к снижению энергетической эффективности схемы, а на потоках выбросов тепловой энергии, на «реверсных потоках» – к повышению энергетического КПД. Традиционные методы энергетического мониторинга не дают рекомендаций по количественной оценке влияния «реверсных потоков» [81]. Известно предложение развития теоретических основ энергомониторинга, разработка метода оценки энергетических КПД «реверсных потоков», иерархической оценки эффективности использования

энергии в теплотехнологической схеме [17, 104]. Последовательно, энергетические КПД отдельных элементов системы определяются отношением величины энергии на выходе $(Э_i)$ из i-го анализируемого элемента и значения на входе $(Э_{i-1})$. Разница этих потоков определяет потери энергии (Q_i) в i-м элементе.

$$\eta_i = \frac{Э_i}{Э_{i-1}} = \frac{Э_{i-1} - Q_i}{Э_{i-1}} \tag{2.1}$$

В случае «реверсных» потоков энергии, потоков по пути отработавшего теплоносителя, рассчитываются КПД реверсных элементов.

$$\eta_{pi} = \frac{Э_{pi}}{Э_T} \tag{2.2}$$

Итоговый тепловой показатель системы определяется [16]:

$$\eta = \frac{Э_{np} + \Sigma_i Q_{pi}}{Э_E} = \Sigma_{n-1}^{n} \eta_i + \frac{\Sigma_i Q_{pi}}{Э_T} \tag{2.3}$$

Предлагается гипотеза, заключающаяся в том, чтобы оперировать в расчетах базовыми характеристиками источника энергии, например топлива с теплотой сгорания 40 МДж/кг. 1кг нефтяного эквивалента (кг н.э.) выделяет энергию в 40 МДж/кг н.э.

Для проведения анализа предлагается ввести показатели эффективности использования энергии топлива:

$$d_o = \frac{E_u}{O} \tag{2.4}$$

где E_u – доля полезной в процессе энергии;

O – соотношение кг удаленной влаги к кг н.э.

По сути, предложенная выше методика является развитием известных методов энергоменеджмента, она позволяет учитывать модернизированные энерготехнологические комплексы. Представляется, что именно с такого анализа следует начинать исследование системы и принимать решение о перспективности предлагаемого проекта. Такая методика энергетического менеджмента

использована при исследовании типичных предприятий и технологий производства пищевых продуктов.

2.2.2. Методика проведения энергетического менеджмента пищевых технологий

По показателю «потребление энергии» в энергетическом балансе экономики агропромышленный сектор занимает высокие позиции при крайне низкой эффективности использования ресурсов. Этот сектор широко использует энергию для таких целей, как сельское хозяйство, обработка сельскохозяйственных продуктов, их хранение и транспортировка [35, 41]. Агропромышленный сектор зависит от энергии для многих процессов, начиная от механизации сельского труда до обеспечения подходящих условий для хранения и переработки продукции. Таким образом, потребление энергии в агропромышленном секторе обычно остается высоким, что делает его одним из главных потребителей энергии в экономике. Наиболее энергоемкими в пищевой и перерабатывающей индустрии являются технологии обезвоживания сырья. Именно процесс обезвоживания пищевых растворов, сырья растительного и животного происхождения в значительной степени определяет и качество готового продукта, и затраты на расходы энергии. Обезвоживание – является ключевым процессом во многих пищевых технологиях. Применяются два принципа: выпаривание и сушка. Но затраты энергии на удаление единицы влаги в этих процессах оказываются существенно разными. Если энергетический КПД самого несовершенного процесса выпаривания 85 %, то лучшие сушильные технологии не превышают 40 % [229, 262, 326, 331].

Наибольшее распространение в мире получили конвективные сушилки. Это высокопроизводительные установки, интенсификация процессов массопереноса в которых достигается за счет повышения расхода сушильного агента [324]. Но такой подход оправдан только в условиях низких цен на топливо. А в условиях стабильного роста цен на энергоносители, в условиях энергетического кризиса принципы конвективной сушки не эффективны. Инновационные технологии

зачастую не используются ввиду высокой конструктивной сложности и трудностей эксплуатации [151, 327], либо низкой производительности [256].

Традиционные технологии конвективной сушки сырья столкнулись с серьезными противоречиями. Задача достижения высоких значений коэффициентов массопереноса решается путем увеличения скорости (расхода) сушильного агента. Однако повышение расхода приводит к пропорциональному росту потерь теплоты в окружающую среду. Именно с отработавшим сушильным агентом в окружающую среду теряется 25 % энергии топлива. При достаточно широких исследованиях кинетики процессов выпаривания, сушки и вопросов моделирования, проблемы энергетики процессов обезвоживания, особенно для инновационных технологий, исследуются редко [7, 23].

Самостоятельной серьезной проблемой является методология сравнения энергоэффективности электротехнологий и теплотехнологий, поскольку используются различные виды энергии; отсутствуют объективные показатели эффективности использования энергии в различных технологиях обезвоживания сырья [149, 152, 165, 256, 327, 332, 372, 395]. Эксергетические методы удобны только для термодинамического анализа, экономические показатели в настоящее время – не стабильны. Известные методы энергетического менеджмента, которые оперируют коэффициентом удельного энергопотребления (КУЭ), и удельным расходом энергии на 1 кг удаленной влаги (J), не всегда дают корректные результаты. Поэтому актуален вопрос развития научных основ и методов энергетического менеджмента для объективного сравнения энергетической эффективности технологий [332]. Строгих методов оценки энергетической эффективности, особенно инновационных энерготехнологий, нет. В основе предлагаемой методологии положена следующая гипотеза: «Объективные результаты при сравнении эффективности использования энергии при переработке сырья можно получить на основе системного анализа всей цепи конверсии энергии от топлива до готового продукта» [256, 395].

В соответствии с выдвинутой гипотезой 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 2.2).

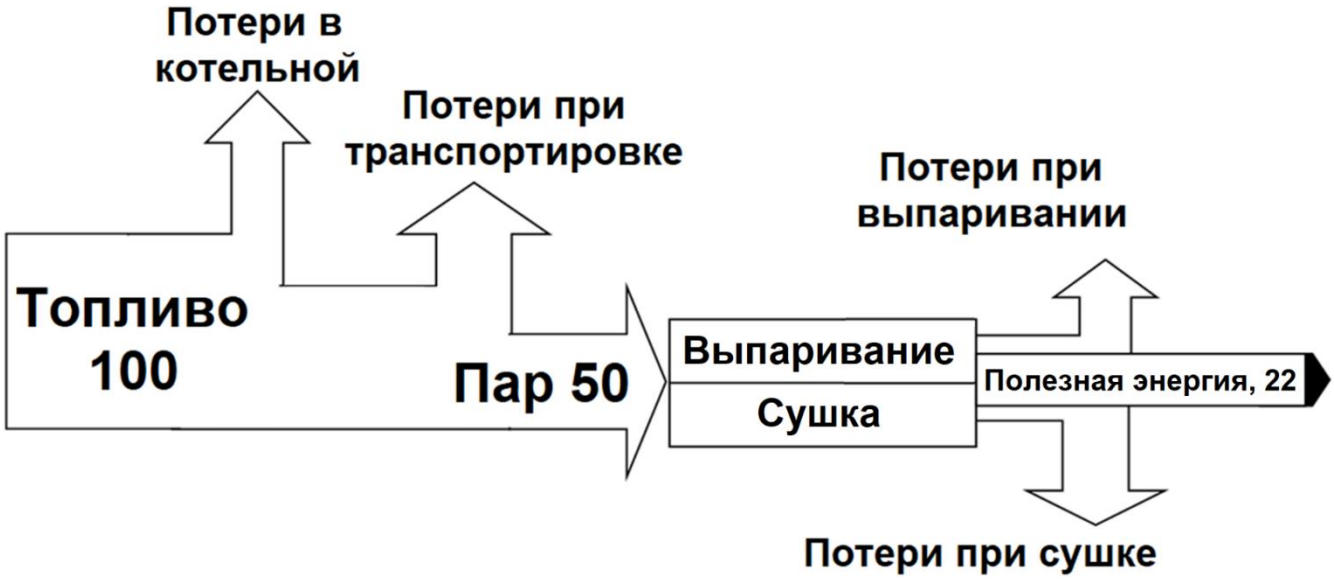


Рисунок 2.2. Конверсия энергии в традиционной технологии обезвоживания

Рассмотрим на таких позициях традиционную для получения концентрированных продуктов технологическую схему, когда после выпаривания проводят сушку. Инновационное оборудование (микроволновой выпарной аппарат и сушилка) используют электрическую энергию. А традиционные аппараты для концентрирования и сушки – другие виды энергии. Предложенная методология позволяет провести объективное сравнение для таких схем.

Энергетика принципов обезвоживания, определенная традиционными методами, иллюстрируется таблицей 2.1.

$$d_o = \frac{\text{кг удаленной влаги}}{\text{кг нефтяного эквивалента}} \qquad (2.5)$$

Таблица 2.1. Энергоемкость технологий обезвоживания

№	Процесс / Параметры	Парообразование	
		Выпаривание	Сушка
1	Теоретические затраты энергии на удаление 1 кг влаги	2,3 МДж	2,3 МДж
2	Действительные затраты энергии на удаление 1 кг влаги	1,5–2,8 МДж	4–7 МДж

2.3. Характеристика объектов исследования

Объектами исследований являются энергоэффективная технология, включающая процессы обезвоживания (выпаривание и сушку) овощей и фруктов, тепловую обработку молока и получения концентратов, а также рабочие процессы энергоэффективного тепломассообменного оборудования (выпарные аппараты и сушилки). Основным аспектом оптимизации являются энерготехнологические показатели этих процессов. Предметом исследований рассматриваются закономерности технологических процессов обезвоживания (выпаривание и сушка) овощей и фруктов, тепловой обработки молока и получения концентратов при организации адресной доставки энергии непосредственно к влаге сырья. Именно это оборудование определяет суммарные энергетические затраты, себестоимость готовой продукции, экологическую безопасность и ее качество.

Для исследований приняты перспективные для Причерноморья овощи, фрукты и твердые отходы переработки растительного пищевого сырья (таблица 2.2).

Основное сырье является термолабильным. Поэтому температурные режимы выпаривания ограничены. В широком диапазоне температур планируются исследования на сахарном растворе, который допускает обработку при повышенных температурах.

Сводка жидких пищевых систем представлена в таблице 2.3.

Поставлена задача проверки возможности применения полученных эмпирических моделей и для других, непищевых систем. Для этого были проведены опыты с модельными системами (таблица 2.4). Характерной особенностью таких систем является наличие полярных молекул. Эти молекулы, включая воду, аминокислоты и сахара, обладают электрическими дипольными молекулами, которые могут взаимодействовать с электромагнитными волнами СВЧ излучения. Полярные молекулы обеспечивают равномерный и быстрый прогрев материала в СВЧ поле, что важно для сохранения качества и текстуры продукта.

Кроме того, этот фактор позволяет более точно контролировать процесс обезвоживания, учитывая изменения в содержании влаги в материале и его способности поглощать СВЧ излучение.

Таблица 2.2. Перечень сырья с твердой структурой

№	Сырье		Готовый продукт		Основной процесс
	Тип	Вид	Вид	Слой, м	
1	Овощи	Морковь	Слайсы Кубики Соломка Порошок	0,003 0,003 0,003 0,003	Сушка
		Лук			
		Картофель			
		Свекла			
		Тыква			
2	Фрукты	Яблоки	Слайсы Кубики Соломка Порошок	0,001-0,012 0,003 0,003 0,003	Сушка
		Айва			
		Виноград			
		Банан			
		Кокос			
		Ананас			
3	Отходы	Шлам	Порошок	0,003	Сушка

Таблица 2.3. Перечень жидких пищевых систем

№ п/п	Сырье		Готовый продукт		Основной процесс
	Тип	Вид	Тип	Регламент температурного режима	
1	Соки	Яблочный	Концентрат	До 40 °С	Выпаривание
		Свекольный			
		Эхинацеи			
		Гранатовый			
		Томатный			
2	Экстракты	Корня мискантуса	Концентрат	До 40 °С	Выпаривание
		Масла кофе			
		Масла виноградных косточек			
3	Вино	Белое	Концентрат	До 40 °С	Выпаривание

Продолжение таблицы 2.3.

№ п/п	Сырье		Готовый продукт		Основной процесс
	Тип	Вид	Тип	Регламент температурного режима	
4	Молоко	Цельное	Сгущенный	До 60 °С	Выпаривание
5	Раствор	Сахарный	Концентрат	До 120 °С	Выпаривание

Таблица 2.4. Перечень модельных систем

№	Система		Готовый продукт		Основной процесс
	Твердая фаза	Жидкость	Тип	Ограничение	
1	Шлам	Этанол	Экстракт	Наличие полярных молекул	Выпаривание
2	Виноградные косточки	Ацетон	Экстракт	Наличие полярных молекул	Выпаривание
3	Древесина дуба	Вода + этанол	Экстракт	Наличие полярных молекул	Выпаривание
4	Корни мискантуса	Вода + этанол	Экстракт	Наличие полярных молекул	Выпаривание
5	Песок	Вода	Смесь	Наличие полярных молекул	Выпаривание

Для проведения комплексных экспериментальных исследований было разработано стендовое оборудование, позволившее решить поставленные задачи, в составе камерной и ленточной сушилок с ИК и СВЧ генераторами. Для исследования процессов выпаривания, из-за ограничения температурных режимов концентрирования, был использован микроволновой вакуумный аппарат. Для измерения текущих параметров процессов использовались компьютеризированные комплексы (рисунки 2.3–2.6), показывающие в on-line режиме основные характеристики исследуемого процесса.

С учетом этих требований изготовлены отдельные узлы стендов и подобраны измерительные системы, описанные ниже. Для измерения температуры в объеме рабочей камеры датчики температуры были помещены в специальные экранированные гильзы.

Для конкретизации поставленных задач был проведен последовательный анализ методик исследований, начиная с инженерных комплексов и заканчивая методами оценки погрешностей измерений.

Рисунок 2.3. Компьютеризированный комплекс для исследования процесса сушки

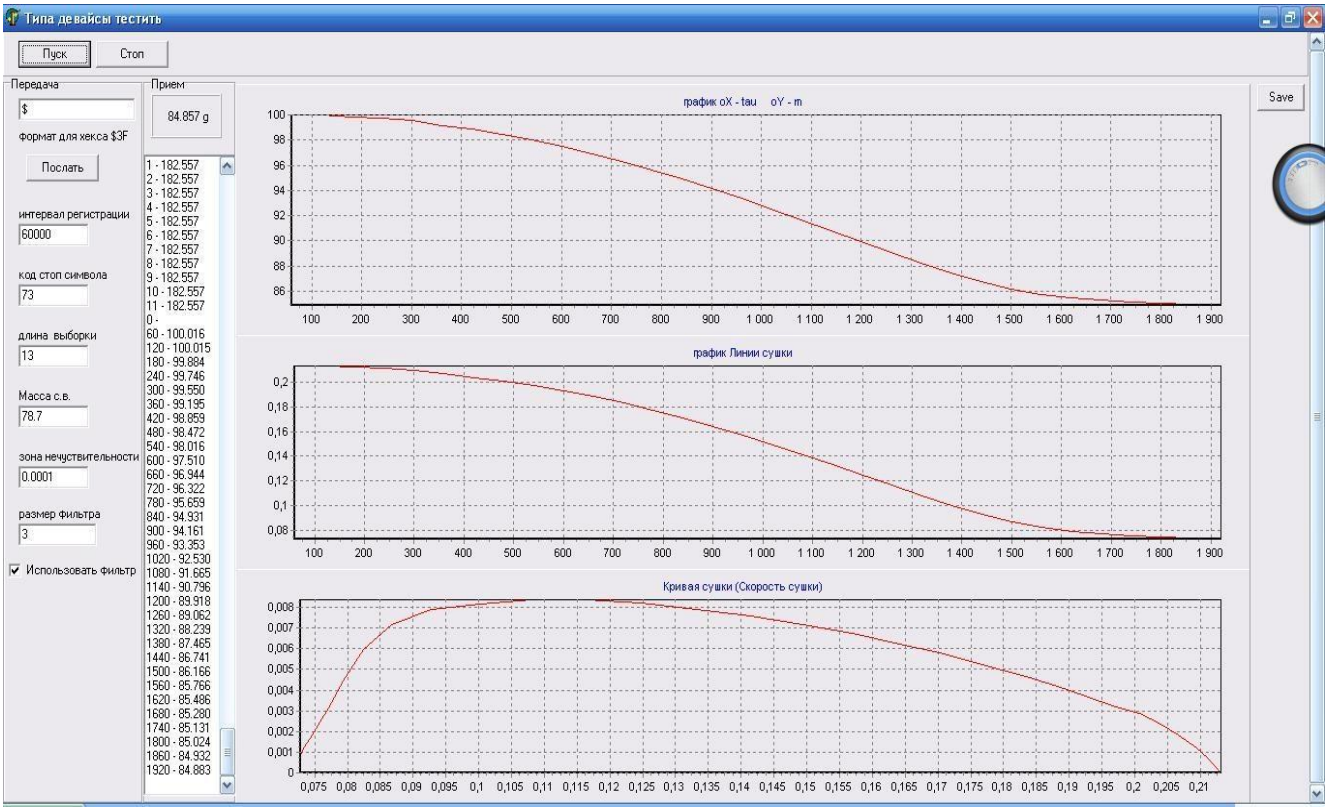


Рисунок 2.4. Главное окно комплекса для исследования процесса сушки

Рисунок 2.5. Компьютеризированный комплекс для исследования процесса выпаривания

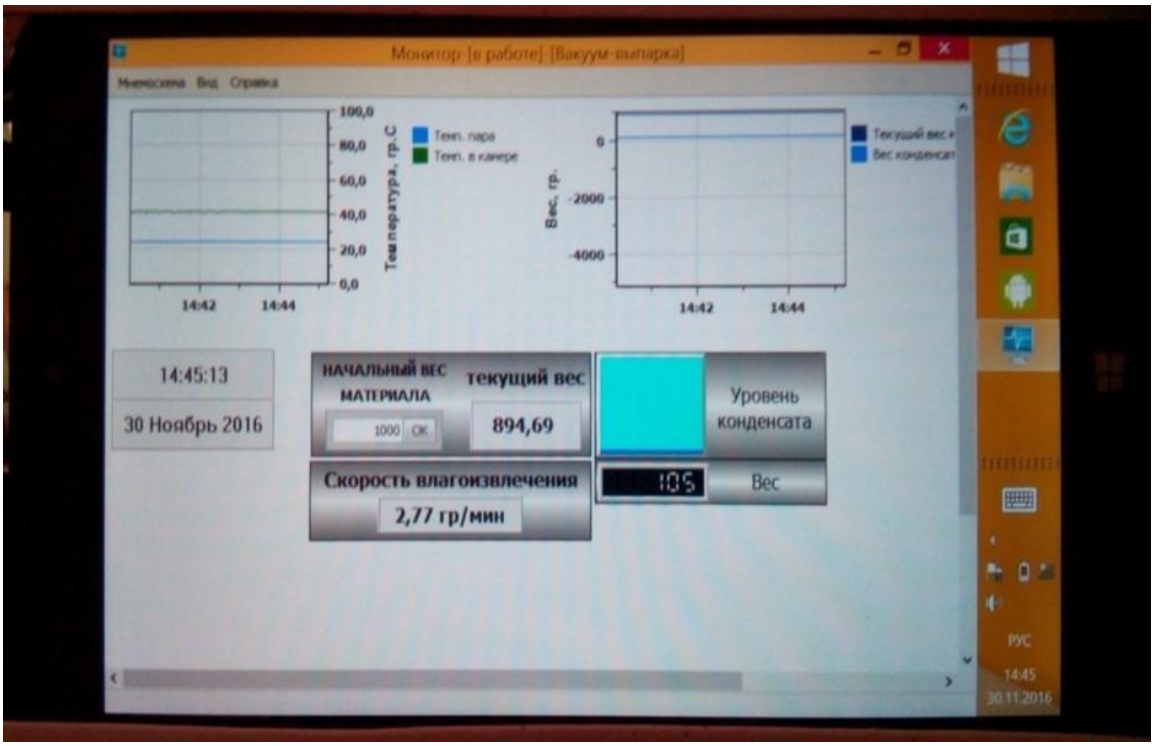


Рисунок 2.6. Главное окно комплекса для исследования процесса выпаривания

2.4. Методы исследования энергетических характеристик

Объектами исследований в этом направлении являются:

– трубопроводы для пара и хладоносителей;

– ограждения строений и корпуса термического оборудования;

– технологические выбросы газов и жидкостей.

Для расчета термического сопротивления нет строгой информации по структуре изоляции и по ее состоянию. В работе использовалась оригинальная расчетно-экспериментальная методика.

Для первых 2 объектов – трубопроводов и поверхностей потери в подавляющем большинстве случаев имеют стационарный, но крайне неравномерный характер. С учетом этого разработана методика определения потерь теплоты от поверхностей ограждений и от корпусов термического оборудования (рисунок 2.7). Первый этап исследований – теплоэнергетический аудит.

Соотношение (2.6) рекомендовано для расчета интенсивности естественной конвекции в неограниченном пространстве. Такое условие на практике всегда выполняется. Разность температур $\left(\Delta t_i\right)$ в (2.6) принимается в зависимости от объекта аудита. Для ограждений это разность температур между воздухом в цеху $\left(t_o\right)$ и внутренней поверхности ограждения $\left(t_i\right)$. Для оборудования это разность температур между температурой поверхности оборудования $\left(t_i\right)$ и воздухом в цеху $\left(t_o\right)$.

Для проведения аудита использован тепловизор FLIR TG167 (рисунок 2.8 а) и пирометр излучения Benetech GM320 (рисунок 2.8 б), которые позволили производить замеры дистанционно. В случае использования отражательной тепловой изоляции, например, пенофола, для получения достоверной точности работали с контактным измерителем температуры DAN-1000 (рисунок 2.8 в).

Потери теплоты с выбросами отработавших теплоносителей определялись из уравнений тепловых балансов по произведению площади сечения, скорости в нем

потока, теплоемкости и разности температур между теплоносителем и окружающей средой.

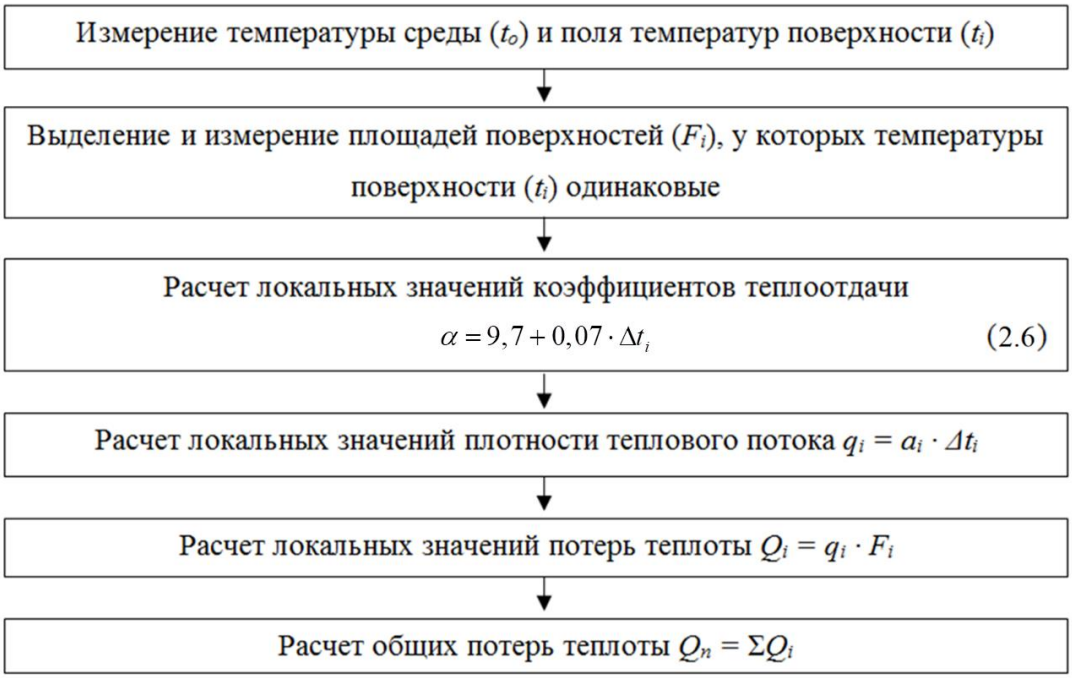


Рисунок 2.7. Методика расчетно-экспериментального определения тепловых потерь от поверхностей оборудования и строений

а) б) в)

Рисунок 2.8. Тепловизор FLIR TG167 (а), пирометр Benetech GM320 (б) и контактный измеритель температуры DAN-1000 (в)

2.5. Методы экспериментальных исследований процессов сушки и выпаривания

2.5.1. Методика экспериментального моделирования процессов сушки

Общая характеристика задач исследования

Эффективность сушильных технологий определяется с позиций кинетики, энергетики и качества высушенного продукта. Кинетическим параметром сушки считается интенсивность обезвоживания, скорость сушки, которая выражается удельным количеством удаляемой влаги в кг/с. Энергетика процесса сушки характеризуется количеством энергии на 1 кг удаленной влаги (МДж/кг). Поскольку процесс сушки растительного сырья – это многофакторная зависимость и известны ключевые факторы, которые влияют как на кинетику, так и на энергетику процесса (рисунок 2.9), поставлена задача экспериментально определить влияние этих факторов. На первом этапе исследовали сушку в ИК поле.

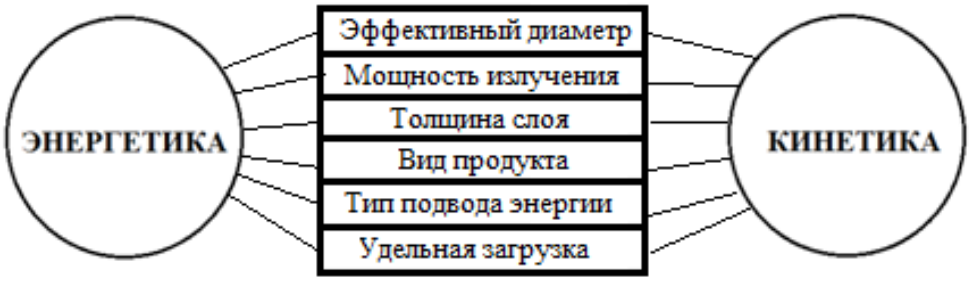


Рисунок 2.9. Факторы, определяющие процесс сушки

Ввиду ограниченной проникающей способности ИК излучения, важным фактором является толщина слоя сырья h, с увеличением которой повышается производительность установки, но затрудняется процесс выхода пара из нижних и средних слоев продукта. А это влияет и на кинетику, и на энергетические затраты процесса сушки.

Мощность излучения N – это наиболее значимый фактор. Кроме того, что мощность влияет и на кинетику, и на энергетику процесса сушки, мощность является инструментом управления в технологическом процессе сушки.

Влияет на параметры процесса сушки и вид растительного сырья. Обусловлено это различной плотностью, структурой, цветом и электрофизическими характеристиками сырья.

Задачей экспериментальных исследований было установить влияние каждого из определяющих факторов на параметры процесса сушки растительного сырья. Методология опытов основывалась на принципе стабилизации всех факторов и изменении того, влияние которого исследуется.

На первом этапе задача ограничивалась опытами в неподвижном слое.

Характеристика объектов и режимов сушки

В качестве объектов исследований были выбраны различные продукты: морковь, свекла, яблоко, картофель, лук и тыква, так как спрос на сушеные слайсы и порошки из этих продуктов в кулинарии растет. Кроме того, подбор продуктов был основан на их цветовом и структурном отличии (таблица 2.5).

Таблица 2.5. Диапазон параметров экспериментальных исследований

Вид продукта	Форма	Мощность N, кВт/м^2	Толщина слоя H, м	Масса M, г
Морковь	Чипсы	1,9–11,3	0,003–0,01	50
	Стружка	1,9–11,3	0,003–0,01	50
Яблоко	Чипсы	1,9–11,3	0,003–0,01	50
	Стружка	1,9–11,3	0,003–0,01	50
Свекла	Чипсы	6	0,003	50
	Стружка	6	0,003	50
Лук	Чипсы	6	0,003	50
	Стружка	6	0,003	50
Тыква	Чипсы	6	0,003	50
	Стружка	6	0,003	50
Картофель	Чипсы	6	0,003	50
	Стружка	6	0,003	50

При этом, все продукты имели относительно равную начальную влажность 83–84 %.

Режимы сушки подобраны с учетом использования двух типов подводимой электромагнитной энергии с различной величиной проницаемости электромагнитного излучения.

Исследования проводились в широком диапазоне изменения входных параметров мощности, толщины слоя и формы высушиваемого продукта (таблица 2.5).

Первый этап экспериментов – это исследование кинетики и энергетики сушки различного растительного сырья в неподвижном слое в ИК поле.

Описание экспериментального стенда для сушки в неподвижном слое

В соответствии с таблицей 2.5 выполнены комплексные исследования сушки овощей и фруктов. Все опыты проведены по оригинальной методике на разработанном компьютеризированном стенде.

Принцип работы экспериментального стенда заключается в воздействии инфракрасного излучения на растительное сырье в процессе высушивания продукта (рисунок 2.10).

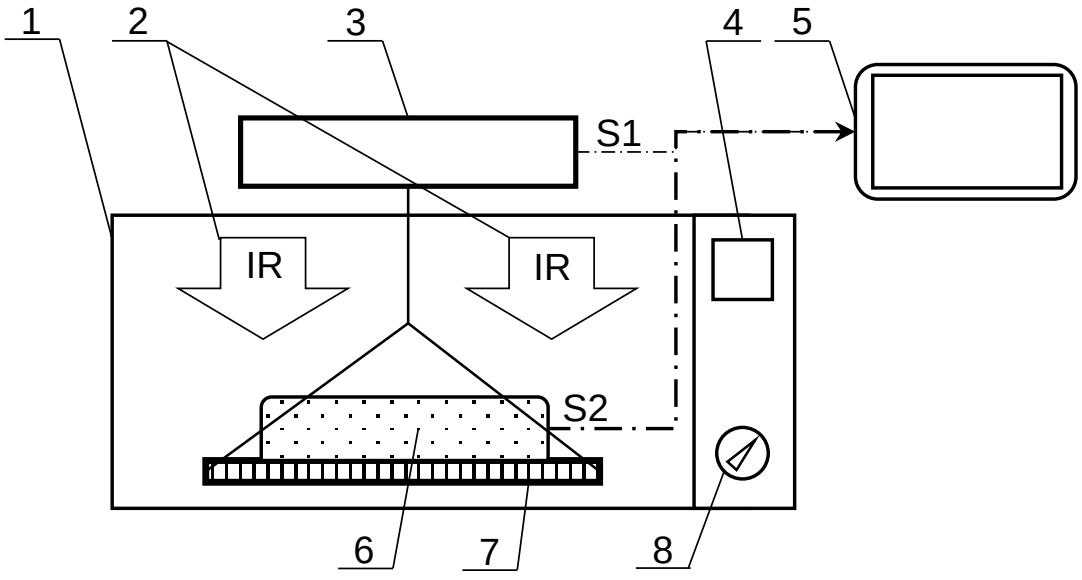


Рисунок 2.10. Схема экспериментальной сушилки с ИК или СВЧ генераторами: 1 – сушильная камера; 2 – генераторы; 3 – электронные весы; 4 – табло времени; 5 – система сбора и обработки данных; 6 – растительное сырье; 7 – кассета; 8 – регулятор мощности ИК или СВЧ генераторов; S1 – сигнал по электронным весам; S2 – сигнал датчика температуры

Экспериментальный стенд (рисунок 2.10) 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 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 (рисунок 2.4). Количество потребленной установкой электроэнергии регистрировалось с помощью энергомера.

Описание экспериментального стенда для сушки в движущемся слое

Результаты исследований процесса сушки плодов и овощей, проведенные на установке, описанной в предыдущем разделе, позволяют моделировать проведение этого процесса в неподвижном слое продукта и, соответственно, рассчитать параметры камерных сушилок с неподвижным слоем продукта. Реализация непрерывного процесса удаления влаги требует проведения процесса сушки в движущемся слое продукта.

Целью проведенных исследований было выявить зависимости, которые описывают динамику процессов микроволнового и инфракрасного нагрева, а также процесса удаления влаги в движущемся плотном слое растительного сырья. Дополнительной целью была разработка методики для расчета параметров установок различной производительности, предназначенных для комбинированной микроволновой и инфракрасной сушки растительного сырья разного назначения. Особенностью экспериментов являлась необходимость испытания динамики нагрева слоя, движущегося в ленточной сушилке в пределах резонаторной камеры, которая соединена с транспортным каналом, то есть разомкнутой системы: микроволновая камера – нагрев – транспортный тоннель. Распределение микроволновой энергии такой системы в значительной степени отличается от распределения в замкнутой камере. Одним из вопросов в работе, на который следует ответить по результатам испытаний – в какой степени произойдут изменения кинетики микроволнового и инфракрасного нагрева слоя сырья при его движении, а также в условиях резонаторной камеры – транспортный тоннель. Еще одной важной задачей является

безопасность установки в условиях открытых сечений (приема и выгрузке сырья) транспортного канала.

Методика определения влажности исходного сырья

Влажность исходного продукта определялась по общепринятой методике – методом высушивания до постоянной массы при температуре 80 °С. В предварительно высушенный бюкс с известной массой помещалось 5 г продукта. Время высушивания составляло около 10–15 ч. После этого бюкс помещался в эксикатор для охлаждения на 30 минут, по истечению которых проводилось взвешивание на аналитических весах Radwag AS 220/C с точностью ± 0,0004 г. Затем бюкс вновь помещался в сушильный шкаф на 1–1,5 часа, после чего операция повторялась. Данные манипуляции проводились до тех пор, пока разница между показаниями массы бюкса не превышала 0,0005 г.

Начальная влажность исходного продукта рассчитывалась по формуле:

$$w = \left(1 - \frac{m_c}{m_в}\right) \cdot 100\ \% \qquad (2.7)$$

где, m_c – масса сухого продукта, кг;

$m_в$ – масса исходного продукта, кг.

Методика определения скорости движения ленты

Одним из важных параметров ленточной сушильной установки, влияющим на интенсивность процесса сушки, является скорость движения ленты. В движение лента приводится низкооборотным двигателем, регулирование производительности которого осуществляется посредством многооборотного потенциометра. Таким образом, представляется возможность организовать несколько режимов скоростей ленты в диапазоне 0,5–75 мм/с.

Измерение скорости движения ленты проводилось следующим образом. Параллельно ленте на вращающиеся барабаны натягивалась нить, к которой крепился флажок. В таком случае, нить движется с той же скоростью, что и лента. Заведомо зная, геометрические данные сушильной установки с помощью секундомера фиксировалось время прохождения флажка определенного расстояния.

Методика определения степени загрузки ленты сырьем

Скорость и качество сушки напрямую зависит от толщины слоя продукта на ленте. Таким образом, при недостаточной загрузке производительность сушильной установки будет низкой, а чрезмерная загрузка ленты чревата ухудшением качества готового продукта. Поскольку верхний слой продукта будет препятствовать выходу влаги из нижнего слоя. В таком случае актуальным является вопрос о регулировании степени загрузки ленты.

Подача продукта на ленту осуществлялась посредством бункера с поперечным отверстием, степень открытия которого с высокой точностью регулируется при помощи специальной рукоятки. Данный механизм позволяет четко дозировать подачу сырья на ленту, тем самым оказывая влияние на общую производительность установки и качество готового продукта.

Методика определения коэффициента массоотдачи

Методика расчета коэффициента массоотдачи проводилась в три этапа:

1. Измерение массы продукта в начальный ($m_н$, кг) и конечный момент времени ($m_к$, кг) процесса сушки.

2. Определение скорости сушки в определенный момент процесса M, кг/с.

$$M = \frac{m_н - m_к}{\Delta\tau} \tag{2.8}$$

3. Перевод единицы измерения скорости сушки W от единицы массы за единицу времени (кг/с) к единице объема за единицу времени (м^3/с).

$$W = M \cdot \frac{1}{\rho} = \frac{кг}{с} \cdot \frac{м^3}{кг} = \frac{м^3}{с} \tag{2.9}$$

4. Измерение ширины (a, м) и длинны (b, м) продукта на кассете.

5. Определение площади зеркала испарения f, м^2.

$$f = a \cdot b \tag{2.10}$$

6. Определение коэффициента массоотдачи β, м/с.

$$\beta = \frac{W}{f} \tag{2.11}$$

2.5.2. Методика экспериментального моделирования процессов выпаривания

Общая характеристика задач исследования

В качестве объектов исследования были рассмотрены жидкие гомо– и гетерогенные системы. Классификация проводилась по типу растворителя: на водо–, спирто– и ацетоносодержащие. К водосодержащим были отнесены: соки (гранатовый, яблочный, свекольный и эхинацеи), томатная паста, молоко, а также модельные объекты (песок + вода, дуб + вода). В качестве спиртосодержащих исследованы: вино (10 % спирта), экстракт корня мискантуса (42 % раствор спирта), экстракт кофейного масла и кофейный шлам со спиртом. Дополняет линейку объектов исследования ацетоносодержащий экстракт масла виноградных косточек.

Одной из основных целей выбора вышеуказанных объектов являлось получение дорогого и качественного продукта, который пользуется спросом в малых количествах (концентрат вина, кофейное масло, масло виноградных косточек, и др.). Также немаловажным фактором выбора был региональный спрос на готовый продукт (концентраты соков, жидких молочных продуктов, и пр.).

Для основного ряда объектов эксперименты проводились при стабильной подводимой мощности электромагнитного поля и при минимальном давлении (0,01 МПа). На примере яблочного сока были исследованы влияния широкого диапазона мощностей. В широком диапазоне давлений проведены эксперименты на сахарном растворе.

Описание экспериментального стенда

Для выполнения комплексных экспериментальных исследований разработан специальный стенд, который позволил решить поставленные задачи.

Основными узлами экспериментального стенда (рисунок 2.11) являются: выпарная камера, конденсатор (КД), водоохладитель (ВДО), сборник конденсата (СК), вакуум-насос (ВН) и измерительно-вычислительный комплекс (ИВК).

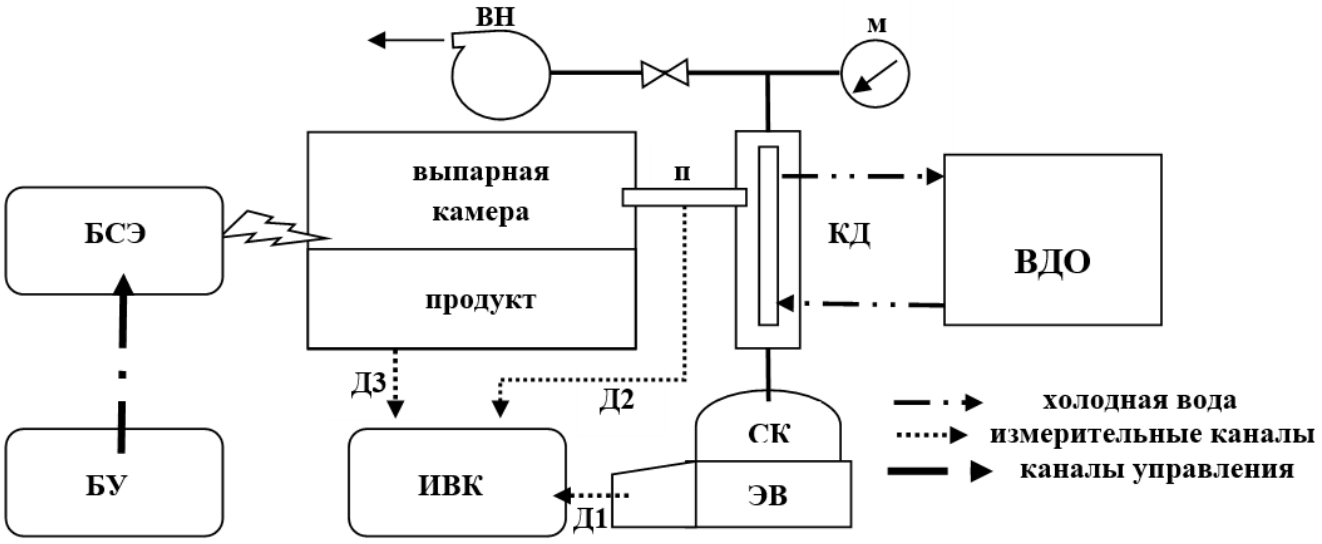


Рисунок 2.11. Схема экспериментального стенда

Паровые объемы выпарной камеры и конденсатора соединены паропроводом (n), контроль вакуума в системе проводился образцовым вакуумметром $(м)$. Подвод электромагнитной энергии осуществлялся блоком силовой электроники (БСЭ) по командам блока управления (БУ), который содержит таймер и регулятор мощности. Водоохладитель состоит из паровой компрессорной холодильной машины, емкости с охлаждаемой водой, регулятора температуры воды и циркуляционного насоса, который обеспечивает подачу холодной воды в конденсатор (КД). Стенд компьютеризирован, текущая информация от электронных весов (датчик Д1), измерителя температуры пара на выходе (датчик Д2) и продукта в выпарной камере (датчик Д3) через интерфейс поступала, регистрировалась и обрабатывалась процессором ИВК. В стенде использовались электронные весы (ЭВ) типа ТВЕ-0,21-0,01 и датчики температур типа Dallas DS 18b20. Сбор информации осуществлялся при помощи планшета CHUWI CW1506. Разработанная программа предусматривала отображение на экране дисплея термограмм, кинетики убыли влаги из камеры и мгновенные значения скорости удаления влаги (грамм в минуту). Весы (рисунок 3.13) регистрировали вес конденсата в сборнике (СК). Таким образом, с высокой точностью определялся выход пара.

Методика определения концентрации сухих веществ в продукте

Масса сухих веществ модельных объектов равна массе твердой фазы, которая, перед смешиванием с жидкой фазой, высушивалась и взвешивалась на аналитических весах Radwag AS 220/C (рисунок 2.13).

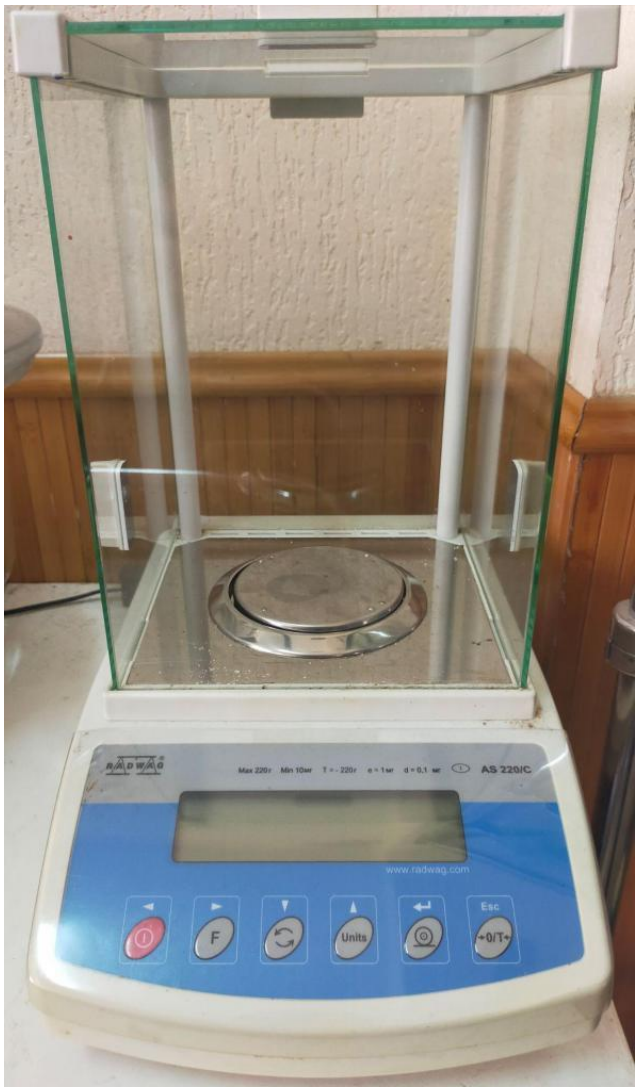


Рисунок 2.12. Аналитические весы Radwag AS 220/C

Концентрация сухих веществ в продуктах, используемых при изучении процесса выпаривания, которыми являлись фруктовые и овощные соки, экстракты, растворы и пр., измерялась с помощью рефрактометра (Hanna Instruments HI 96801) (рисунок 2.12).

Рисунок 2.13. Цифровой рефрактометр HI 96801

Методика определения теплофизических свойств продуктов

Теплофизические свойства продуктов напрямую зависят от температуры. В литературе представлены зависимости [107]:

– плотности ρ (кг/м^3) от температуры t (°C) для томатного сока:

$$\rho = 1120\left(0,9992 - 0,0459\left(\frac{t-20}{20}\right) + 0,0233\left(\frac{t-20}{20}\right)^2 - 0,0046\left(\frac{t-20}{20}\right)^3\right) \quad (2.12)$$

– плотности ρ и удельной теплоемкости c_p (Дж/кг*К) от температуры t для молока:

$$\rho = 1028,7\left(1 - 0,0064\left(\frac{t-20}{20}\right) - 0,0016\left(\frac{t-20}{20}\right)^2 + 0,0002\left(\frac{t-20}{20}\right)^3\right) \quad (2.13)$$

$$c_p = 3935,6\left(0,9956 + 0,0158\left(\frac{t-20}{20}\right) - 0,0069\left(\frac{t-20}{20}\right)^2 + 0,0015\left(\frac{t-20}{20}\right)^3\right) \quad (2.14)$$

– плотности ρ и удельной теплоемкости c_p от температуры t для вина:

$$\rho = 1086\left(1 - 0,0069\left(\frac{t-20}{20}\right) - 0,0014\left(\frac{t-20}{20}\right)^2\right) \quad (2.15)$$

$$c_p = 3609\left(1,004 - 0,0014\left(\frac{t-20}{20}\right) - 0,0093\left(\frac{t-20}{20}\right)^2 + 0,0049\left(\frac{t-20}{20}\right)^3\right) \quad (2.16)$$

При всем этом данные для определения удельной теплоты парообразования r (кДж/кг), а также плотности ρ и удельной теплоемкости c_p для ряда других объектов отсутствуют. В связи с этим было принято использовать значения ρ, c_p и r:

– для водосодержащих систем:

$$\rho = 999,48\left(0,9984 - 0,0004\left(\frac{t-5}{5}\right) - 0,0001\left(\frac{t-5}{5}\right)^2\right) \quad (2.17)$$

$$c_p = 4204,8\left(0,9697 + 0,0112\left(\frac{t-5}{5}\right) - 0,0006\left(\frac{t-5}{5}\right)^2\right) \quad (2.18)$$

$$r = 2470,7 - 1,66 \cdot t - 0,48 \cdot 10^{-2} \cdot t^2 \quad (2.19)$$

– для спиртосодержащих систем:

$$\rho = 824,4\left(1,0002 - 0,2762\left(\frac{T-273}{273}\right) - 0,0056\left(\frac{T-273}{273}\right)^2\right) \quad (2.20)$$

$$c_p = 1370\left(1 + 0,0243\left(\frac{t-10}{10}\right) + 0,0004\left(\frac{t-10}{10}\right)^2\right) \quad (2.21)$$

$$r = 905\left(0,9983 - 0,0114\left(\frac{t-10}{10}\right) + 0,0013\left(\frac{t-10}{10}\right)^2 - 0,0001\left(\frac{t-10}{10}\right)^3\right) \quad (2.22)$$

– для ацетоносодержащих систем:

$$\rho = 801,9\left(0,9994 - 0,0131\left(\frac{t-10}{10}\right) - 0,0003\left(\frac{t-10}{10}\right)^2\right) \quad (2.23)$$

$$c_p = 2110\left(1,025 + 0,0265\left(\frac{t-20}{20}\right) + 0,0007\left(\frac{t-20}{20}\right)^2 - 0,0001\left(\frac{t-20}{20}\right)^3\right) \quad (2.24)$$

$$r = 552\left(0,9996 - 0,0243\left(\frac{t-20}{20}\right) - 0,0027\left(\frac{t-20}{20}\right)^2 - 0,0002\left(\frac{t-20}{20}\right)^3\right) \quad (2.25)$$

Методика определения мощности СВЧ поля

Исследования процесса выпаривания проводились в условиях воздействия микроволновой энергии. Таймер СВЧ установки тарировался цифровым секундомером с погрешностью ±0,2 %. Потребляемая продуктом мощность N

при повышении температуры, не превышающей температуру кипения, определяется по формуле:

$$N = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \left(t_к - t_н\right) \tag{2.26}$$

Объем раствора V изначально известен. Плотность ρ и удельная теплоемкость c_p для воды, спирта и ацетона рассчитывались по формулам (2.17–2.25). Температуры раствора $\left(t_н, t_к\right)$ измерялись при помощи электронного контактного термометра DAN-1000.

Методика определения утечки СВЧ поля

Важным параметром безопасной работы микроволновой установки является отсутствие утечки электромагнитного поля. Данный фактор негативно влияет, как и на организм человека, так и на производительность самой установки. Поскольку часть энергии, которая должна быть затрачена на нагрев влаги в продукте и превращения её в пар, вырывается наружу, тем самым снижая КПД всей установки. Таким образом, выполнение установки должно быть герметичным относительно электромагнитной волны.

Рисунок 2.14. Измеритель напряженности электромагнитного поля Tenmars TM-190

Определение утечки микроволнового поля осуществлялось с помощью многофункционального измерителя напряженности электромагнитного поля Tenmars TM-190 (рисунок 2.14), который отображал, где именно и какая степень утечки присутствует.

Методика определения герметичности СВЧ вакуум-выпарной установки

Основная идея работы установки в условиях вакуума – это отсутствие необходимости непрерывной работы вакуум-насоса, что в свою очередь является необходимым условием работы классической ВВУ. В таком случае должна быть обеспечена высокая герметичность

инновационной установки, сохранение вакуума на протяжении всего процесса выпаривания.

Измерение степени разряжения проводилось образцовым вакуумметром класса точности 0,4. Разряжение создавалось при помощи вакуум-насоса TW-1A производительностью 240 л/мин (рисунок 2.15).

Практическая реализация результатов экспериментальных исследований требует решения вопросов, связанных с поиском рациональных научно-технических предложений по конструкции инновационной СВЧ вакуум-выпарной установки.

Рисунок 2.15. Вакуум-насос TW-1A

2.5.3. Методики стендовых исследований СВЧ вакуум-выпарной установки

Программа исследований СВЧ вакуум-выпарной установки

Программа исследований представлена на рисунке 2.16.

Рисунок 2.16. Программа исследований вакуум-выпарной установки

Целью исследований является:

– установить кинетические зависимости влияния мощности поля, уровня давлений, структуры раствора на величину паропроизводительности;

– оценить теплогидродинамические характеристики установки;

– определить динамические параметры при регулировании мощности поля.

На первом этапе ставится задача исследовать статические характеристики разработанной установки. На втором – изучить влияние ключевых технологических параметров на кинетику процесса парообразования. Обобщение результатов исследований (этап 3) станет основой для разработки инженерной методики расчета и оптимизации установки.

2.6. Методики определения качественных характеристик продуктов

Для определения индивидуальных органических кислот и углеводов в концентрированных яблочных соках, сушёных: яблоках, луке, моркови была

использована методика с использованием высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ), аналогичная описанной в [173]. В качестве рабочей колонки была использована колонка Supelcogel C610H. Для пробоподготовки концентрированный яблочный сок разбавлялся дистиллированной водой в 10 раз. Для сушенных яблок, лука и моркови приготавливали водный экстракт из измельчённого сырья и дистиллированной воды в соотношении массы к объему – 1:10, соответственно.

Определение индивидуальных фенольных веществ, а также фурфурола и 5-гидроксиметилфурфурола в концентрированных яблочных соках, сушёных: яблоках, луке, моркови была использована методика с использованием ВЭЖХ, аналогичная описанной в [261]. Для пробоподготовки концентрированный яблочный сок ничем не разбавлялся. Для сушенных яблок, лука и моркови приготавливали экстракт из измельчённого сырья и водного раствора метанола (80 % об.) в соотношении массы к объему – 1:10, соответственно.

Определение каротиноидов и β-каротина в сушенной моркови было осуществлено методом ВЭЖХ описанным в [394] и методом спектрометрии согласно методике, описанной в [250]. Для пробоподготовки 1 г навески измельчённой сушенной моркови вначале экстрагировали 4 раза по 4 мл хлороформом. Объединённые хлороформные экстракты упаривали на воздухе при комнатной температуре и растворяли в 2 мл изопропилового спирта. Для спектрофотометрического определения каротиноидов изопропиловый экстракт разбавляли в 10 раз ацетоном, для хроматографического определения β-каротина изопропиловый экстракт использовался непосредственно без разбавления.

2.7. Оценка погрешностей измерений

При проведении измерительных операций были использованы приборы с классом точности 0,5–1. С целью снижения влияния погрешностей приборов и

человеческого фактора на полученные результаты проводилась корректировка путём проведения повторных измерений.

Погрешность цифрового секундомера не превышала 0,1 с. Максимальная погрешность измерения температуры прибором DAN-1000 составляла 0,5 °С, термопарой – 1,5 °С.

Масса исходного сырья, конденсата и готового продукта измерялась на прецизионных лабораторных весах ТВЕ-2,1-0,01 класса точности II с ошибкой 0,5 г. Измерение массы образцов при определении влажности сырья и концентрации сухих веществ осуществлялось с использованием аналитических весов Radwag AS 220/С с ошибкой ±0,0004 г. Объем жидких продуктов измерялся в мерной ёмкости с погрешностью в пределах 1 мл (ГОСТ 1770-74).

Погрешность многофункционального измерителя напряжённости электромагнитного поля Tenmars ТМ-190 при измерении напряжённости электрического поля (высоких частот) составлял 2 дБ на 2,45 ГГц.

Погрешности расчета ρ, c_p и r зависят от температуры.

ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 2

1. Предложена общая методология научных исследований технологий обезвоживания, раскрывающая общую концепцию аналитического и экспериментального моделирования, оптимизацию и апробацию полученных результатов.

2. Представлены методики определения: влажности исходного сырья; концентрации сухих веществ жидких систем; теплофизических свойств продуктов; коэффициента массоотдачи; мощности электромагнитного поля и его утечки; скорости движения ленты и степени её загрузки.

РАЗДЕЛ 3.
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ СЫРЬЯ ПУТЕМ АДРЕСНОЙ ДОСТАВКИ ЭНЕРГИИ К ПОЛЯРНЫМ МОЛЕКУЛАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ СВЧ И ИК ДИАПАЗОНОВ

3.1. Методы математического моделирования процессов обезвоживания

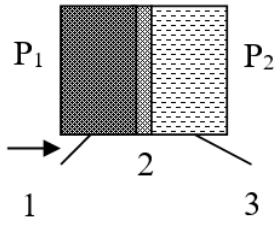
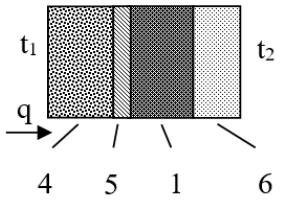
В технике обезвоживания используются 3 принципа удаления влаги: мембранный, выпаривание и криоконцентрирование (таблица 3.1). Всем перечисленным принципам присущи и достоинства и недостатки. Мембранные технологии получают все большее распространение в задачах опреснения и очистки сточных вод [389]. Для концентрирования соков и экстрактов мембранные технологии не получают широкого распространения [129]пылит. Большие проблемы связаны с санитарной обработкой, заменой и приобретением мембран. Наибольшее применение для концентрирования пищевых растворов имеют выпарные технологии [346]. Объясняется это тем, что аппараты для выпаривания предельно просты, обеспечивают высокую производительность [346]. Вместе с тем, требования к качеству концентрата постоянно повышаются. При этом, главной проблемой выпарных аппаратов является то, что с повышением концентрации раствора растет его вязкость, интенсивность циркуляции раствора в аппарате снижается, растет термическое сопротивление пограничного слоя и его температура. Положительных решений этой проблемы не найдено. На практике ограничиваются значением конечной концентрации готового продукта (от 25 % до 60 %).

Высокое качество готового продукта обеспечивают технологии крио-концентрирования [256], особенно блочного вымораживания [22]. Вместе с тем, несмотря на энергетические характеристики и гарантии высокого качества готового

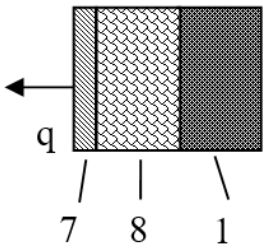
продукта, технологии криоконцентрирования ограничены конечными концентрациями до 30–50 %. Поэтому в работе поставлена задача: разработать технологию концентрирования пищевых растворов, которая при высокой эффективности использования энергии и сохранении пищевой ценности продукта, обеспечивала бы выше, чем у традиционных технологий, значения конечных концентраций.

Решение проблемы основано на гипотезе: «использование инновационной схемы подвода энергии к пищевому раствору при замене традиционной схемы при граничных условиях (ГУ) III рода на схему с ГУ II рода позволит осуществлять объемный подвод энергии к полярным молекулам, что обеспечит практически полное удаление влаги из раствора».

Таблица 3.1. Сравнение технологий обезвоживания

№	Физическая схема	Движущая сила	Достоинства	Недостатки
1	Механический процесс 	Разность давлений $P_1 - P_2$	Минимальные энергетические затраты на процесс из-за отсутствия фазового перехода.	Малая производительность. Ограниченное значение конечной концентрации.
2	Тепловой процесс 	Разность температур $t_1 - t_2$	Простота конструкции. Большая производительность. Простота эксплуатации.	Максимальные энергетические затраты для перевода влаги в пар. Ограниченное значение конечной концентрации. Сложность обеспечения вакуума. Опасность порчи термолабильных компонентов сырья.

Продолжение таблицы 3.1.

№	Физическая схема	Движущая сила	Достоинства	Недостатки
3	Диффузионный процесс 	Разность концентраций $X_H - X_P$	Низкие затраты энергии. Полное сохранение функциональных свойств компонентов	Высокие капитальные затраты. Сложность реализации тоннажного производства. Ограниченное значение конечной концентрации.
1 – раствор, который концентрируется; 2 – мембрана; 3 – вода; 4 – греющий водяной пар; 5 – стенка выпарного аппарата; 6 – вторичный пар; 7 – стенка криоконцентратора; 8 – лед				

Физические схемы, приведенные в таблице 3.1, дают возможность составить параметрические модели и конкретизировать принципы математического моделирования. Ставится задача модернизировать известные дифференциальные уравнения энергии Навье–Стокса, применительно к инновационным источникам энергии электромагнитного типа. Исходя из заявленной гипотезы, модель при ГУ II рода можно попытаться представить как наличие в объеме продукта равномерно расположенных по этому объему внутренних источников энергии. Тогда, аппарат детерминированного математического моделирования может быть эффективно использован. Естественно, с соответствующими начальными и граничными условиями. По всей видимости, полученную модель в виде системы дифференциальных уравнений решить не удастся. Но появится возможность методами теории подобия трансформировать полученную модель в критериальную форму. Уже эта модель имеет 3 прикладных значения:

– установит перечень параметров для экспериментального исследования;

– позволит обобщить результаты опытов, получить ограниченную диапазоном опытов эмпирическую модель;

– позволит использовать эмпирические модели для решения задач проектирования и оптимизации инновационного оборудования.

После этого этапа возможно проведение корректного экспериментального моделирования процессов переноса в электромагнитном поле.

3.2. Концептуальная модель обезвоживания в электромагнитных полях

3.2.1. Формулировка научно-технических гипотез

Инновационные проекты новых технологий обезвоживания базируются на следующих гипотезах.

Гипотеза 1. Перевод сушильной техники на электромагнитные источники энергии приведет к снижению затрат энергии на сушку в связи с направленным, регулируемым подводом энергии к сырью, отсутствием потерь энергии с отработавшим сушильным агентом.

Гипотеза 2. Согласование параметров электромагнитного поля и структуры сырья позволит организовать процесс сушки путем удаления из сырья паровоздушной смеси, что может на порядок снизить энергетические затраты.

Гипотеза 3. Переход от граничных условий (ГУ) III рода к ГУ II рода в выпарных аппаратах позволит реализовать инновационный способ адресной доставки энергии непосредственно к влаге сырья. В таких установках нивелируется влияние вязкости продукта, исчезает понятие термического пограничного слоя, появляется возможность стабилизации величины паропроизводительности в широком диапазоне концентраций продукта. Реализуется отвод пара из всего объема жидкости без термической порчи продукта в пограничном слое. В результате получится продукт высокой концентрации, без привкуса «варки», без изменения цвета и аромата.

Условием функционирования аппаратов с электромагнитным подводом энергии являются следующие факторы [27–29]:

– наличие в объеме продукта жидкости с полярными молекулами;

– соответствие параметров электромагнитного поля решаемой задаче теплопереноса;

– согласование структурных характеристик продукта с параметрами электромагнитной энергии.

Для подавляющего вида пищевого сырья указанные условия выполняются.

Предложенная научно-техническая концепция определяет: «в условиях ЭМП можно организовать адресную доставку энергии к полярным молекулам элементов сырья и обеспечить выход из сырья специфичного потока, который содержит традиционную паровую фазу (диффузионный поток), и жидкость (гидравлический поток). Второй поток сугубо механический, мощность которого определяется разностью давлений. Его можно инициировать, им можно управлять параметрами электромагнитного поля. Поскольку указанный поток определяется не только диффузионными, но и механическими движущими силами ему дан термин «бародиффузионный».

3.2.2. Механизм процесса обезвоживания в инновационной установке

Использование в процессах выпаривания и сушки современных систем с ЭМП позволит создать аппараты для комплексной, малоотходной технологии переработки пищевого и лекарственного сырья при минимизации энергетических затрат [31, 32].

Рассмотрим физическую модель сырья 1, в котором расположен капилляр 2 заполненный жидкостью (рисунок 3.1). Объект находится в электромагнитном поле, плотность которого q_V. Поток электромагнитной энергии 3 проходит через радиопрозрачный слой сырья 1 и достигает капилляра 2, который заполнен жидкостью.

Происходит диссипация электромагнитной энергии, поглощение ее жидкостью.

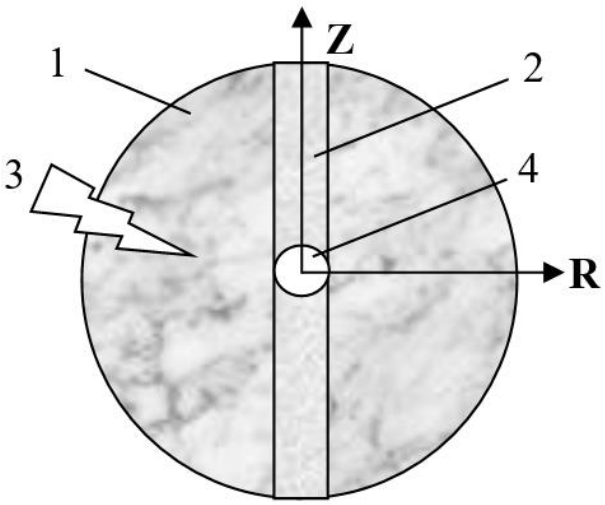


Рисунок 3.1. Физическая модель сырья.

1 – сырье, 2 – капилляр, 3 – поток электромагнитной энергии, 4 – паровой пузырь, Z, R – координаты

Рассмотрим тепловой баланс капилляра. С одной стороны, жидкость получает энергию от потока ЭМП. С другой стороны, жидкость капилляра находится в тепловом контакте с окружающей средой. Наибольшее термическое сопротивление в глубине капилляра. Именно там создаются условия генерации паровой фазы. Образовавшийся паровой пузырек изменяет баланс сил, которые действовали на жидкость в капилляре. Возникает разность давлений, которая инициирует выброс жидкой фазы из капилляра. Такой эффект подтвержден видеосъемкой [12]. Если учесть, что количество жидкости в капилляре небольшое, то процесс развивается достаточно быстро.

В результате изменяется распределение влаги в капилляре. Поскольку сушка – процесс массообменный [55, 80, 96], то закономерности распределения влаги в системе подчиняется уравнению конвективной диффузии Фика:

$$\frac{dw}{d\tau} = D \cdot \frac{d^2 w}{dz^2} + \frac{dw}{dz} \cdot \nu_Z \qquad (3.1)$$

Уравнение Фика в одномерной записи предполагает, что распределение влагосодержаний (w) по оси Z определяется двумя факторами. Первый – это результат классического диффузионного потока (первое слагаемое в (3.1)), а

второй – перемещение жидкости в капилляре за счет разности, например, плотностей. Сам по себе диффузионный перенос в стесненных условиях капилляра процесс достаточно вялый. Второе слагаемое в практических расчетах никогда не учитывается (из-за ничтожно малой величины движущей силы). Благодаря инновационному методу подвода энергии, ее адресной концентрации в жидкости капилляра, потенциальные возможности второго слагаемого в (3.1) существенно повышаются. Именно на этот фактор и опирается предложенная концепция.

Связь между этими параметрами устанавливает уравнение гидравлики, в котором дополнительно учтены (из-за малого диаметра капилляра) силы поверхностного натяжения (σ). Жидкость выбрасывается из капилляра со скоростью (ν), величина которой определяется разностью давлений ΔP:

$$\Delta P = \frac{p\nu^2}{2}\left[\frac{\lambda l}{d} + \Sigma\xi\right] + \rho g l + \frac{\sigma}{d} \tag{3.2}$$

В (3.2) принято: длина каналов (l), их диаметр (d), коэффициент трения (λ), сумма местных гидравлических сопротивлений (ξ). Процесс определяется уравнением материального баланса:

$$V_1(\tau) = V_н - (V_п + V_ж)(\tau) \tag{3.3}$$

Причем, уменьшение объема может быть следствием выброса объема пара $(V_п)$ и части жидкости $(V_ж)$ из капилляра.

Выполним анализ объема сырья, содержащего систему связанных нанокапилляров и микрокапилляров. Под действием ЭМП из сырья выходит поток влаги в виде парожидкостной смеси. Схема потока представляется эквивалентной электродиффузионной схемой (рисунок 3.2).

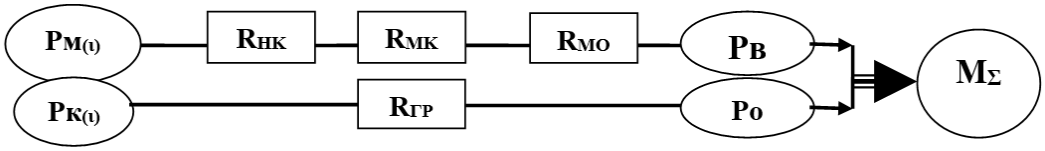


Рисунок 3.2. Эквивалентная электродиффузионная схема сопряженных процессов переноса влаги из системы капилляров.

$Рм_{(\tau)}$ – текущие в сырье значения парциальных давлений водяных паров; $R_{НК}$ – диффузионное сопротивление в нанокапиллярах; $R_{МК}$ – диффузионное сопротивление в микрокапиллярах; $R_{МО}$ – диффузионное сопротивление массоотдачи; $Рв$ – текущие в воздухе значения парциальных давлений водяных паров; $Рк_{(\tau)}$ – избыточное давление в капилляре; $R_{ГР}$ – гидравлическое сопротивление; $Ро$ – давление окружающей среды; M_{Σ} – общее количество удалённой влаги.

Традиционной схеме массопереноса при сушке отвечает только верхняя цепь (рисунок 3.2). Здесь последовательная цепочка диффузионных сопротивлений $R_{Д}$ состоит из суммы: $R_{НК}$ (нанокапилляры), $R_{МК}$ (микрокапилляры) и $R_{МО}$ (массоотдачи). Вторая цепочка – это гидравлический поток, который преодолевает гидравлическое сопротивление $R_{ГР}$ [10].

Суммарный поток всех компонентов в интегральной форме определяется:

$$M_{\Sigma} = \left(M_{П} + M_{Ж}\right) F^{-1} = \frac{Рм - Рв}{R_{Д}} + p\left[\frac{Рк - Ро}{R_{ГР}}\right] \qquad (3.4)$$

Соответствующие механизмы и модели сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2. Механизмы переноса компонентов из капиллярной структуры

Характеристика потока	Движущая сила	Сопротивление потоку	Масса компонента	Модель процесса
Конвективный диффузионный массоперенос	Разность парциальных давлений $Рм - Рв$	Диффузионное сопротивление, $R_{Д}$	$M_{П}$ (поток j_1)	$\frac{dM_{П}}{Fd\tau} = \frac{Рм - Рв}{R_{Д}}$

Продолжение таблицы 3.2.

Характеристика потока	Движущая сила	Сопротивление потоку	Масса компонента	Модель процесса
Механический перенос влаги из капилляров	Разность давлений $Pк - Po$	Гидравлическое сопротивление, $R_{ГР}$	$M_{ж}$ (поток j_2)	$\frac{dM_{ж}}{\rho S d\tau} = \frac{Pк - Po}{R_{ГР}}$

Сформулируем основные механизмы процессов обезвоживания растительного сырья в условиях электромагнитного поля (таблица 3.3).

Выполненный анализ показал, что специфический источник энергии в виде электромагнитного поля определяет особенности моделирования процессов обезвоживания.

Таблица 3.3. Механизмы и стадии процессов обезвоживания растительного сырья в электромагнитном поле

Элементы сырья	Режим и механизм процесса	Стадии процессов
Каналы, заполненные жидкостью	Массоперенос при сушке за счет диффузионных механизмов	1) Подвод энергии к жидкости; 2) Диффузия влаги в стесненных условиях капилляра; 3) Конвективная диффузия от границы раздела в среду.
Каналы, заполненные жидкостью	Перенос жидкости из каналов в среду за счет инерционных сил	1) Формирование центра парообразования; 2) Рост давления в канале; 3) Выброс влаги из каналов в среду.

3.3. Особенности моделирования процессов обезвоживания в условиях электромагнитного поля

Выпаривание и сушка решают одинаковые задачи – удалить влагу из сырья – но относятся к разным видам процессов, с разными движущимися силами. Поэтому, и специфика моделирования кинетики этих процессов тоже отличается. Вместе с тем, часто приходится решать вопросы статики, в которых рассматриваются одновременно эти 2 процесса.

3.3.1. Энергетика и статика комбинированных технологий обезвоживания

Часто традиционные схемы обезвоживания при получении концентратов используют две стадии. Сначала часть влаги удаляется в выпарных аппаратах, а дальше – в сушилках (рисунок 3.3).

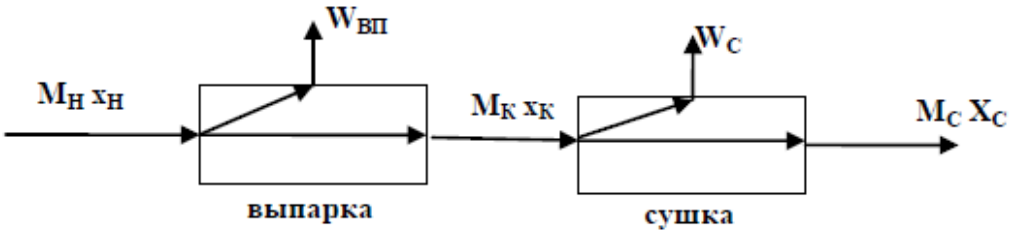


Рисунок 3.3. Двухступенчатая схема обезвоживания сырья

На схеме (рисунок 3.3) принято: M_H – начальный массовый поток сырья с концентрацией сухих веществ x_H; M_K – массовый поток жидкого концентрата с концентрацией x_K; M_C – массовый поток конечного сухого продукта с концентрацией x_C; $W_{ВП}$ – вторичный пар после выпаривания; W_C – поток пара после сушки. Балансовые модели обезвоживания имеют вид:

Для процесса выпаривания:

$$\left.\begin{aligned} M_H &= M_K + W_{ВП} \\ M_K X_K &= M_H X_H \end{aligned}\right\} \tag{3.5}$$

Решение системы (3.5) определяет содержание сухих веществ в концентрате на выходе из выпарного аппарата:

$$X_K = \frac{M_H X_H}{M_H - W_{ВП}} \tag{3.6}$$

Для процесса сушки:

$$\left.\begin{aligned} M_K &= M_C + W_C \\ M_K X_K &= M_C X_C \end{aligned}\right\} \tag{3.7}$$

Решение системы (3.7) позволяет определить концентрации сухих веществ в готовом продукте:

$$X_C = \frac{M_K X_K}{M_K - W_C} \tag{3.8}$$

Рациональные значения X_K определяются процедурой оптимизации, энергетическими факторами. Принципиально, всю влагу можно удалить в сушильной установке. Однако совершенная выпарная установка имеет тепловой КПД 85 %, а самая совершенная сушилка в 2 раза меньше [11].

Инновационные принципы совершенствования техники обезвоживания основаны на использовании технологий адресной доставки энергии непосредственно к влаге в объеме продукта. Технически задача решается за счет электромагнитных полей [12, 156]. Если традиционные сушилки способны удалять до 3 кг влаги на 1 кг использованного органического топлива, то, при организации удаления влаги из продукта в виде «тумана», технически достижимый уровень составит 50 кг влаги к 1кг топлива [22]. Сравнение удельных энергетических затрат (МДж/кг удаленной влаги) сушильной техники приведено в таблице 3.4.

Значительно эффективней энергия используется в процессе выпаривания (таблица 3.5). Для сравнения использованы показатели удельных затрат энергии (j) и число энергетического действия (Bu) [23, 319].

Таблица 3.4. Энергетика сушилок

Радиационная	Кондуктивная	Конвективная	Сублимационная	Электромагнитная	
				ТВЧ	СВЧ
3,2–4,3	5,5–6,2	5,5–9	10–12	6–11	2–4

Таблица 3.5. Энергетическая эффективность обезвоживания

Параметры энергоэффективности	Число ступеней традиционной выпарки					Инновационная СВЧ ВВУ
	1	2	3	4	5	
j, МДж/кг	2,89	1,42	1	0,82	0,68	1,9
Bu	1,15	0,57	0,4	0,33	0,27	0,76

Энергетический фактор определяет эффективность двухступенчатых технологий обезвоживания. Следует отметить, что инновационная СВЧ вакуум-выпарная установка по энергетическим показателям превосходит (таблица 3.5) одноступенчатый выпарной аппарат [22].

3.3.2. Особенности моделирования кинетики процесса сушки при граничных условиях II рода

Рассмотрим принципиальные схемы сушильных технологий (рисунок 3.4). В традиционной конвективной схеме сушильный агент отдает энергию сначала поверхностной влаге (ПВ), затем сухой части продукта (СЧ), которая передает энергию влаге в капиллярах (КВ) [19]. Так протекает традиционная конвективная сушка (рисунок 3.4 а), результатом которой считается поток влажного пара (вп). В ИК сушке (рисунок 3.4 б) капиллярная влага удаляется частично непосредственно электромагнитной энергией, а частично так, как и конвективной сушке [19].

Применение СВЧ сушки (рисунок 3.4 в) позволяет удалять из сырья поток смеси влажного пара и воды (впв). Чем эффективней бародиффузия, тем больше воды выходит в виде капель. С увеличением в потоке доли капель воды снижаются удельные затраты энергии на процесс сушки из-за уменьшения расхода энергии на фазовый переход.

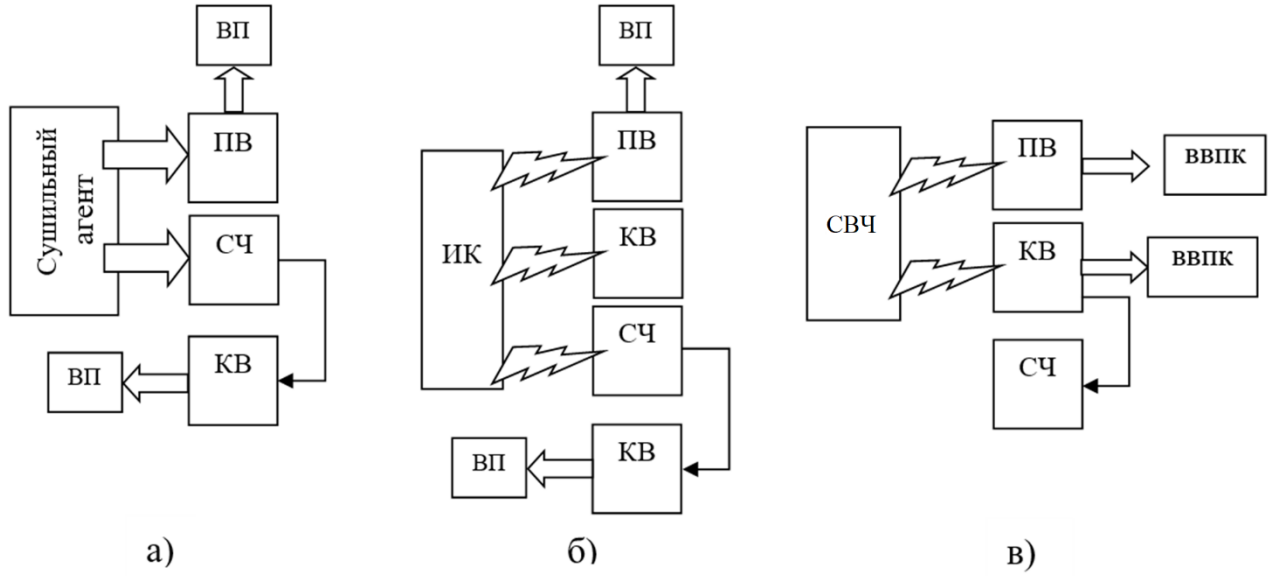


Рисунок 3.4. Принципиальные схемы сушки:
а) традиционная конвективная; б) инфракрасная; в) сверхвысокочастотная

СВЧ сушилка уже сейчас имеет энергетическую эффективность вдвое выше (таблица 2.7), чем конвективные сушилки. А ее технически достижимый уровень составляет 50 кг влаги на 1 кг топлива.

Последние годы характеризуются бурным развитием сушильной техники с электромагнитными источниками энергии [19, 159]. Вместе с тем, совершенствование разработок ведется на основе инженерной интуиции. Уровень понимания процессов взаимодействия продукта и электромагнитных волн значительно ниже представлений электрофизических явлений в генераторах электромагнитного излучения. Техника электромагнитных генераторов опередила теорию тепломассопереноса в процессе сушки при электромагнитном подводе энергии [157, 158]. Если учесть, что прикладные проблемы даже традиционной сушки не доведены до общепризнанных инженерных методов проектирования, то специфика сушки при электромагнитном подводе энергии практически не изучена. Однако успешное моделирование процессов СВЧ сушки может дать мощный импульс широкого внедрения перспективной техники в пищевые технологии.

Проведём анализ инновационной сушки на основе электродиффузионных моделей (рисунок 3.5–3.7).

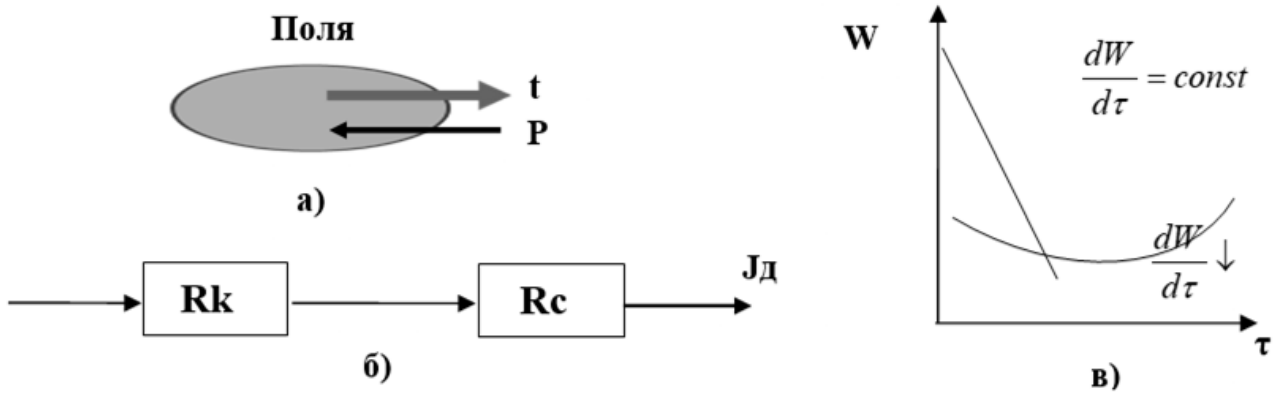


Рисунок 3.5. Электродиффузионная модель традиционной конвективной сушки: а) физическая модель, б) принципиальная схема, в) кинетическая характеристика

В традиционной сушке влага преодолевает внутридиффузионное сопротивление (Rk) и диффузионное сопротивление конвективной массотдачи (Rc). Из сырья удаляется диффузионный поток $(J_Д)$ (рисунок 3.5). Специфично выглядят процессы сушки в условиях электромагнитного поля (рисунки 3.6, 3.7).

Если в традиционных схемах сушки выражены периоды постоянной и падающей скоростей (рисунок 3.5), то в инновационных сушилках микроволновая энергия обеспечивает постоянную подпитку влагой поверхность продукта за счет ламинарной бародиффузии (рисунок 3.6). В традиционных сушилках градиенты температур и давлений направлены противоположно (рисунок 3.5). Самая высокая температура всегда на поверхности материала. В инновационных установках самая высокая температура в глубине продукта (рисунки 3.6, 3.7).

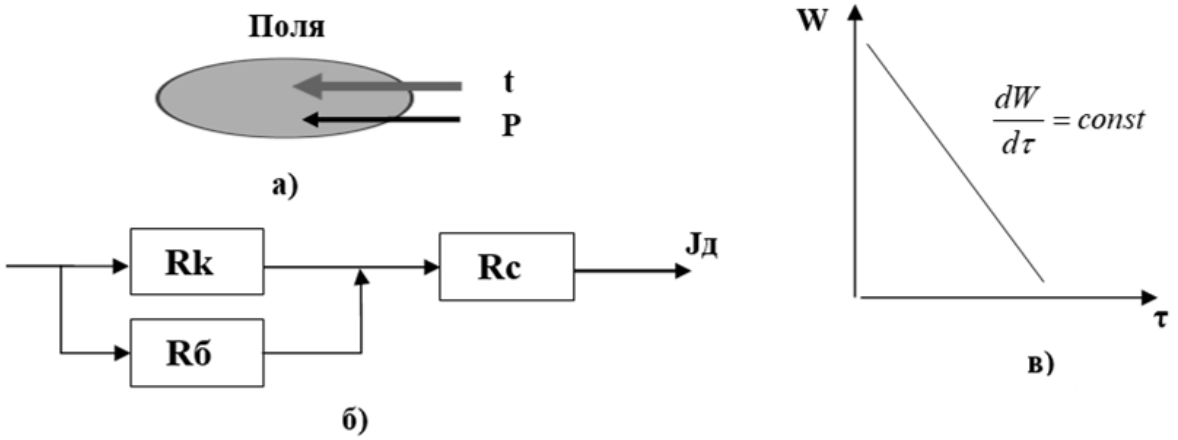


Рисунок 3.6. Электродиффузионная модель ламинарной бародиффузии.
а) физическая модель, б) принципиальная схема, в) кинетическая характеристика

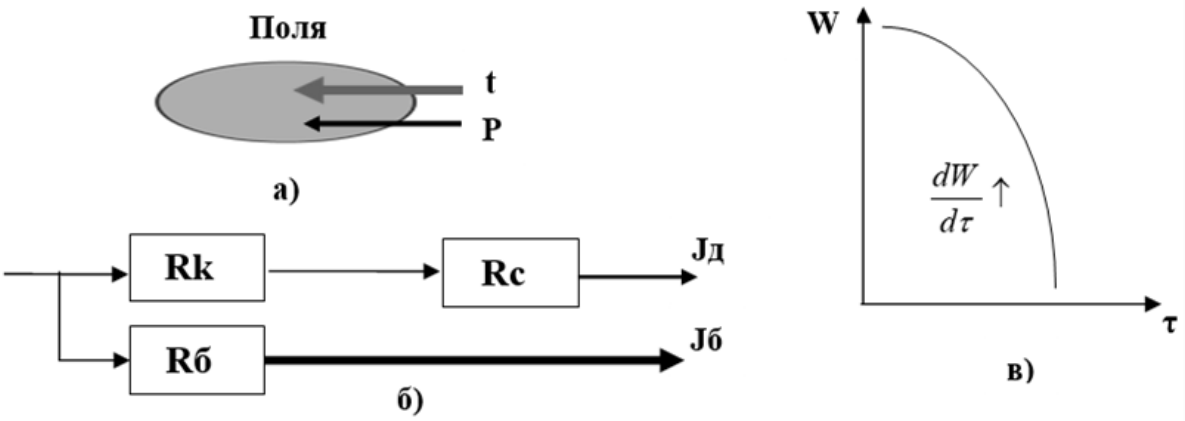


Рисунок 3.7. Электродиффузионная модель турбулентной бародиффузии.
а) физическая модель, б) принципиальная схема, в) кинетическая характеристика

Если реализуется режим турбулентной бародиффузии, то влага в виде тумана выбрасывается непосредственно в поток воздуха (рисунок 3.7). Парадоксально, но

процесс обезвоживания протекает с нарастающей скоростью обезвоживания. Такие картины получены экспериментально [19]. Наиболее низкие значения скорости сушки в первый период работы объясняется тем, что поверхностная влага блокирует процесс бародиффузии, которая начинает развиваться по мере удаления части поверхностной влаги.

3.3.3. Особенности моделирования процесса выпаривания при граничных условиях II рода

Выпаривание – широко распространенная технология пищевых, химических и фармацевтических производств. Однако традиционные выпарные аппараты не отвечают современным требованиям (таблица 3.6).

Инновационные электромагнитные выпарные аппараты, основанные на технологии адресной, точечной обработки элементов сырья, решают проблемные вопросы (таблица 3.7).

Таблица 3.6.Традиционное выпаривание

Механизмы	Теплопередача при ГУ III и I рода.
Достоинство	Простота конструкции для аппаратов периодического действия.
Противоречия	Повышение концентрации раствора ведет к росту его вязкости, интенсивность циркуляции снижается, растет термическое сопротивление пограничного слоя и его температура, что недопустимо для пищевых систем.
Проблемы	Невозможно получать качественный продукт высокой концентрации
Перспективы	На практике ограничиваются концентрацией готового продукта 26–60 °brix.

Рассмотрим принципиальные отличия инновационной, предлагаемой идеи от традиционных выпарных аппаратов (рисунок 3.8).

Таблица 3.7. Электромагнитная технология выпаривания

Механизмы	Объемная обработка сырья при точечном воздействии непосредственно на влагу. Осуществляется при ГУ II рода. Используются электромагнитные генераторы микроволнового диапазона.
Достоинства	Обработка сырья при температурах 20–45 °С. Возможность получения концентрированных растворов (до 92–95 °brix).
Ограничения	Наличие в растворе полярных молекул.

Предлагаемая техника выпаривания принципиально отличается от традиционных решений тем, что «путь» энергии к молекулам воды значительно проще. Представим это в виде физической схемы (рисунок 3.9).

В паровую рубашку (1) поступает водяной пар (5), а отводится конденсат (6). Энергия пара расходуется на образование вторичного пара (7) из раствора (4). При этом осуществляется сложная теплопередача от конденсирующегося пара к раствору. Эффективность теплопередачи определяет сумма термических сопротивлений, основным из которых является термическое сопротивление пограничного слоя (3). В процессе выпаривания повышается концентрация раствора, растет его вязкость. В результате повышается толщина пограничного слоя (3), растет перегрев продукта в этом слое. Появляется привкус варки, либо происходит порча продукта. Не решает проблему даже организация циркуляции раствора. Поэтому на практике ограничивают значения конечной концентрации продукта.

Иначе происходит выпаривание в инновационной технике (рисунок 3.9 б). Здесь вообще отсутствует классическая теплопередача. Энергия электромагнитного поля (8) непосредственно взаимодействует с молекулами воды. Это полярные молекулы и в условиях сверхвысокочастотного электромагнитного поля происходит диссипация энергии поля и образование паровой фазы [19, 30]. Таким образом, инновационная техника принципиально отличается от традиционной:

1. Подвод энергии к раствору при ГУ III рода заменен объемным подводом энергии при ГУ II рода.

2. Адресный подвод энергии непосредственно к молекулам воды позволит: поддерживать стабильную паропроизводительность вплоть до содержаний влаги в растворе 5–10 % при простой схеме управления процессом.

Следующим этапом работы является аналитическое исследование кинетики инновационной сушилки и выпаривания.

Рисунок 3.8. Теплофизическая модель процессов выпаривания:

а) – традиционная техника; б) – инновационная техника

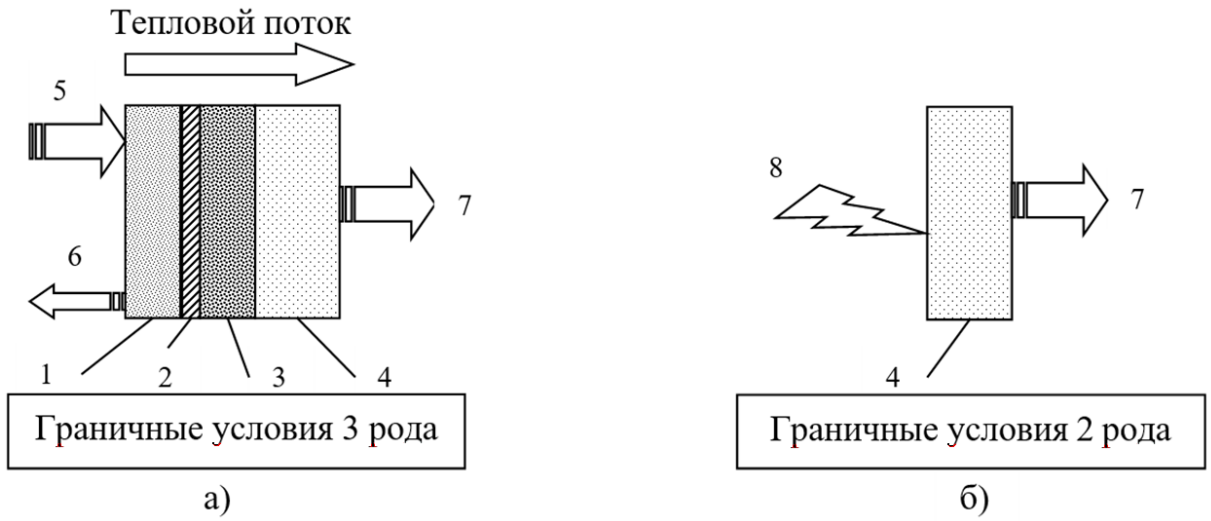


Рисунок 3.9. Физические схемы процессов выпаривания:
а) традиционная техника; б) инновационная техника
1 – паровая рубашка, 2 – стенка выпарного аппарата, 3 – пограничный слой на поверхности стенки, 4 – раствор, 5 – водяной пар, 6 – конденсат, 7 – вторичный пар, 8 – энергия электромагнитного поля

3.4. Математическое моделирование процессов выпаривания в условиях электромагнитного поля

Ставится задача разработать математическую модель процесса взаимодействия микроволнового электромагнитного поля с жидкостью в капилляре (рисунок 3.2). Подвод энергии N – объемный при ГУ II рода.

3.4.1. Параметрическая модель процессов выпаривания в СВЧ ВВУ

На первом этапе проведем исследование параметрической модели процесса (рисунок 3.10).

Параметрами качества считаем конечную концентрацию раствора $\left(X_K\right)$ и удельные затраты энергии на концентрирование 1 кг продукта (j, Дж/кг). Входными параметрами, в общем случае, являются теплофизические свойства

сырья, его расход, начальные значения концентрации и температуры. Учитываются комплексы параметров, которые характеризуют конструкцию аппарата и энергетические показатели электромагнитных генераторов.

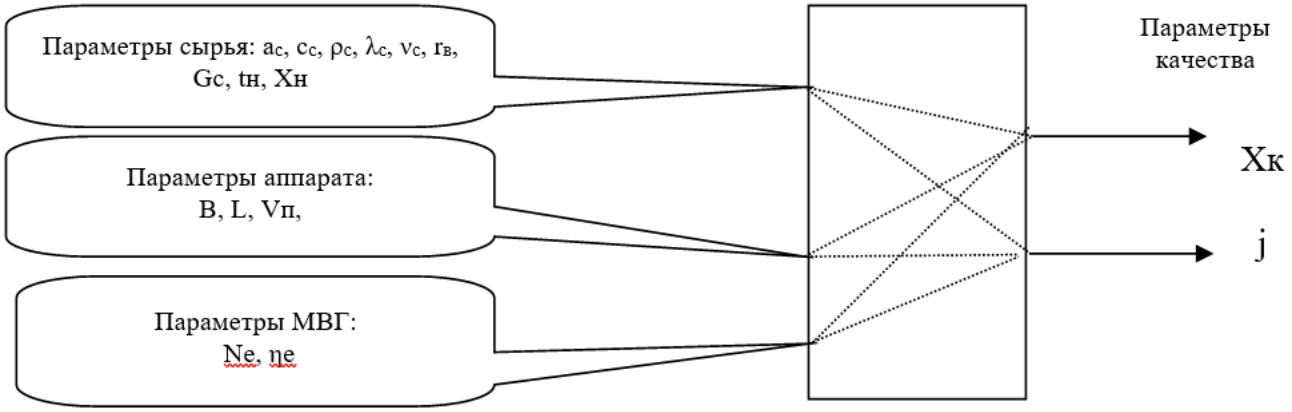


Рисунок 3.10. Параметрическая модель микроволнового выпарного аппарата

На основе схемы (рисунок 3.10) составлена физическая модель аппарата (рисунок 3.11), которая является постановкой задачи формирования математической модели.

На такой основе разработана физическая модель аппарата (рисунок 3.11), которая позволяет решать задачу формирования математической модели.

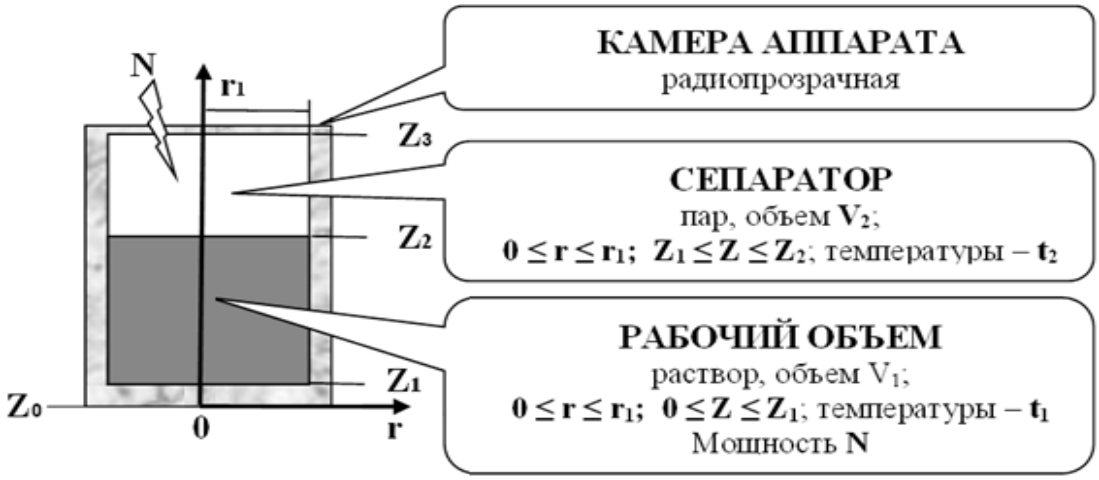


Рисунок 3.11. Физическая модель процесса выпаривания

Основные физические процессы протекают в рабочем объеме, где находится раствор, на который осуществляется энергетическое воздействие от источника электромагнитной энергии мощностью N. Энергия поступает через

радиопрозрачный корпус. Характер подвода энергии – объемный, при ГУ II рода. В сепараторе происходит механическое отделение капель раствора (если они туда попали) от пара, поглощения энергии в объеме сепаратора нет (рисунок 3.11). Третья зона – это радиопрозрачный корпус аппарата (реакционного объема).

Для трёх основных зон следует разработать математическую модель микроволнового вакуум выпарного аппарата.

3.4.2. Формирование нестационарной математической модели процесса выпаривания при граничных условиях II рода

Энергетические взаимодействия между элементами рассмотрим на основе первого закона термодинамики и классического уравнения Фурье-Кирхгофа [76, 84, 85, 103].

В рассматриваемой системе работа не совершается, поэтому первый закон термодинамики для этой задачи запишется в виде:

$$Q_{cm} + Q_V = \Delta U \tag{3.9}$$

где Q_{cm} – количество теплоты, переданное через поверхность контакта (S);

Q_V – количество теплоты, которое поглощается раствором от электромагнитных источников энергии;

ΔU – изменение внутренней энергии раствора.

Тепловые потоки Q_{cm}, Q_V и изменение внутренней энергии тела определяется по рекомендациям [82]:

$$Q_{cm} = \int_S \int_0^\tau dQ d\tau, \;\; Q_V = \int_V \int_0^\tau q_V dV d\tau, \;\; \Delta U = \int_V \int_0^\tau c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} dV d\tau \tag{3.10}$$

где q_V – удельная мощность внутренних источников (стоков) теплоты, Вт/м^3.

Используя уравнение Фурье, преобразуем соотношения (2.17), и запишем в цилиндрической системе координат:

$$\int_S \int_0^\tau dQ d\tau = \int_V \int_0^\tau \left[\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r}\frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right] dV d\tau \tag{3.11}$$

А далее, подставив (3.11) в (3.9), получим:

$$\int_V \int_0^\tau \left[c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) - \frac{\lambda}{r}\frac{\partial t}{\partial r} - \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \phi}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \phi} \right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) - q_V \right] dV d\tau = 0 \quad (3.12)$$

Если все характеристики в (3.12) – непрерывные функции координат и времени, то интеграл равен нулю при равенстве нулю подынтегрального выражения [85]. Таким образом:

$$c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \phi}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_V \quad (3.13)$$

Установили (3.12) пространственно-временную связь между изменением температуры в любой точке объема тела. Как правило, коэффициенты теплопроводности считаются постоянными, и уравнение (3.12) упрощается и приводится к линейному дифференциальному уравнению в частных производных второго параболического типа.

Закономерности (3.12) являются общими для всех 3 зон аппарата. На их основе для каждой зоны модели необходима конкретизация. Для 1 зоны (рисунок 3.11) примем индексы «1». Тогда в рабочем объеме: объем продукта V_1; энергия, потребляемая продуктом $N\eta\tau$; температуры – t_1. Диапазон давлений $P_a \le P \le P_u$.

Процесс протекает в 2 этапа. Для 1 этапа (нагрева продукта от начальной температуры $t_1 = t_н$ до температуры испарения $t_1 = t_u$) и для 2 этапа (собственно выпаривания).

На первом этапе выход пара отсутствует $(W = 0)$, и энергия расходуется только на повышение температуры продукта.

Для высот $0 \le Z \le Z_1$; радиусов $0 \le r \le r_1$:

Начальные условия $(\tau = 0)$: $t_1 = t_н$; $V_1 = V_н$.

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \left(\frac{\partial^2 t_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial t_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 t_1}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial z^2} \right) + \frac{N\eta}{V_1 c_1 \rho_1} \quad (3.14)$$

где $a = \dfrac{\lambda}{(c_1 \rho)}$ – температуропроводность, м^2/с.

Непосредственно выпаривание характеризуется неизменной температурой фазового перехода $\left(t_u = const\right)$. Вся подведенная энергия $\left(N\eta\tau\right)$ расходуется на повышение внутренней энергии раствора. Происходит изменение теплоемкости при переходе жидкой фазы в паровую. В результате – повышение концентрации раствора. Уравнение баланса энергии примет вид:

$$N\eta\tau = V_u t_u \left(c_1\rho_1 - c_2\rho_2\right) \tag{3.15}$$

Выход пара уменьшает объем жидкости в рабочем объеме:

$$V_1\left(\tau\right) = V_н - V_u\left(\tau\right) \tag{3.16}$$

Гидродинамическая ситуация в рабочем объеме отражается уравнением Навье-Стокса. В условиях исследуемой задачи (рисунок 3.11) возможно ограничиться одномерной записью по оси Z:

$$\rho_1 \cdot \omega_1 \cdot \frac{\partial \omega_1}{\partial z} = \rho_1 \cdot g - \frac{\partial P_1}{\partial z} + \mu_1 \cdot \frac{\partial^2 \omega_1}{\partial z^2} \tag{3.17}$$

Вторая зона (сепаратор) заполнена паром растворителя, температура пара – t_2, объем пара V_2, энергия паром не поглощается $\left(N = 0\right)$. Таким образом, при $0 \le r \le r_1;\ Z_1 \le Z \le Z_2$ математическая модель аналогична (3.14) при замене t_1 на t_2 и a_1 на a_2. Аналогично (3.17) выражается гидродинамическая ситуация в сепараторе.

Для зоны 3, которая представляет стенку реакционного объема, температура материала – t_3, объем V_3, энергия стенкой не поглощается $\left(N = 0\right)$. Таким образом, при $r_1 \le r \le r_3;\ 0 \le Z \le Z_3$ модель аналогична (3.14) при замене t_1 на t_3 и a_1 на a_3, а гидродинамическая ситуация – соотношению (3.17).

Полученную систему уравнений следует дополнить граничными условиями взаимодействия между зонами. Соответствующие граничные условия приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8. Сводка граничных условий

Координата на рис. 3.11	Тип ГУ	Модель ГУ
$Z = Z_0$ (граница камеры и окружающей среды).	III рода	$\frac{\partial t_3}{\partial \tau} = -\frac{\alpha_c}{\lambda_3}(t_3 - t_c)$ (3.18)
$Z = Z_1$ (граница раствора и стенки камеры).	III рода	$\frac{\partial t_3}{\partial \tau} = -\frac{\alpha_1}{\lambda_3}(t_1 - t_3)$ (3.19)
$Z_1 \le Z \le Z_2$ (объем раствора).	II рода	$q_V = \frac{N}{V_1} = const$ (3.20)
$Z = Z_2$ (граница раствора и пара).	I рода	$t = t_u = const$ (3.21)
$Z > Z_2$ (граница камеры и окружающей среды).	III рода	$\frac{\partial t_3}{\partial \tau} = -\frac{\alpha_2}{\lambda_3}(t_2 - t_3)$ (3.22)

В соотношениях (3.18–3.22): α – коэффициент теплоотдачи; λ – коэффициент теплопроводности; N – мощность электромагнитного генератора; η – КПД магнетрона; τ – время работы; индексы 1 – раствор; 2 – пар; 3 – стенка реакционного объема (камеры); с – окружающая среда.

Система уравнений (3.18–3.22) устанавливает нестационарное поле температур, а, также, материальный и энергетический балансы процессов выпаривания. Систему необходимо конкретизировать, добавить начальные условия и уравнения связи, которые представлены во 2 разделе. Однако, несмотря на принятые упрощения, в настоящее время решить разработанную систему очень сложно. Самая сложная проблема заключается в решении уравнений Навье–Стокса. Реализация модели оказывается сложной. Для решения этой проблемы, получения инженерной методики привлечем методы теории подобия [52, 53, 99].

3.4.3. Преобразование краевой задачи в модель обобщенных переменных

Анализ работ позволяет сформулировать следующую гипотезу: «организация процесса парообразования при непосредственном подводе энергии к полярным молекулам раствора не вызывает формирования традиционных термических сопротивлений, что может стать (при постоянной мощности поля) предпосылкой

стабильной паропроизводительности, зависящей только от типа раствора и уровня давления в аппарате» [12]. В такой постановке традиционный коэффициент теплоотдачи, который характеризует термическое сопротивление конвективного теплообмена, теряет смысл.

Для таких специфических условий выпаривания в электромагнитном, микроволновом поле предлагаются следующие основные параметры процесса. Эти параметры вытекают из предложенной модели (3.10–3.22), конкретизированы сформулированной гипотезой и представлены в (таблица 3.9).

Таблица 3.9. Основные параметры процесса выпаривания в электромагнитном поле

Параметр	Символ	Размерность
Удельная теплота парообразования	r	$м^2 \cdot с^{-2}$
Мощность микроволнового поля	N	$кг \cdot м^2 \cdot с^{-3}$
Давление	P	$кг \cdot м^{-1} \cdot с^{-2}$
Паропроизводительность	W	$кг \cdot с^{-1}$
Скорость движения продукта	v	$м \cdot с^{-1}$

Все эти параметры, представленные в таблице 3.9, содержат только три основные размерности: длину (L), массу (M) и время (τ). В данном случае число переменных $n=5$, число единиц измерения $m=3$. Тогда, согласно π-теореме (метода анализа размерностей), число безразмерных комплексов, описывающих процесс, должно быть равно $(n-m)=2$. Эти два комплекса достаточно просто комплектуются по данным таблицы 3.9.

$$\frac{Wv}{P}=A\left(\frac{N}{Wr}\right)^m \tag{3.23}$$

Первый безразмерный комплекс в (3.23) является новым, он имеет технологический характер. Он показывает соотношение инерционных сил раствора и статических сил в аппарате. Второй комплекс – число энергетического воздействия (число Bu), которое применяется как обобщающий параметр для

результатов экспериментального моделирования процессов массопереноса в микроволновом поле [13, 14, 20].

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

$$Bu = A \cdot P^n \cdot R^m \qquad (3.24)$$

В (3.24) принято: P – отношение текущего давления в аппарате к базовому, а R – отношение удельных значений теплоты фазового перехода исследуемого раствора к базовому. Из полученного значения числа Bu можно рассчитать либо необходимую общую мощность (при заданной паропроизводительности), либо сделать поверочный расчет и определить производительность аппарата при известной мощности электромагнитного генератора.

3.5. Математическое моделирование сушки в условиях электромагнитного поля СВЧ и ИК диапазона

Техническая идея предлагаемой установки сформулирована в следующей гипотезе: «комбинированное, последовательное воздействие на влажный продукт электромагнитными полями разной частоты позволит инициировать поток влаги из объема сырья за счет действия разных движущих сил: бародиффузионных (обеспечивающих снижение внутреннего диффузионного сопротивления), и конвективных (обеспечивающих удаление влаги с поверхности сырья). Объемный подвод энергии можно осуществлять сверхвысокочастотными интенсификаторами, а поверхностный – инфракрасными». В результате сократятся время процесса и величина энергетических затрат.

3.5.1. Постановка задачи моделирования

Наибольший практический интерес представляют ленточные сушильные установки, где продукт обрабатывается в тонком слое. Принципиальна схема

отдельного модуля ленточной сушилки с СВЧ и ИК генераторами приведена на рисунке 3.12.

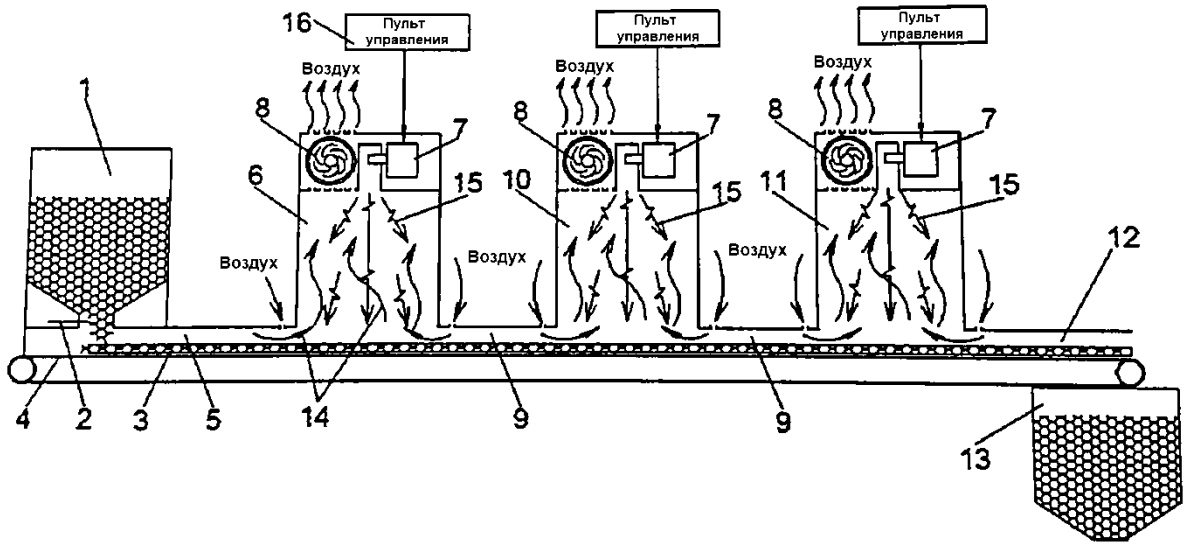


Рисунок 3.12. Структурная схема модульной ленточной сушилки

Установка состоит из: бункера для влажного материала 1, с дозирующим устройством 2, ленточного конвейера 4, для транспортирования материала 3 через зоны сушки, входного 5 и выходного 12 шлюзовых туннелей. Основой установки являются камеры СВЧ сушки материала 6, 10 и 11, каждая из которых оснащена магнетроном (генератором СВЧ излучения) 7 и вентилятором 8. Камеры соединены между собою шлюзовыми туннелями 9. Так же сушилка имеет бункер для обработанного материала 13 и систему управления мощностью магнетронов сушильных камер. Продукт движется с помощью ленты со скоростью w. Скорость воздуха относительно продукта составляет v, а зазор канала его движения – δB. Энергию излучения поглощает слой продукта, толщина которого h. Поэтому можно считать, что в слое продукта действует объемный источник, мощность которого N, а удельная объемная плотность qV. Лента транспортера, толщина которой $\delta Л$, может быть радиопрозрачной, либо связанной электрически с корпусом, т.е. поглощение энергии излучения в ленте отсутствует. Вместе с тем, она взаимодействует при граничных условиях IV рода с нагретым продуктом. Поверхность продукта взаимодействует при граничных условиях

III рода с потоком воздуха. Воздух, принимая влагу продукта, увлажняется и нагревается, если его температура ниже, чем температура продукта.

Особенностью электромагнитного подвода энергии является то, что максимальные значения и температуры, и влагосодержания расположены внутри продукта. Это отличие от традиционных (конвективных и кондуктивных) способов подвода энергии позволяет существенно снизить затраты энергии на обезвоживание [19, 154]. Уровень энергетических затрат зависит от согласования параметров электромагнитного поля, структуры продукта, скорости его перемещения и параметров воздушной среды. Ключевое влияние имеет схема инициирования потока влаги из продукта при максимальных значениях движущей силы процесса влагопереноса.

Основные элементы установки и режимы их работы представлены схемой (рисунок 3.13). Соответствующая параметрическая модель имеет вид (рисунок 3.14).

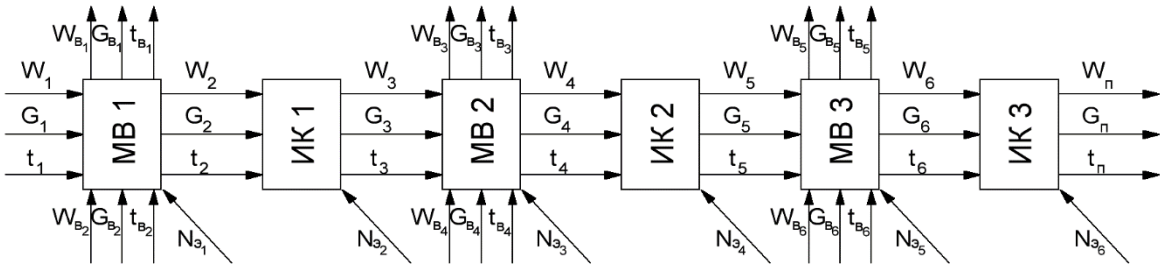


Рисунок 3.13. Аппаратурно-процессуальная схема ленточной сушилки

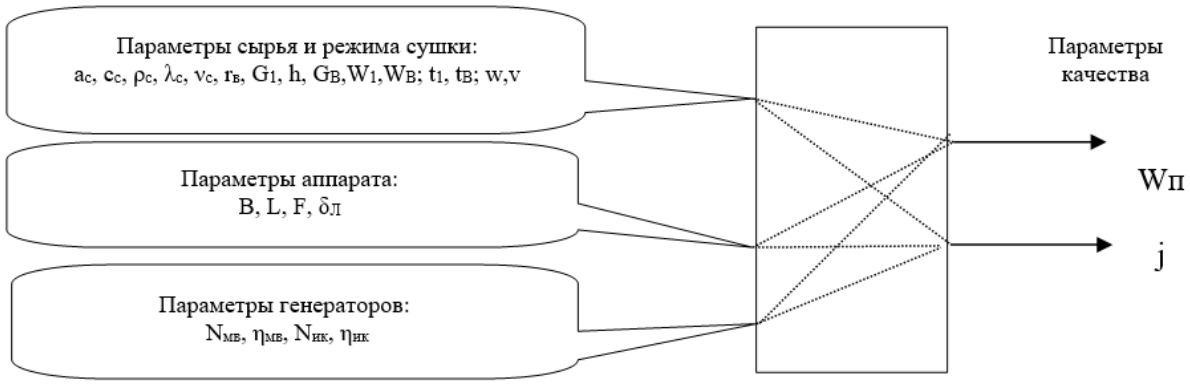


Рисунок 3.14. Параметрическая модель ленточной сушилки

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; теплофизические свойства $(a_c, c_c, \rho_c, \lambda_c, \nu_c, r_в)$. 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 $\delta Л$; скорость перемещения w и площадь поверхности F. Энергетические параметры установки – мощность $(N_{СВЧ}, N_{ИК})$ и КПД $(\eta_{СВЧ}, \eta_{ИК})$, соответственно, СВЧ и ИК генераторов.

3.5.2. Математическая модель сушки в электромагнитном поле

Постановкой задачи моделирования является физическая схема сушилки с комбинированными ИК и СВЧ генераторами энергии (рисунок 3.15).

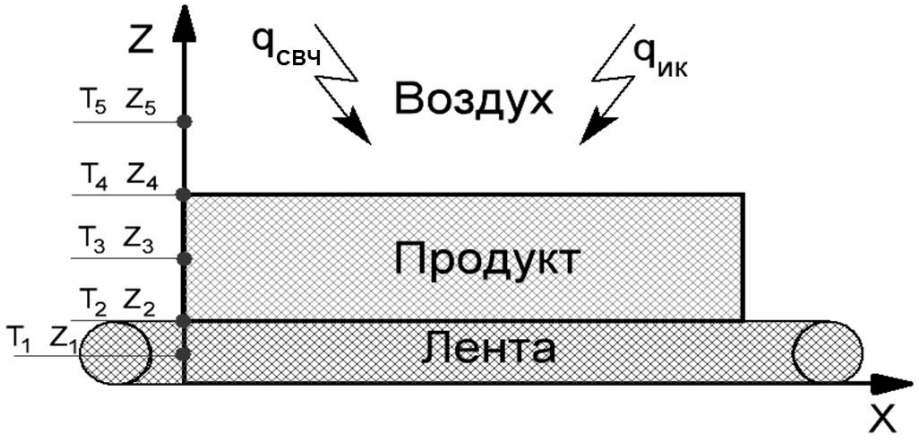


Рисунок 3.15 Физическая модель процесса сушки

Нестационарная модель тепломассопереноса формируется в двухмерном представлении, относительно осей (Z) и (X). Запишем систему уравнений, описывающую протекающие процессы.

При $Z > Z_4$ (воздушный объем):

Уравнение Навье-Стокса:

$$\rho_в \cdot \omega_в \cdot \left(\frac{\partial \omega_в}{\partial x} + \frac{\partial \omega_в}{\partial z} \right) = \rho_в \cdot g - \frac{\partial P_в}{\partial x} - \frac{\partial P_в}{\partial z} + \mu_в \cdot \left(\frac{\partial^2 \omega_в}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_в}{\partial z^2} \right) \quad (3.25)$$

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 t_в}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_в}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c_в \rho_в} \quad (3.26)$$

Поскольку, внутренних источников тепловыделения в воздушной среде нет, то составляющей $\frac{q_v}{c_в \rho_в}$ можно пренебречь:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 t_в}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_в}{\partial z^2} \right) \quad (3.27)$$

Уравнение сплошности:

$$\frac{1}{\rho_в} \cdot \frac{\partial \rho_в}{\partial t} + \frac{\partial \omega_в}{\partial y} + \frac{\partial \omega_в}{\partial z} = 0 \quad (3.28)$$

При $Z = Z_4$ (граница контакта фаз «воздух – продукт»).

Здесь действуют электромагнитные источники энергии при граничных условиях II рода.

В объем продукта, при $Z_2 < Z < Z_4$.

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \cdot \left[\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{q_{ИК}}{c_c \rho_c} + \frac{q_{СВЧ}}{c_c \rho_c} \right] \quad (3.29)$$

Уравнение Фика:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial W}{\partial z} \upsilon_Z \quad (3.30)$$

При возвратном движении лента имеет контакт с воздухом, $\left(Z = Z_1\right)$:

Уравнение Навье–Стокса:

$$\rho_в \cdot \omega_в \cdot \left(\frac{\partial \omega_в}{\partial x} + \frac{\partial \omega_в}{\partial z} \right) = \rho_в \cdot g - \frac{\partial P_в}{\partial x} - \frac{\partial P_в}{\partial z} + \mu_в \cdot \left(\frac{\partial^2 \omega_в}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_в}{\partial z^2} \right) \quad (3.31)$$

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha_в \cdot \left[\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right] \quad (3.32)$$

Уравнение сплошности:

$$\frac{1}{\rho_в} \cdot \frac{\partial \rho_в}{\partial t} + \frac{\partial \omega_в}{\partial y} + \frac{\partial \omega_в}{\partial z} = 0 \quad (3.33)$$

Система уравнений (3.25–3.33) представляет нестационарное двухмерное поле температур и влагосодержаний сырья, как по высоте слоя, так и положению на ленте. Условия на границах воздуха, сырья и ленты приведены в таблице 3.10.

Система уравнений (3.34–3.37) представляет нестационарную модель сопряженных теплоаэродинамических и массообменных процессов переноса.

Систему следует дополнить уравнениями, характеризующими соответствующие начальные условия, и соотношениями связи для каждой среды и продукта.

Таблица 3.10. Сводка граничных условий модели сушки

Координата на рис. 3.15	Тип ГУ	Модель ГУ
$Z = Z_4$ (граница сырья и окружающей среды)	III рода	$\frac{\partial t_B}{\partial \tau} = -\frac{\alpha_B}{\lambda_C}\left(t_C - t_B\right)$ (3.34)
$Z_2 < Z < Z_4$ (объем сырья)	II рода	$q_v = q_{СВЧ} + q_{ИК} = const$ (3.35)
$Z = Z_2$ (граница сырья и ленты)	IV рода	$\lambda_C \left.\frac{\partial t}{\partial n}\right\|_{ст1} = \lambda_Л \left.\frac{\partial t}{\partial n}\right\|_{ст2}$ (3.36)
$Z = Z_1$ (граница ленты и окружающей среды)	III рода	$\frac{\partial t_B}{\partial \tau} = -\frac{\alpha_B}{\lambda_Л}\left(t_Л - t_B\right)$ (3.37)

Аналитическое решение поставленной модели не осуществимо. Поэтому дальнейшие исследования направлены на упрощение полученной модели.

3.5.3. Приведение краевой задачи сушки к модели в обобщенных переменных

В основе исследований использована вторая теорема подобия Федермана–Бекингема, которая дает методику корректной постановки экспериментов и обработки их результатов [52, 53]. Принято кинетическим коэффициентом, который определяет интенсивность процесса сушки, считать коэффициент массоотдачи [55, 80, 96]. В задаче, которая решается, сушка осуществляется двумя потоками: диффузионным и гидродинамическим. Поэтому, результатом преобразований должна стать модель в обобщенных переменных, которая бы учитывала специфику задачи. Во-первых, введем параметр, который учитывает результирующий поток влаги $(\beta_э)$ – эффективный коэффициент массоотдачи. Функциональную зависимость этого коэффициента от основных параметров процесса запишем на основе параметрической модели (рисунок 3.14). Диффузионный поток определяется скоростью потока воздуха (ν), его плотностью (ρ) и вязкостью (μ); скоростью движения ленты транспортера (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 теплотой фазового перехода (r), плотности жидкости $(\rho_{ж})$ и ширины ленты (B). В такой постановке $(\beta_э)$ учитывает и диффузионные, и термические, и гидродинамические сопротивления. Сводка основных факторов, которые определяют $(\beta_э)$, приведена в таблице 3.11.

В таблице (3.11) представлены группы параметров. Первая относится к диффузионной среде: скорость движения воздуха v, его свойства (ρ, μ) коэффициент диффузии D. Группа этих параметров характеризует инерционные свойства потока воздуха. Гидродинамическая ситуация при формировании пограничного слоя на входе в канал выражается соотношением высоты слоя продукта h и ширины слоя B [76, 99].

Таблица 3.11. Основные параметры процесса сушки в электромагнитном поле

Параметр	Символ	Размерность
Эффективный коэффициент массоотдачи	$\beta_Э$	$м \cdot с^{-1}$
Толщина слоя	h	м
Плотность потока воздуха	ρ	$кг \cdot м^{-3}$
Вязкость потока воздуха	μ	$кг \cdot м^{-1} \cdot с^{-1}$
Скорость потока воздуха	v	$м \cdot с^{-1}$
Коэффициент диффузии	D	$м^2 \cdot с^{-1}$
Удельная теплота парообразования	r	$м^2 \cdot с^{-2}$
Мощность электромагнитного поля	N	$кг \cdot м^2 \cdot с^{-3}$
Плотность потока влаги	$\rho_ж$	$кг \cdot м^{-3}$
Разность концентраций	ΔX	$кг \cdot м^{-3}$
Гравитационная постоянная	g	$м \cdot с^{-2}$
Ширина слоя	B	м
Скорость ленты	w	$м \cdot с^{-1}$

Вклад естественной конвекции устанавливается разностью концентраций в потоке ΔX и гравитационным полем. Действие инерционного бародиффузионного потока влаги из объема продукта, который инициируется электромагнитным полем, пропорционально энергии излучения и той энергии, которая необходима для парообразования. То есть величинам удельной теплоты парообразования r и мощности поля N. Самостоятельным фактором, влияющим на интенсивность процессов, является скорость ленты транспортера.

Все эти параметры, представленные в таблице 3.11, содержат только три основные размерности: длину (L), массу (M) и время (τ).

На основе метода анализа размерностей, заменим искомую функцию (3.38):

$$\beta_Э = f\left(h, B, \rho, \rho_ж, \mu, w, v, D, r, N, \Delta X, g\right) \qquad (3.38)$$

зависимостью между числами подобия. В данном случае число переменных $n = 13$, число единиц измерения $m = 3$. Тогда, согласно π-теореме, число безразмерных комплексов, описывающих процесс, должно быть равно $(n - m) = 10$.

Параметры h, ρ, μ принимаем общими для всех безразмерных групп. Тогда, для первой группы запишем:

$$\pi_1 = h^a \rho^b \mu^c \beta_Э{}^g \tag{3.39}$$

Или, в размерной форме:

$$1 = [L]^a \left[\frac{M}{L^3}\right]^b \left[\frac{M}{L\tau}\right]^c \left[\frac{L}{\tau}\right]^g \tag{3.40}$$

Для уравнения (3.40) размерная матрица имеет вид (таблица 3.12):

Таблица 3.12. Размерная матрица

	a	b	c	g	Уравнения
M	–	1	1	–	$b + c = 0$ (3.41)
L	1	-3	-1	1	$a - 3b - c + g = 0$ (3.42)
τ	–	–	-1	-1	$-c - g = 0$ (3.43)

Решением системы уравнений (таблица 3.12) является: $a = b = -c = g$.

Поэтому:

$$\pi_1 = \frac{h \cdot \rho \cdot \beta_Э}{\mu} \tag{3.44}$$

Следующие комплексы определим аналогично, путем объединения h, ρ, μ, c параметрами, что остались (таблица 3.11):

$$\left.\begin{aligned} &\pi_2 = \frac{\Delta X}{\rho}; \quad \pi_3 = \frac{h^3 \rho^{\cdot 2} g}{\mu^2}; \quad \pi_4 = \frac{h\rho w}{\mu}; \\ &\pi_5 = \frac{\rho D}{\mu}; \quad \pi_6 = \frac{h^2 \rho_{ж}{}^{\cdot 2} r}{\mu^{\cdot 2}}; \quad \pi_7 = \frac{h\rho_{ж}{}^{\cdot 2} N}{\mu^{\cdot 3}}; \end{aligned}\right\} \tag{3.45}$$

Отношение внешнедиффузионного потока к внутридиффузионному учитывается числом Пекле (π_9). Геометрию размещения продукта учитывает фактор формы – безразмерный параметрический комплекс (π_{10}). Эти уравнения вместе с (3.44) и системой (3.45) используются для поиска комбинаций, которые дадут структуру уравнения в обобщенных переменных (таблица 3.13).

Таблица 3.13. Комбинации параметров и числа подобия

№	Параметр	Модель	Обобщенные числа подобия
1	π_1	$\frac{\beta\rho h}{\mu}=\frac{\beta h}{\nu}$	Безразмерный коэффициент массоотдачи
2	π_4	$Re=\frac{h\rho w}{\mu}=\frac{hw}{\nu}$	Число Рейнольдса
3	$(\pi_5)^{-1}$	$Sc=\frac{\rho D}{\mu}$	Число Шмидта
4	$\frac{\pi_5}{\pi_1}$	$Sh=\frac{\beta_Э h}{D}$	Число Шервуда
5	$\frac{\pi_1}{\pi_4}$	$St_д=\frac{\beta_Э}{w}$	Число Стантона
6	$\pi_2\pi_3(\pi_8)^3$	$Gr_д=gh^3\rho\Delta X\,\mu^{-2}$	Диффузионное число Грасгофа
7	π_9	$Pe_д=\frac{\nu h}{D}$	Диффузионное число Пекле
8	$\pi_7(\pi_4\pi_6)^{-1}$	$Bu=N\left(r\nu h^2\rho_{ж}\right)^{-1}$	Число энергетического действия
9	π_{10}	$Ff=\frac{h}{B}$	Фактор формы

Число энергетического действия впервые было предложено в работе [155]. Физический смысл числа Bu заключается в том, что устанавливается соотношение величины затраченной электромагнитной энергии, и энергии базового процесса. Такой базовой энергией может считаться энергия, которая характерна для традиционной технологии.

С ростом N растет значение числа Bu, растет разность давлений, интенсифицируются выбросы из капиллярной структуры. Это приведет к росту коэффициента $\beta_Э$. 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.

Таким образом, получаем:

$$St_m=A\cdot(Re)^q\cdot(Gr_д)^g\cdot(Sc)^n\cdot(Bu)^p\cdot(Pe_д)^m\cdot(Ff)^k \qquad (3.46)$$

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 нужны, и даже вредны, из-за потерь энергии с отработавшим сушильным агентом. Поэтому процессы сушки протекают при низких скоростях потока воздуха. В таких условиях показатели степени n, g и q приближаются к 0. Таким образом структура критериального уравнения упрощается:

$$St_m = A \cdot \left(Pe_o\right)^m \cdot \left(Bu\right)^p \cdot \left(Ff\right)^k \qquad (3.47)$$

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 $\beta_э$ определяется инерцией потока (массоперенос в условиях свободного движения отсутствует). В этих условиях скорость движения ленты может быть принята в качестве фактора, определяющего значение коэффициента $\beta_э$.

Рассмотрим, как модернизировать уравнение (3.47) для задач сушки в неподвижном слое при электромагнитных источниках подвода энергии. В рамках такой задачи представлять в безразмерной форме интенсивность массоотдачи число Стантона не может. Необходимо использовать число Шервуда (таблица 3.12). Из (3.47) исключается число Пекле. Определяющую роль в сушке играет число энергетического действия. На первом этапе исследований обработку базы экспериментальных данных целесообразно проводить при отдельном учете влияния толщины обрабатываемого слоя, безразмерная форма которого $\left(H\right)$ может выглядеть отношением текущей толщины h к базовому значению (например, 1 м). Тогда:

$$Sh = A \cdot \left(Bu\right)^n \cdot \left(H\right)^m \cdot \left(Ff\right)^k \qquad (3.48)$$

Константы в (3.47) и (3.48) определяются при обработке массива соответствующих экспериментальных данных.

3.6. Задача сравнения эффективности различных видов сушки

Для сравнения эффективности двух видов сушки, о которых сказано выше, необходим универсальный показатель, который будет учитывать такие параметры процесса, как продолжительность τ_c; общие, а также удельные энергетические затраты Q_c, $Q_{c.уд}$. В качестве указанного показателя рекомендуется величина k_v – отношение скорости сушки v_c к тепловому потоку q_c. Для определения указанной величины воспользуемся результатами исследований процессов влаго- и теплообмена между поверхностью материала и окружающей средой. Характеристика протекания процесса сушки определяется механизмом перемещения влаги внутри материала, кинетикой испарения и перемещения влаги с поверхности материала в окружающую среду.

Общий поток влаги материала равен:

$$v_c \cdot \rho_0 \cdot \overline{V}U - a_m^t \cdot \rho_0 \cdot \overline{V}T = -a_m \cdot \rho_0 \left(\overline{V}U + \delta \cdot \overline{V}T \right) \qquad (3.49)$$

где a_m и a_m^t – соответственно коэффициенты диффузии и термодиффузии влажных тел;

ρ_0 – плотность сухого тела;

$\overline{V}U$ и $\overline{V}T$ – соответственно разности влагосодержания и температуры на поверхности и в глубине материала;

δ – относительный коэффициент термодиффузии $\left(\delta = a_m^t / a_m \right)$.

Для конвективной сушки при изотермических условиях, а также при малых перепадах температуры в пограничном слое (в период постоянной скорости сушки), для определения интенсивности сушки можно применить следующую формулу:

$$v_{c1} = \alpha_p \cdot (p_n - p_c) = Nu_m \frac{D_p}{l} \cdot (p_n - p_c) \quad (3.50)$$

где α_p – коэффициент влагообмена;

D_p – коэффициент диффузии пара в воздухе, отнесенный к разнице давлений;

p_n и p_c – значения парциального давления паров.

Для потока тепла:

$$q_{c1} = \alpha_q \cdot (t_c - t_n) = Nu_p \frac{\lambda_в}{l} \cdot (t_c - t_n) \quad (3.51)$$

где индекс «*n*» означает поверхность материала, а «с» – окружающую среду;

α_q – коэффициент теплообмена;

l – длина поверхности тела вдоль потока газа;

$\lambda_в$ – коэффициент теплопроводности влажного воздуха.

Тепло– и массообменные числа Нуссельта (коэффициенты тепломассоотдачи) определяются по уравнениям:

$$\mathrm{Nu}_p = \alpha_q \cdot l / \lambda_в = K_1 + 0{,}59 \cdot \mathrm{Re}^{0{,}5} \left(1 + 1{,}55 \cdot 10^{-4} \cdot \mathrm{Re}\right)^{0{,}25} \quad (3.52)$$

$$\mathrm{Nu}_m = \alpha_p \cdot l / D_p = K_1 + 0{,}55 \cdot \mathrm{Re}^{0{,}5} \left(1 + 1{,}43 \cdot 10^{-4} \cdot \mathrm{Re}\right)^{0{,}25} \quad (3.53)$$

где $\mathrm{Re} = V_m \cdot l / v$ – критерий Рейнольдса,

V_m – скорость теплоносителя;

v – кинематическая вязкость паровоздушной смеси в воздушном пограничном слое, м^2/с;

K_1 – коэффициент, зависящий от формы материала:

– для пластин, обтекаемых тепловым агентом $K_1 = 0$;

– для поверхности цилиндрической формы $K_1 = 0{,}3$;

– для поверхности шарообразной формы $K_1 = 2$.

Интенсивность сушки при использовании инфракрасных лучей может быть выражена формулой:

$$v_{c2} = r \cdot \alpha_p \cdot \left(p_n - p_c \right) = \frac{r \cdot D \cdot Nu_m}{l} \cdot \left(p_n - p_c \right) \tag{3.54}$$

где r – удельная теплота парообразования;

D – коэффициент диффузии пара в пограничном слое.

Тепловой поток для инфракрасной сушки описывается формулой:

$$q_{c2} + r \cdot \alpha_q \cdot \left(t_c - t_n \right) = \frac{r \cdot I \cdot Nu_p}{l} \cdot \left(t_c - t_n \right) \tag{3.55}$$

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-k_\lambda \cdot b_M \right) \tag{3.56}$$

где I – интенсивность лучистого потока;

I_0 – интенсивность лучистого потока, падающего на поверхность материала;

k_λ – коэффициент ослабления ИК луча;

b_M – толщина слоя материала.

Так как сушка происходит в два этапа, вначале под действием инфракрасных лучей, затем конвективным способом, общее количество теплоты за период сушки будет складываться из суммы этого показателя за первый и второй этапы (формулы 3.51 и 3.55):

$$q_{об} = Nu_p \frac{\lambda_в}{l} \cdot \left(t_c - t_n \right) + \frac{r \cdot I \cdot Nu_p}{l} \cdot \left(t_c - t_n \right) = \frac{Nu_p}{l} \cdot \left(t_c - t_n \right) \cdot \left(\lambda_в + r \cdot I \right) \tag{3.57}$$

В качестве указанного показателя рекомендуется величина k_v – отношение скорости сушки v_c к тепловому потоку q_c. Для определения указанной величины воспользуемся полученными ранее зависимостями. При конвективной сушке величину k_v определим делением формулы (3.50) на (3.51):

$$k_{v1} = \frac{v_{c1}}{q_{c1}} = \frac{Nu_m \frac{D_p}{l} \cdot \left(p_n - p_c \right)}{Nu_p \frac{\lambda_в}{l} \cdot \left(t_c - t_n \right)} = \frac{Nu_m \cdot D_p \cdot \left(p_n - p_c \right)}{Nu_p \cdot \lambda_в \cdot \left(t_c - t_n \right)} \tag{3.58}$$

В случае инфракрасной сушки величину k_v определим делением формулы (3.54) на (3.55):

$$k_{v2} = \frac{v_{c2}}{q_{c2}} = \frac{\frac{r \cdot D \cdot Nu_m}{l} \cdot (p_n - p_c)}{\frac{r \cdot I \cdot Nu_p}{l} \cdot (t_c - t_n)} = \frac{D \cdot Nu_m \cdot (p_n - p_c)}{I \cdot Nu_p \cdot (t_c - t_n)} \quad (3.59)$$

3.7. Задачи экспериментального моделирования

1. Разработать и изготовить экспериментальную установку для исследования процесса выпаривания растворов в диапазоне давлений в аппарате (10–150) кПа. Провести тарировочные исследования стенда.

2. Выполнить комплексное экспериментальное моделирование процесса выпаривания в микроволновом поле в широком диапазоне давлений, температур, концентраций и параметров электромагнитного поля. Установить влияния определяющих параметров на интенсивность выпаривания различных пищевых систем и модельных растворов.

3. Провести обработку полученной базы экспериментальных данных. Установить константы уравнения в обобщенных переменных (3.24). Дать анализ адекватности полученной модели.

4. Разработать и изготовить экспериментальную установку для исследования процесса сушки сырья в неподвижном слое при подводе ИК энергии. Провести тарировочные исследования стенда.

5. Выполнить комплексное экспериментальное моделирование процесса сушки в ИК поле в неподвижном слое, в широком диапазоне температур, влагосодержаний, размеров сырья и параметров ИК поля. Установить влияние определяющих параметров на скорость сушки и энергетические характеристики для различного пищевого сырья.

6. Провести обработку полученной базы экспериментальных данных. Установить константы уравнения в обобщенных переменных (3.48). Дать анализ адекватности полученной модели.

7. Разработать и изготовить экспериментальную установку для исследования процесса сушки сырья в неподвижном слое при СВЧ подводе энергии. Провести тарировочные исследования стенда.

8. Выполнить комплексное экспериментальное моделирование процесса сушки в СВЧ поле в неподвижном слое, в широком диапазоне температур, влагосодержаний, размеров сырья и параметров микроволнового поля. Установить влияния определяющих параметров на скорость сушки и энергетические характеристики для различного пищевого сырья.

9. Провести обработку полученной базы экспериментальных данных. Установить константы уравнения в обобщенных переменных (3.48). Дать анализ адекватности полученной модели.

10. Разработать и изготовить экспериментальную установку для исследования процесса сушки сырья в слое на ленте транспортера при комбинированном подводе энергии от СВЧ и ИК генераторов энергии. Провести тарировочные исследования стенда.

11. Провести комплексные экспериментальные исследования ленточной сушилки и установить влияние скорости движения ленты, вида и размеров сырья, его влагосодержания, температуры и параметров электромагнитных генераторов энергии на интенсивность сушки.

12. Провести обработку полученной базы экспериментальных данных по сушке. Установить константы уравнения в обобщенных переменных (3.47). При необходимости сделать коррекцию модели.

ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 3

1. Приведен сравнительный анализ классических технологий обезвоживания и выделены основные проблемы, решение которых легло в основу сформулированной гипотезы о возможности перехода от ГУ III рода к ГУ II рода.

2. Методами теории подобия получены модели, позволяющие проектировать и оптимизировать установки для получения высококачественных концентратов пищевых растворов и установки для сушки продуктов при микроволновом и инфракрасном подводе энергии.

3. Для сравнительной оценки способов сушки в частном случае, предложен универсальный показатель k_v – отношение скорости сушки v_c к тепловому потоку q_c.

4. Поставлены задачи экспериментального моделирования.

РАЗДЕЛ 4.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ В ЭМП С ПРИМЕНЕНИЕМ ИННОВАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

4.1. Сушка растительного сырья в неподвижном слое в ИК поле

В соответствии с таблицей 2.5 выполнены комплексные исследования сушки овощей и фруктов. Все опыты проведены на оригинальном, компьютеризированном стенде, описанном в разделе 2 (рисунок 2.3).

4.1.1. Кинетика сушки овощей и фруктов

Изменение массы продукта во время процесса сушки соответствует изменению его влажности. Разница между начальной и конечной массой продукта, изменяющаяся во времени, по уравнению материального баланса позволяет рассчитать текущую влажность продукта. Изменение влажности отображается линией сушки и характеризует кинетику процесса.

Основным кинетическим показателем эффективности процесса сушки является линия скорости сушки, которая отображает массу удаленной влаги или же процент удаленной влаги в зависимости от данного отрезка времени.

Влияние подводимой мощности на кинетику сушки моркови в форме слайсов.

Исследования влияния подводимой мощности ИК излучения на кинетику сушки моркови проводились в диапазоне 1,9–11,3 кВт/м^2. Морковь нарезалась слайсами толщиной в 0,003 м, и радиусом 0,025 м. Масса загрузки кассеты с продуктом составляла 50 г.

Основной ряд экспериментов проводился при удельной мощности ИК излучения в 6 кВт/м^2 (0). Эта удельная мощность принята за базовую. Это стало основой корректного сравнения результатов всех экспериментов.

В результате эксперимента получена зависимость изменения массы продукта во времени (0). Определено, что при мощности в 6 кВт/м^2, высушивание до массы в 14 г (масса сухих веществ составляла 8,5 г), время процесса сушки составила 2250 с. При уменьшении мощности ИК излучения в 0,63 и 0,31 раза, время процесса увеличилось в 1,47 и 2 раза соответственно. При увеличении подводимой мощности ИК излучения в 1,46 и 1,88 раза, время процесса уменьшилось в 1,33 и 2 раза.

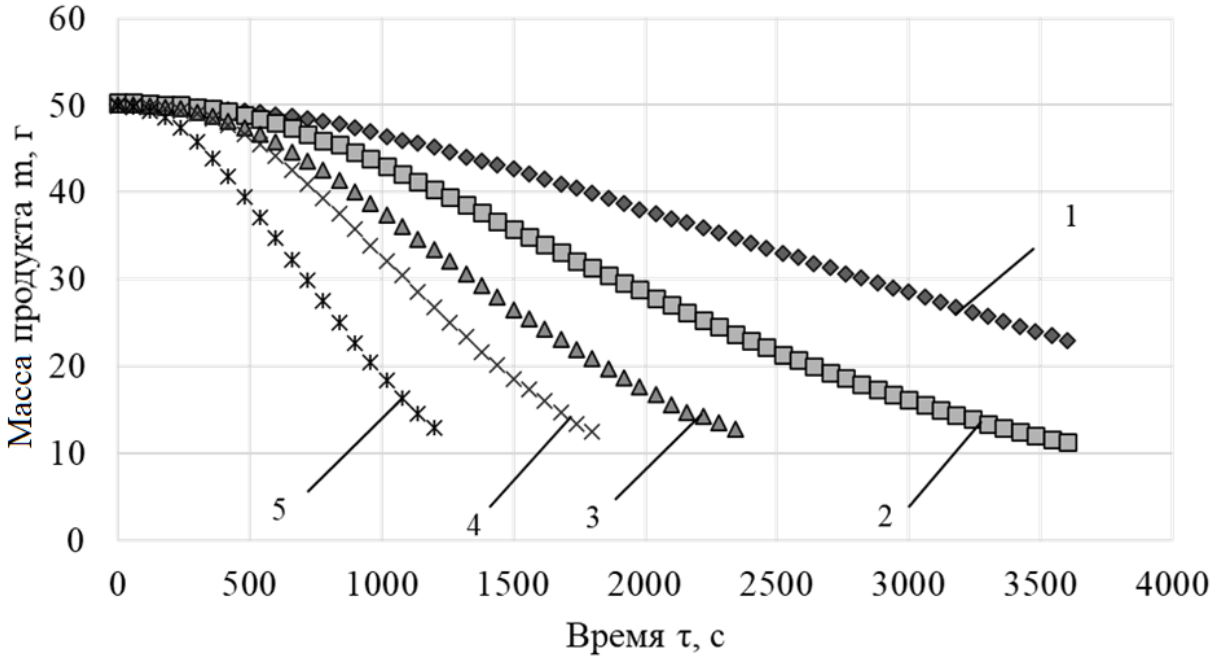


Рисунок 4.1. Влияние подводимой мощности ИК излучения на кинетику процесса сушки слайсов моркови, где 1 – N = 1,9 кВт/м^2;2 – N = 3,75 кВт/м^2; 3 – N = 6 кВт/м^2; 4 – N = 8,75 кВт/м^2; 5 – N = 11,3 кВт/м^2

На основе материальных балансов рассчитано изменение влажности продукта в ходе процесса. Изменение влажности продукта (рисунок 4.2), в зависимости от подводимой мощности ИК излучения, до необходимой влажности в 11–15 % занимает 1150–4400 с.

Оценки энергетических затрат на процесс сушки до необходимой влажности 11–15 % (рисунок 4.3) показали, что при мощности в 1,9 кВт/м^2 было затрачено 350 кДж энергии при длительности процесса в 4400 с, а при мощности в 11,3 кВт/м^2 – 510 кДж при длительности процесса в 1150 с.

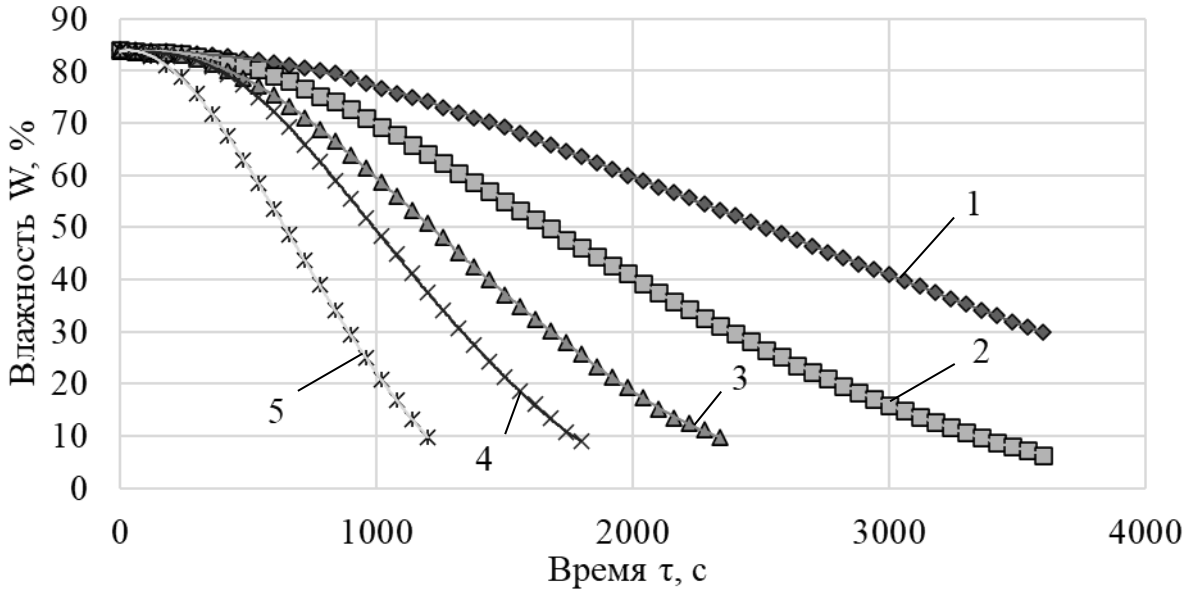


Рисунок 4.2. Влияние мощности на изменение влажности слайсов моркови, где 1 – N = 1,9 кВт/м^2; 2 – N = 3,75 кВт/м^2; 3 – N = 6 кВт/м^2; 4 – N = 8,75 кВт/м^2; 5 – N = 11,3 кВт/м^2

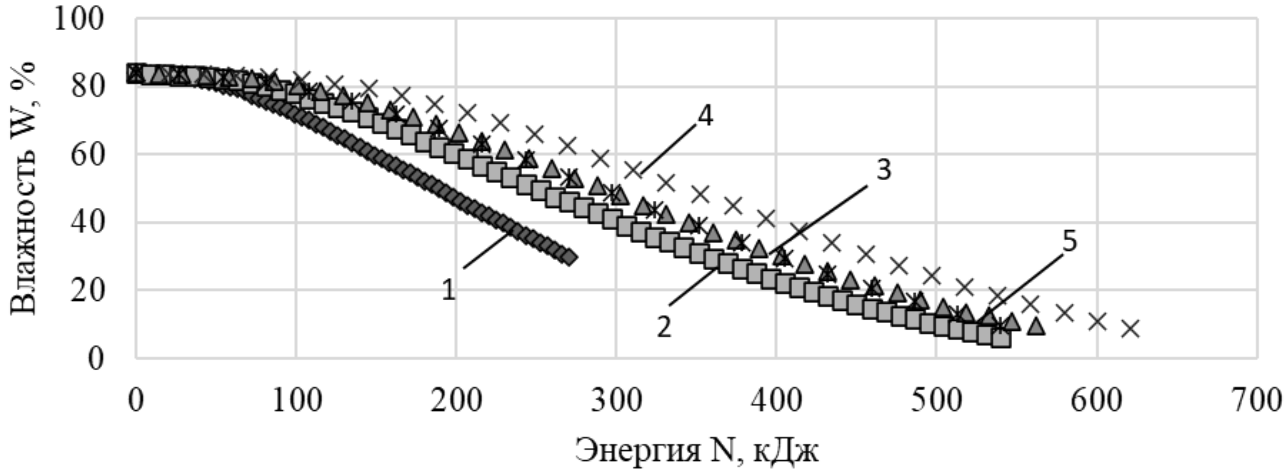


Рисунок 4.3. Влияние мощности ИК излучения на энергетические затраты процесса сушки слайсов моркови, где 1 – N = 1,9 кВт/м^2; 2 – N = 3,75 кВт/м^2; 3 – N = 6 кВт/м^2; 4 – N = 8,75 кВт/м^2; 5 – N = 11,3 кВт/м^2

Итоговой характеристикой результатов экспериментов являются линии скорости сушки (рисунок 4.4). В зависимости от изменения подводимой мощности ИК излучателей скорость сушки изменялась в диапазоне 0,52–2,22 г/мин удаленной влаги. Постоянная скорость сушки протекает в среднем до влажности 16–20 %, после чего наблюдается выход остаточной влаги из глубины продукта.

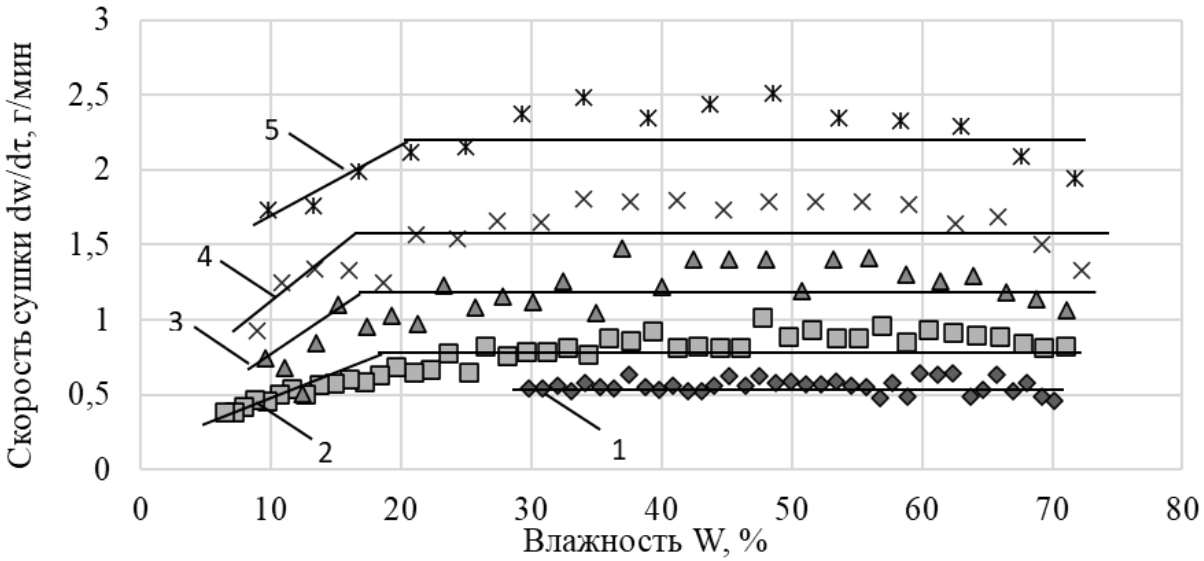


Рисунок 4.4. Влияние мощности излучения на скорость сушки слайсов моркови, где 1 – N = 1,9 кВт/м^2; 2 – N = 3,75 кВт/м^2; 3 – N = 6 кВт/м^2; 4 – N = 8,75 кВт/м^2; 5 – N = 11,3 кВт/м^2

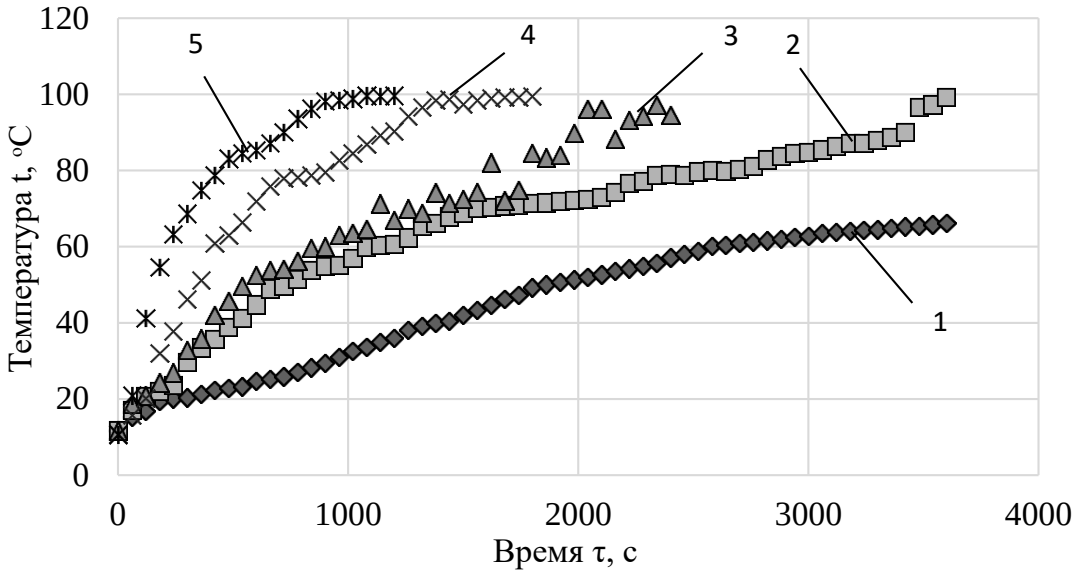


Рисунок 4.5. Влияние мощности на термограммы слайсов моркови, где 1 – N = 1,9 кВт/м^2; 2 – N = 3,75 кВт/м^2; 3 – N = 6 кВт/м^2; 4 – N = 8,75 кВт/м^2; 5 – N = 11,3 кВт/м^2

Температуры продукта (рисунок 4.5) не превышали 100 °С. При мощности в 1,9 кВт/м^2 температура не превышала 63 °С даже при длительной обработке сырья. Кратковременная обработка сырья при указанных температурах не повлияет на качество готового продукта и позволит сохранить пищевую ценность сырья. Но этот факт следует проверить на основе дегустационных исследований готовых высушенных образцов моркови.

Комплексные экспериментальные исследования определили влияние мощности излучения на процесс сушки моркови в форме слайсов. На следующем этапе необходимо проверить влияние этого фактора на другом виде продукта. Дальнейшие эксперименты проведены на яблоках.

Влияние подводимой мощности на кинетику сушки яблок в форме слайсов.

Исследования влияния подводимой мощности ИК излучения на кинетику сушки яблок проводились в диапазоне 1,9–11,3 кВт/м^2. Яблоко нарезалось слайсами толщиной в 0,003 м, и радиусом 0,025 м. Масса загрузки кассеты с продуктом составляла 50 г.

Подводимая мощность ИК излучения существенно влияет на изменение массы продукта во времени (рисунок 4.6). При мощности в 6 кВт/м^2, высушивание до массы в 14 г (масса сухих веществ составляла 8,5 г), время процесса сушки составила 2150 с. При уменьшении мощности ИК излучения в 0,63 и 0,31 раза, время процесса увеличилось в 1,28 и 2 раза соответственно. При увеличении подводимой мощности ИК излучения в 1,46 и 1,88 раза, время процесса уменьшилось в 1,33 и 1,82 раза соответственно.

Анализ влияния подводимой мощности на изменение влажности продукта (рисунок 4.7), показал, что время, затраченное на сушку до необходимой влажности в 11–15 %, составляет 1100–4600 с.

Анализ энергетических затрат на процесс сушки до необходимой влажности 11–15 % (рисунок 4.8) показал, что при мощности в 1,9 кВт/м^2 было затрачено 325 кДж энергии при длительности процесса в 4600 с, а при мощности в 11,3 кВт/м^2 – 490 кДж при длительности процесса в 1100 с.

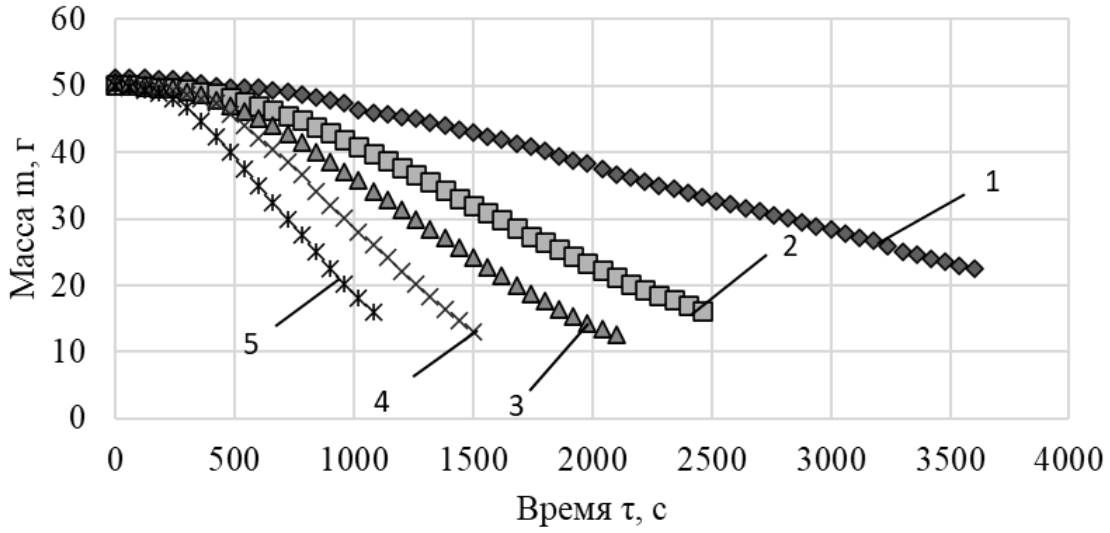


Рисунок 4.6. Влияние подводимой мощности ИК излучения на кинетику процесса сушки слайсов яблок, где N: 1 = 1,9 кВт/м^2; 2 – N = 3,75 кВт/м^2; 3 – N = 6 кВт/м^2; 4 – N = 8,75 кВт/м^2; 5 – N = 11,3 кВт/м^2.

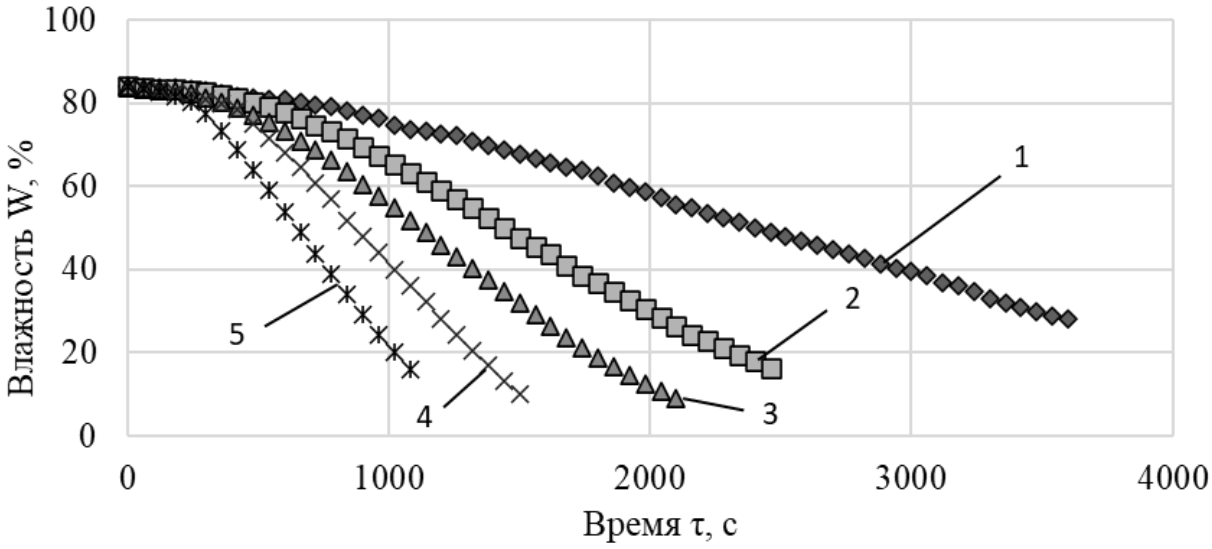


Рисунок 4.7. Влияние подводимой мощности на изменение влажности слайсов яблок, где 1 – N = 1,9 кВт/м^2; 2 – N = 3,75 кВт/м^2; 3 – N = 6 кВт/м^2; 4 – N = 8,75 кВт/м^2; 5 – N = 11,3 кВт/м^2

Изменение мощности ИК излучателей (рисунок 4.9) влияет на скорость сушки в диапазоне 0,54–2,42 г/мин удаленной влаги. Постоянная скорость сушки протекает в среднем до влажности 18–22 %.

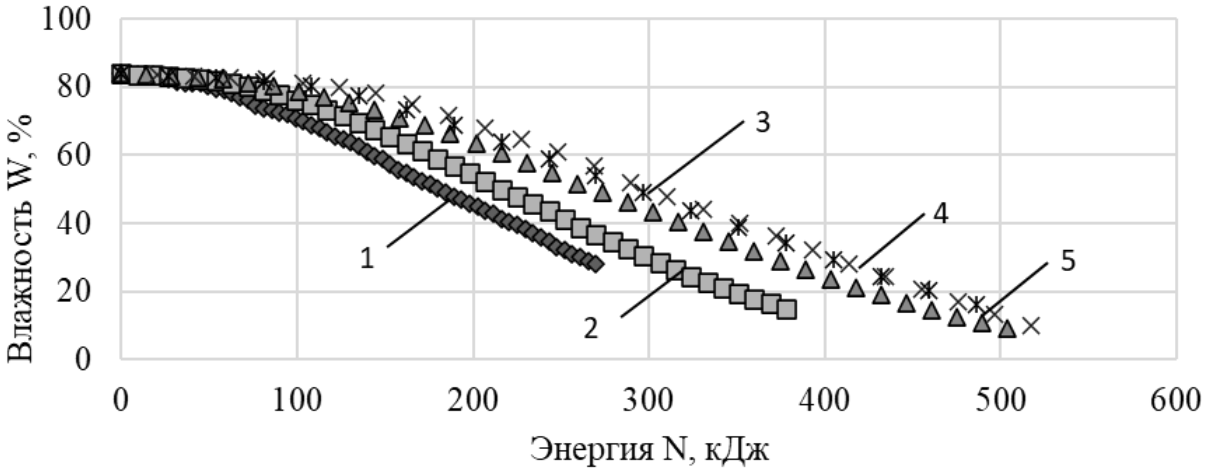


Рисунок 4.8. Влияние мощности ИК излучения на энергетические затраты процесса сушки слайсов яблок, где 1 – N = 1,9 кВт/м^2; 2 – N = 3,75 кВт/м^2; 3 – N = 6 кВт/м^2; 4 – N = 8,75 кВт/м^2; 5 – N = 11,3 кВт/м^2

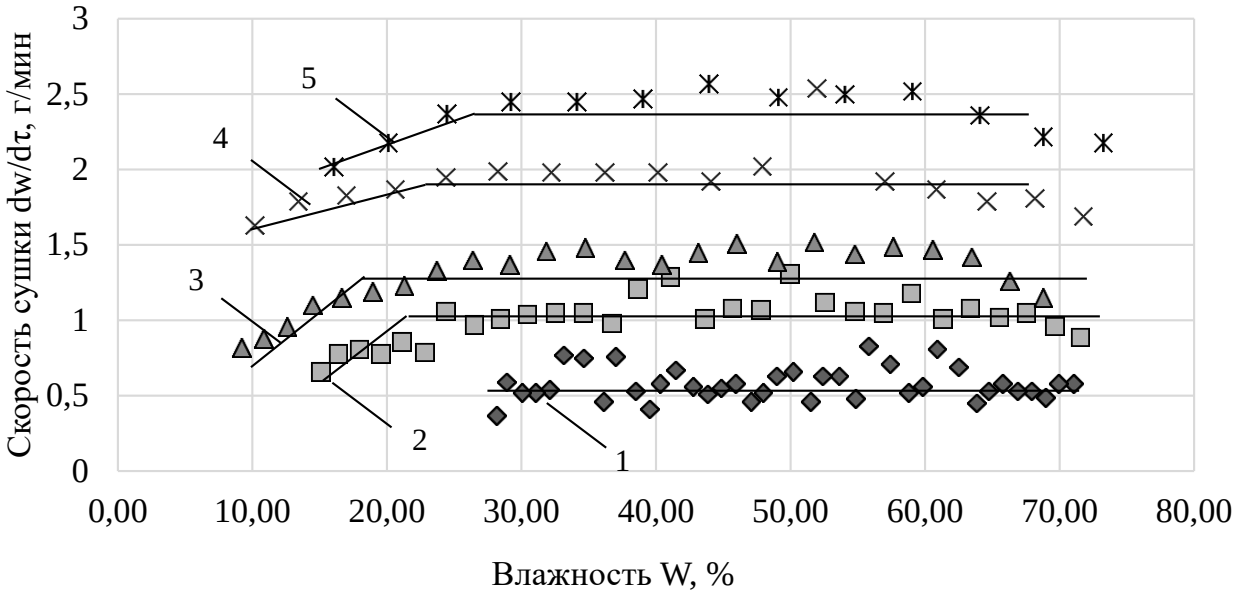


Рисунок 4.9. Влияние подводимой мощности на скорость сушки слайсов яблок, где 1 – N = 1,9 кВт/м^2; 2 – N = 3,75 кВт/м^2; 3 – N = 6 кВт/м^2; 4 – N = 8,75 кВт/м^2; 5 – N = 11,3 кВт/м^2

При мощности в 1,9 кВт/м^2 температура яблок (рисунок 4.10) не превышала 58 °С даже при длительной обработке сырья. При мощности в 3,75–11,3 кВт/м^2 температура яблок достигала 100 °С. Период сушки при таких температурах составил в среднем 5–10 минут.

Следующим фактором, определяющем кинетику сушки слайсов овощей и фруктов, является толщина слоя. Поскольку глубина проникновения ИК излучения не превышает 3 мм, эксперименты проводились с толщиной слоя, выше этого значения.

Влияние толщины слоя на кинетику сушки моркови в форме слайсов.

В опытах толщина слоя слайсов моркови составляла 3, 5, 7 и 10 мм, при радиусе 0,02 м. Мощность ИК излучения составила – 6 кВт/м^2, масса загрузки кассеты с продуктом – 50 г.

В результате экспериментов установлена зависимость изменения массы продукта во времени (рисунок 4.11). С увеличением толщины слоя ограниченная проникающая способность ИК излучения приводит к замедлению процесса сушки. Время процесса увеличивается по мере увеличения толщины слоя. До необходимой влажности морковь высушивается в течении 2100 с, при увеличении толщины слоя в 1,7 раза время процесса увеличивается в 1,5 раза, при увеличении в 2,3 раза время процесса увеличивается в 2 раза и при увеличении толщины слоя в 3,3 раза время увеличивается в 2,4 раза.

В результате экспериментов установлена зависимость изменения массы продукта во времени (рисунок 4.11). С увеличением толщины слоя ограниченная проникающая способность ИК излучения приводит к замедлению процесса сушки. Время процесса увеличивается по мере увеличения толщины слоя. До необходимой влажности морковь высушивается в течении 2100 с, при увеличении толщины слоя в 1,7 раза время процесса увеличивается в 1,5 раза, при увеличении в 2,3 раза время процесса увеличивается в 2 раза и при увеличении толщины слоя в 3,3 раза время увеличивается в 2,4 раза.

Изменение влажности продукта (рисунок 4.12), в зависимости от толщины слоя с 84 % до 15 % занимает 2100–5000 с. После увеличения слоя моркови в 1,7 раза наблюдается значительное ухудшение процесса сушки.

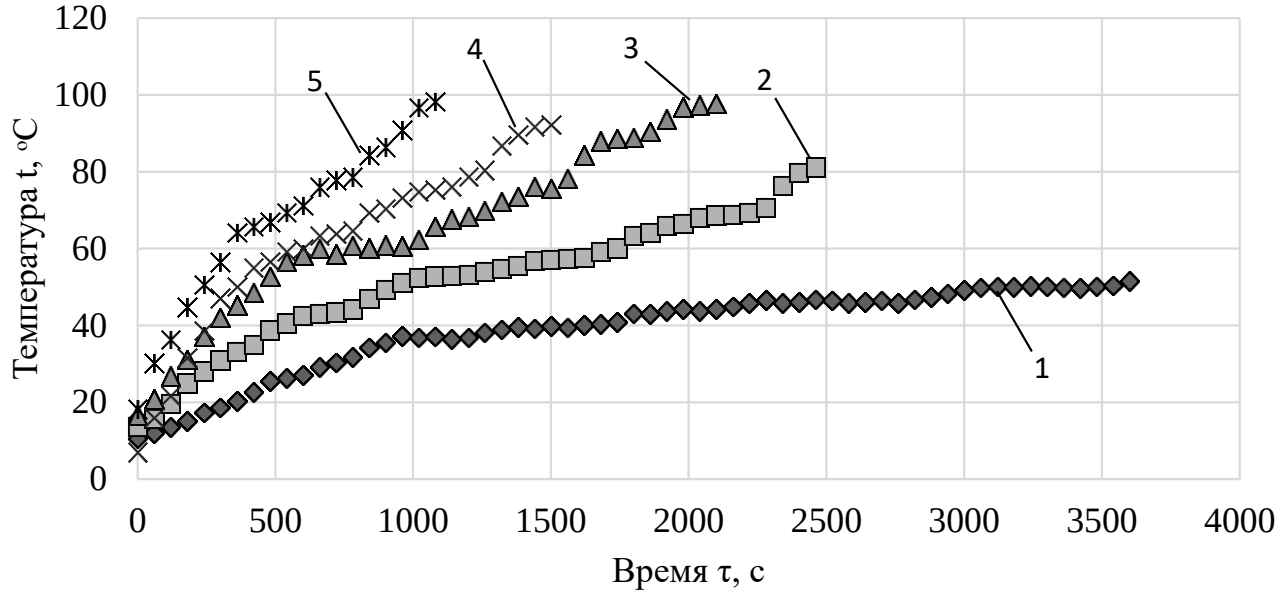


Рисунок 4.10. Влияние мощности ИК излучения на термограммы слайсов яблок, где 1 – N = 1,9 кВт/м^2; 2 – N = 3,75 кВт/м^2; 3 – N = 6 кВт/м^2; 4 – N = 8,75 кВт/м^2; 5 – N = 11,3 кВт/м^2

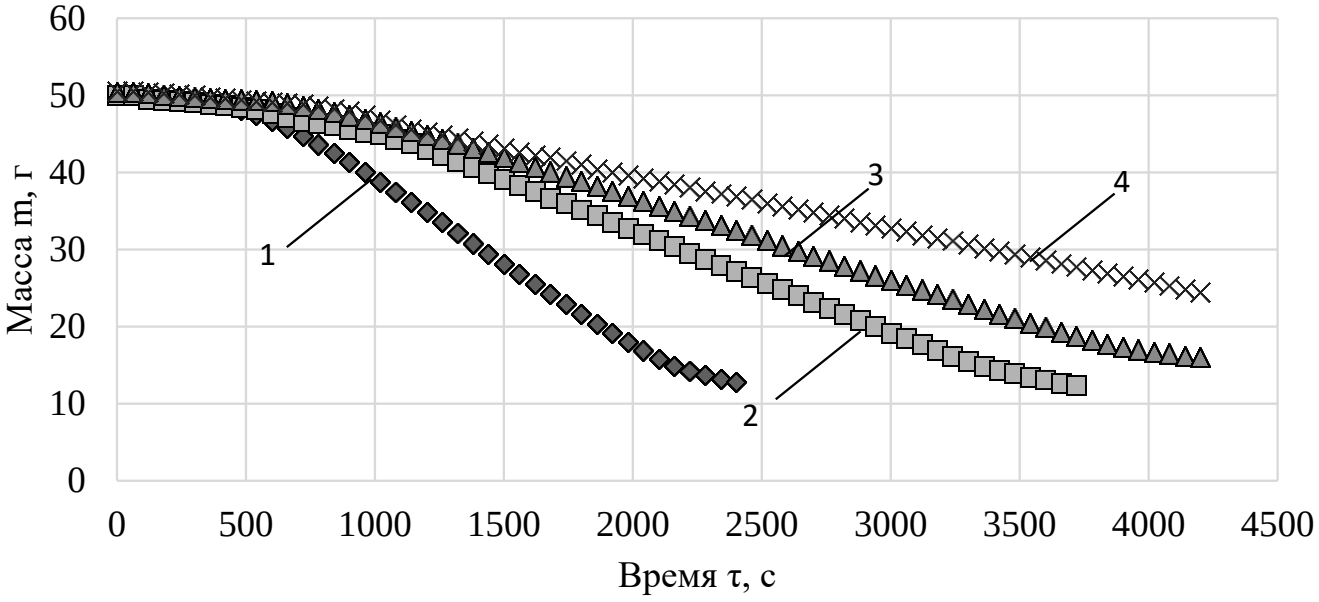


Рисунок 4.11. Влияние толщины слоя на кинетику сушки слайсов моркови, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 7 мм; 4 – h = 10 мм

Оценки энергетических затрат на процесс сушки до необходимой влажности 11–15 % (рисунок 4.13) показали, что при толщине слоя в 3 мм было затрачено 480 кДж энергии при длительности процесса в 2100 с, при толщине слоя

в 10 мм – показатели энергетических затрат увеличились в 2,6 раза при длительности процесса в 5000 с.

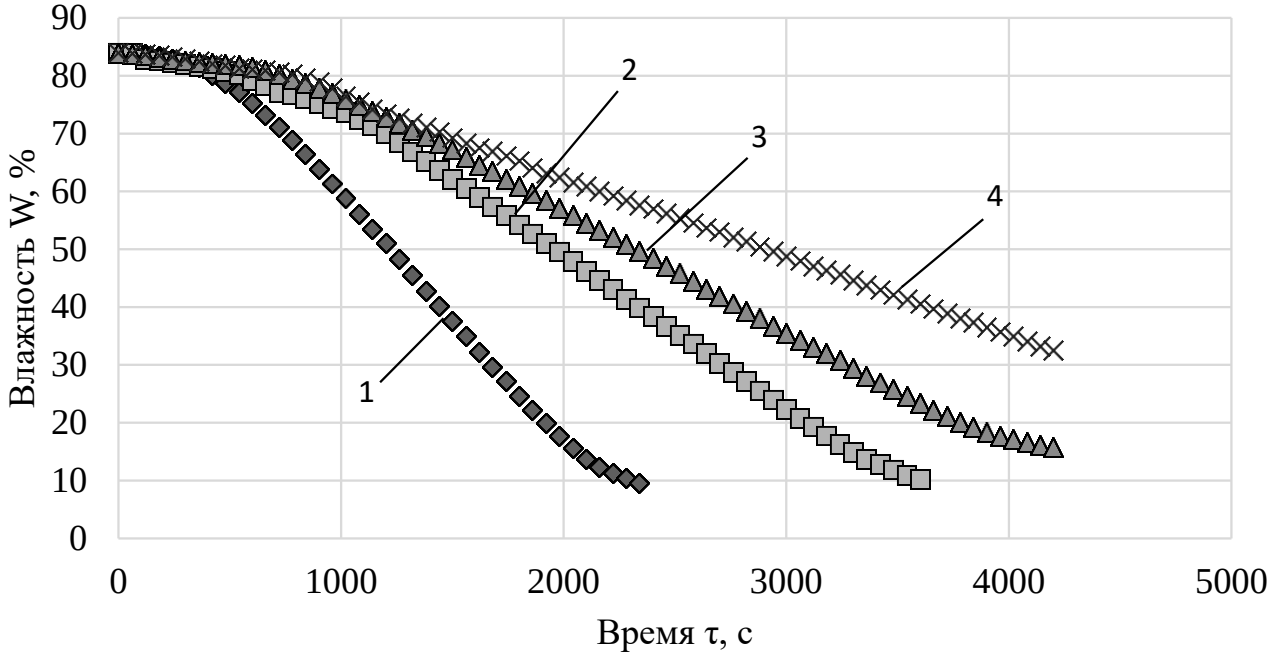


Рисунок 4.12. Влияние толщины слоя на влажность слайсов моркови, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 7 мм; 4 – h = 10 мм

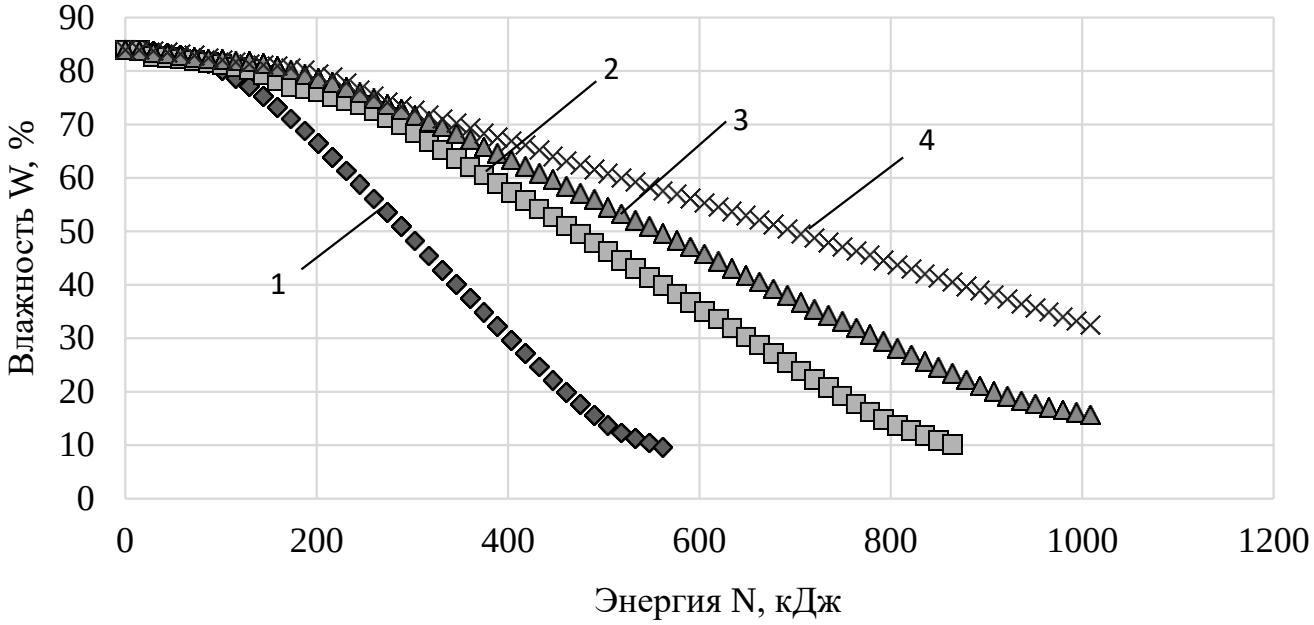


Рисунок 4.13. Влияние толщины слоя на энергетические затраты процесса сушки слайсов моркови, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 7 мм; 4 – h = 10 мм

Параметры скорости сушки (рисунок 4.14) в зависимости от толщины слоя слайсов моркови, изменялись в диапазоне 0,39–1,19 г/мин удаленной влаги. Постоянная скорость сушки сохраняется в среднем до влажности 18–23 %.

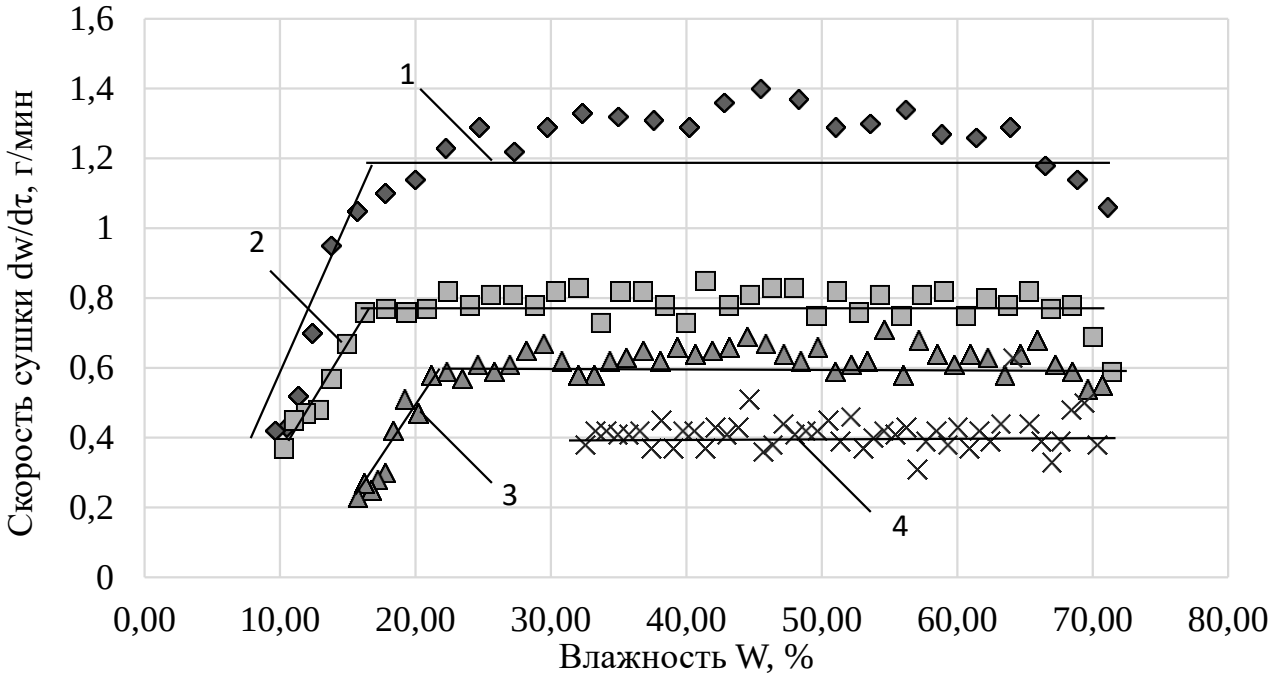


Рисунок 4.14. Влияние толщины слоя на скорость сушки слайсов моркови, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 7 мм; 4 – h = 10 мм

С увеличением толщины слоя температура сушки (рисунок 4.15) продукта падает, поскольку ИК излучение воздействует на поверхностные 3 мм продукта. Теплота от поверхности продукта переходит в нижние слои, тем самым уменьшая температуру продукта на поверхности.

Серия проведенных опытов на моркови позволяют сделать вывод, что сушить слайсы целесообразно при толщине слоя не более 3–5 мм. Проверить влияние толщины слоя на сушку яблок было следующей задачей экспериментальных исследований.

Влияние толщины слоя на кинетику сушки яблок в форме слайсов.

Слайсы яблок нарезались толщиной – 3, 5, 7 и 10 мм, и радиусом 0,025 м. Мощность ИК излучения составила – 6 кВт/м^2, масса загрузки кассеты с продуктом составляла 50 г.

В результате экспериментов установлена зависимость изменения массы продукта во времени (рисунок 4.16). Время процесса увеличивается по мере увеличения толщины слоя. До необходимой влажности яблоко высушивается в течении 2000 с, при увеличении толщины слоя в 1,7 раза время процесса увеличивается в 1,25 раза, при увеличении в 2,3 раза время процесса увеличивается в 1,65 раза и при увеличении толщины слоя в 3,3 раза время увеличивается в 2,35 раза.

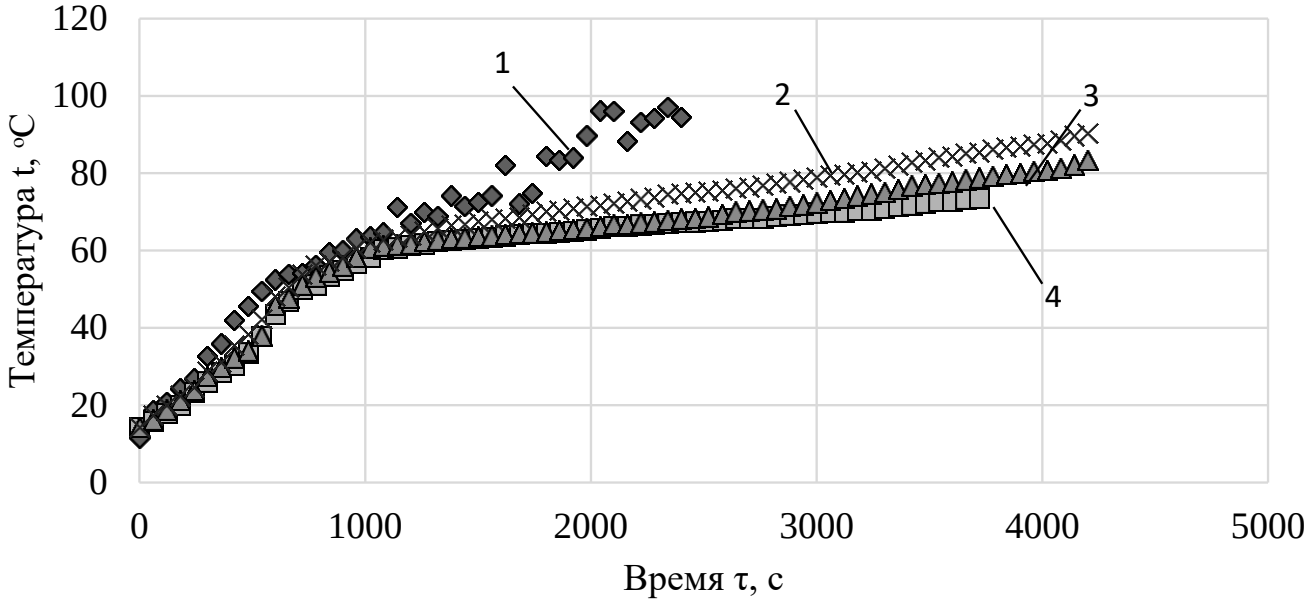


Рисунок 4.15. Влияние толщины слоя на термограммы слайсов моркови, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 7 мм; 4 – h = 10 мм

Изменение влажности продукта (рисунок 4.17), в зависимости от толщины слоя с 84 % до 15 % занимает 2000–4700 с. После увеличения слоя яблок выше 5мм наблюдается значительное ухудшение процесса сушки.

Энергетические затраты на процесс сушки до необходимой влажности 11–15 % (рисунок 4.18) составили при толщине слоя в 3 мм 420 кДж при длительности процесса в 2000 с. При толщине слоя в 10 мм затраты энергии увеличились в 3,5 раза при длительности процесса в 4700 с.

Скорости сушки (рисунок 4.19) в зависимости от толщины слоя яблок, изменялись в диапазоне 0,44–1,27 г удаленной влаги в минуту. Постоянная скорость сушки сохраняется в среднем до влажности 15–19 %.

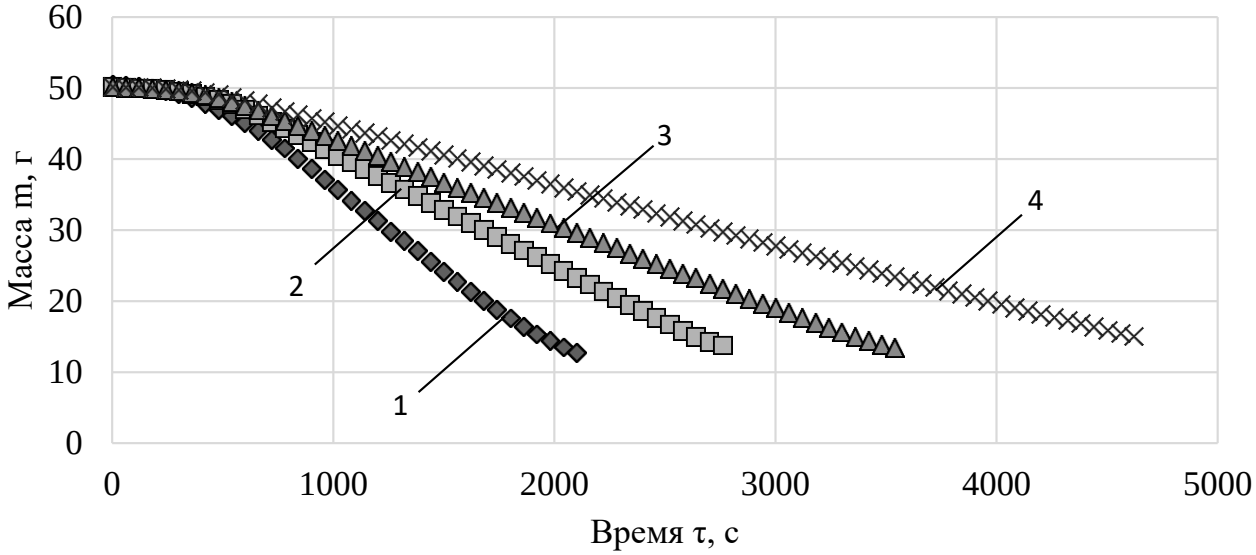


Рисунок 4.16. Влияние толщины слоя на кинетику сушки слайсов яблок, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 7 мм; 4 – h = 10 мм

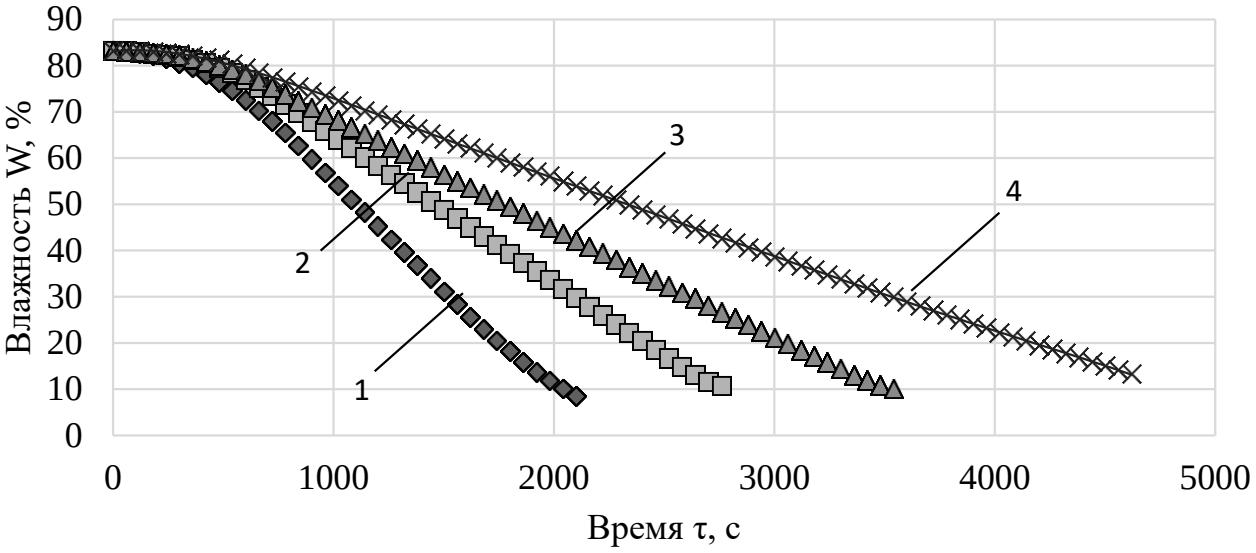


Рисунок 4.17. Влияние толщины слоя на кинетику сушки слайсов яблок, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 7 мм; 4 – h = 10 мм

Установлена зависимость толщины слоя на температуру продукта (рисунок 4.20). Температура экспоненциально растет, но повышается при увеличении толщины слоя продукта, но не превышает 100 °С.

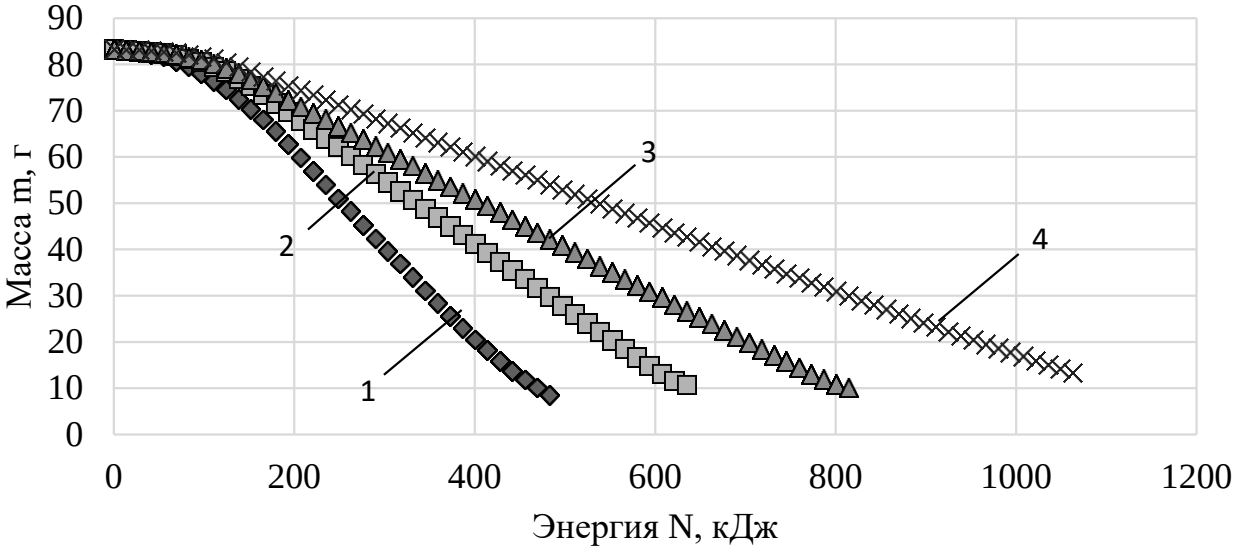


Рисунок 4.18. Влияние толщины слоя на энергетические затраты процесса сушки слайсов яблок, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 7 мм; 4 – h = 10 мм

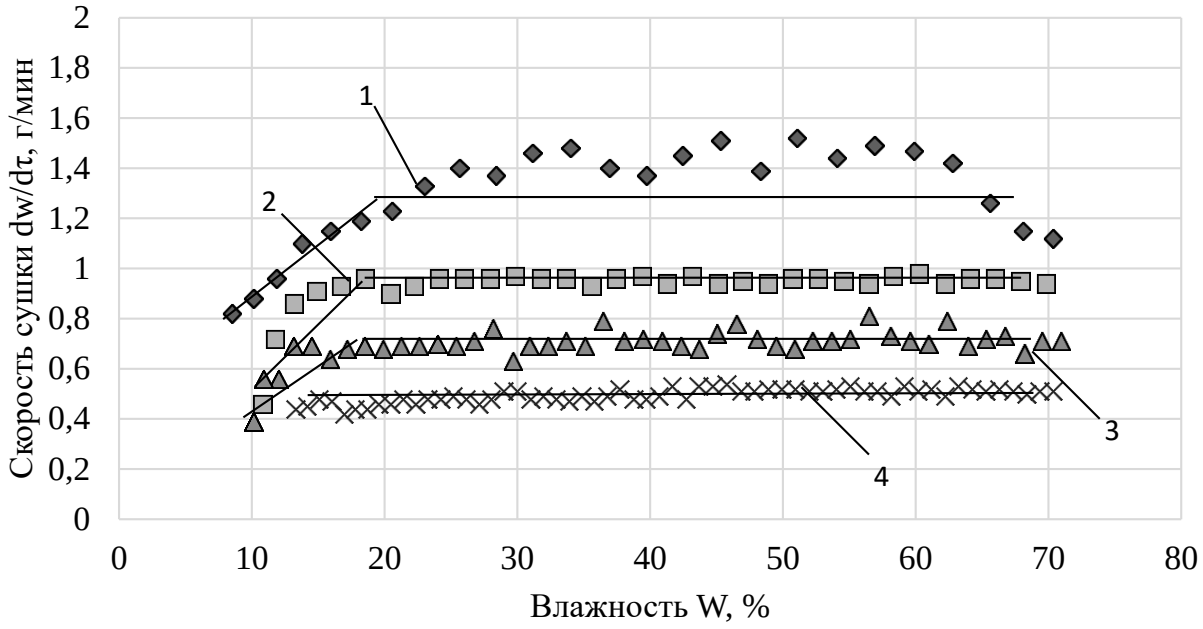


Рисунок 4.19. Влияние толщины слоя на скорость сушки слайсов яблок, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 7 мм; 4 – h = 10 мм

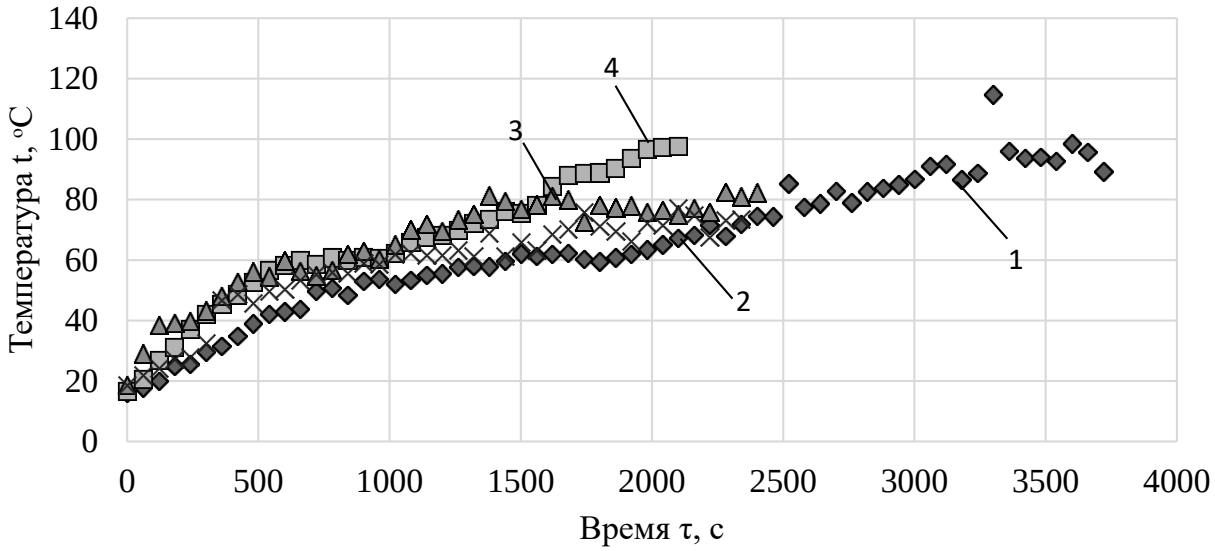


Рисунок 4.20. Влияние толщины слоя на термограммы слайсов яблок, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 7 мм; 4 – h = 10 мм

Дальнейшие исследования на остальных видах продуктов (таблица 3.1) проводились при толщине слоя (H = 3 мм) и значении базовой мощности излучения (N = 6 кВт/м^2).

Влияние вида продукта в форме слайсов на кинетику сушки.

Все продукты нарезались слайсами толщиной в 0,003 м, и радиусом 0,025 м. Масса загрузки кассеты с продуктом составляла 50 г. Мощность подводимой энергии – 6 кВт/м^2.

Первичные данные, полученные в ходе экспериментальных исследований, в неподвижном слое отражают изменение массы во времени. Ряд экспериментов основан на сушке шести видов продуктов с различными особенностями, структурой и свойствами (рисунок 4.21).

При мощности в 6 кВт/м^2, высушивание до массы в 14 г (масса сухих веществ составляла 8,5 г), время процессов сушки составляло 2000–3000 с. Время высушивания свеклы и лука наиболее длительны, остальные же продукты имеют примерно одну скорость сушки.

Изменение влажности продукта (рисунок 4.22), в зависимости от вида продукта до необходимой влажности в 11–15 % составляет 2000–3000 с.

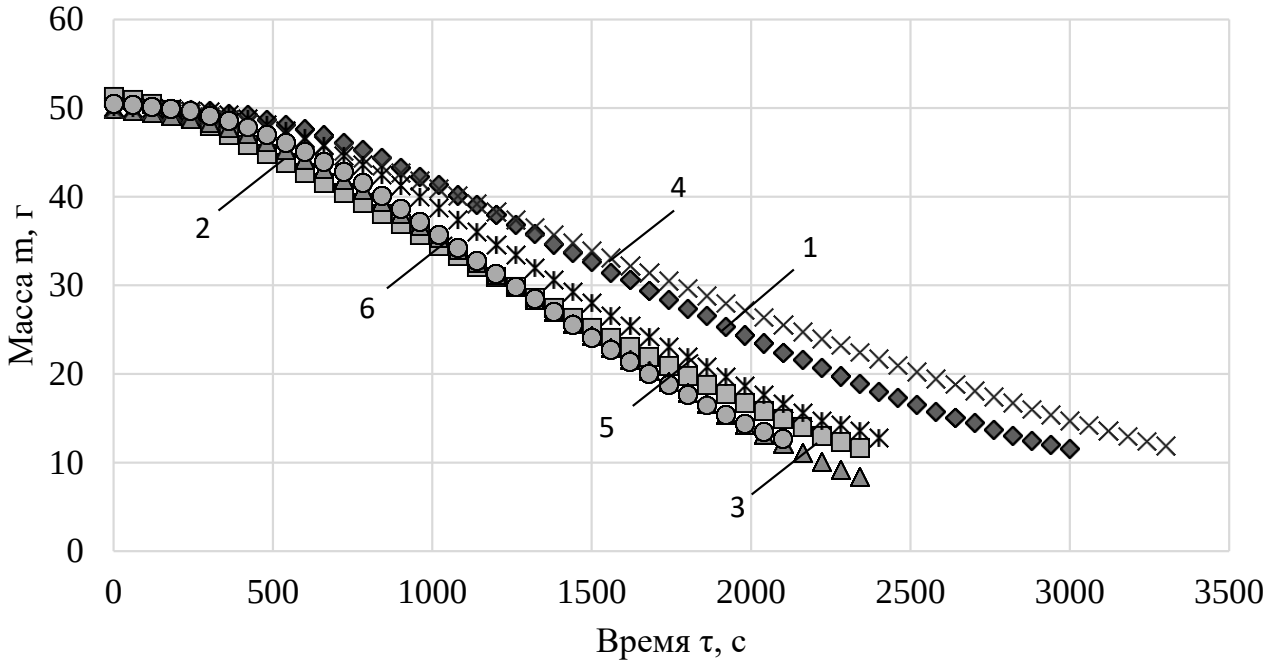


Рисунок 4.21. Кинетика сушки слайсов различных овощей и фруктов, где 1 – свекла; 2 – картофель; 3 – тыква; 4 – лук; 5 – морковь, 6 – яблоко

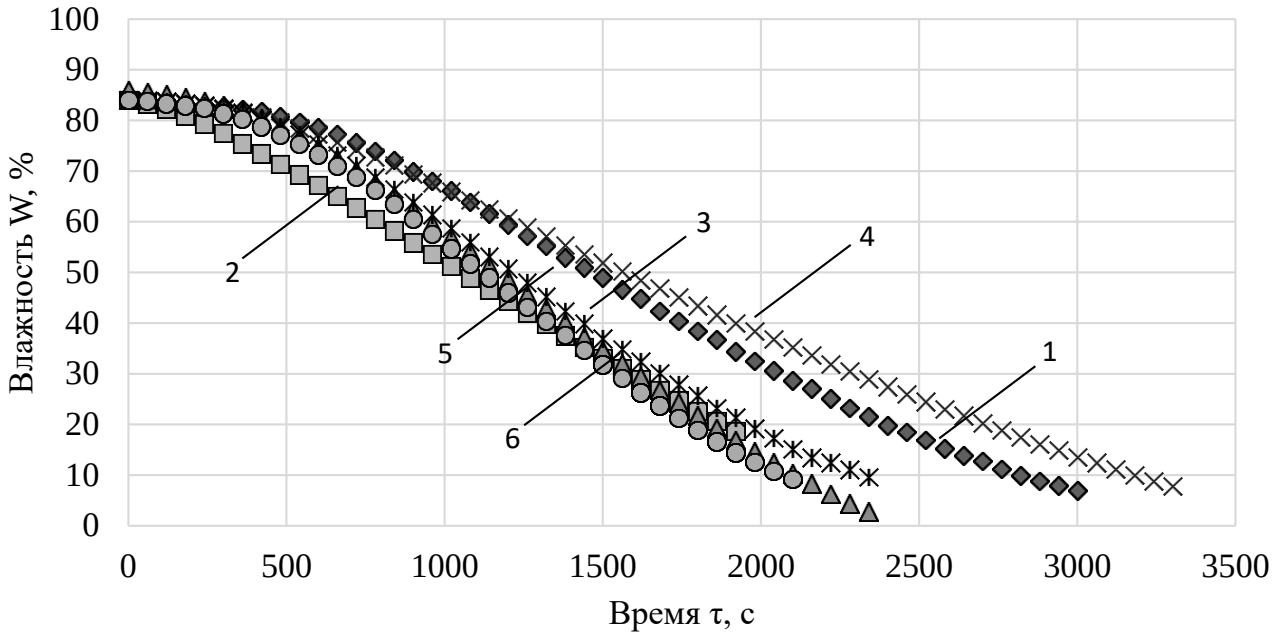


Рисунок 4.22. Изменение влажности слайсов овощей и фруктов во времени, где 1 – свекла; 2 – картофель; 3 – тыква; 4 – лук; 5 – морковь, 6 – яблоко

Энергетические затраты на процесс сушки до необходимой влажности 11–15 % (рисунок 4.23) составили 480–710 кДж.

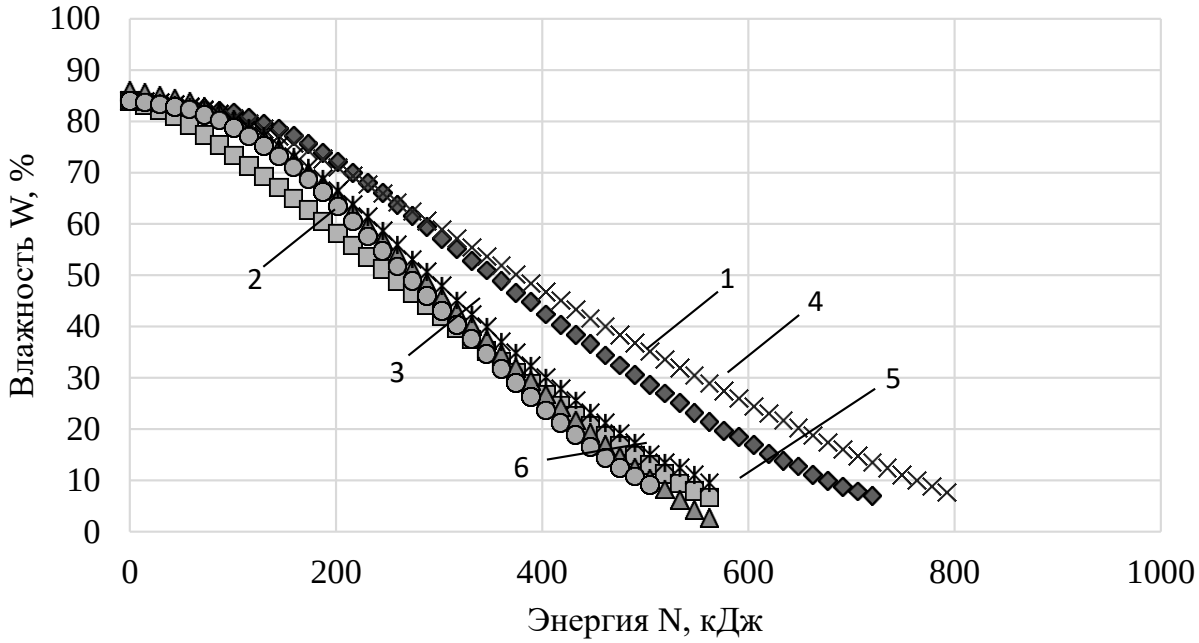


Рисунок 4.23. Энергетические затраты на процесс сушки слайсов овощей и фруктов, где 1 – свекла; 2 – картофель; 3 – тыква; 4 – лук; 5 – морковь, 6 – яблоко

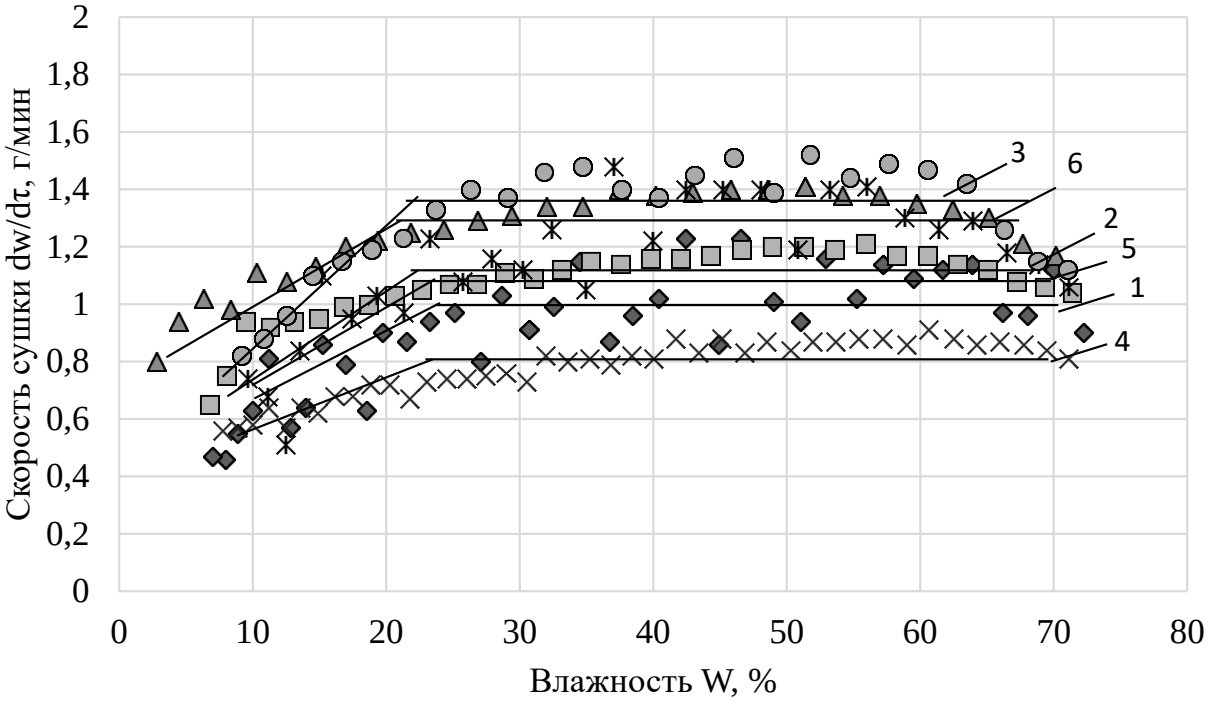


Рисунок 4.24. Линия скорости сушки слайсов овощей и фруктов, где 1 – свекла; 2 – картофель; 3 – тыква; 4 – лук; 5 – морковь, 6 – яблоко

Для каждого продукта линия скорости сушки (рисунок 4.24) имеет постоянную скорость сушки до влажности в 20–23 %, после чего скорость сушки замедляется.

Температуры (рисунок 4.25) различных видов овощей и фруктов имеют практически одинаковый характер роста.

Приведенные исследования определили влияния значимых факторов (мощности и толщины слоя) на процесс сушки продукта. На следующем этапе исследовалось влияние формы продукта.

Влияние подводимой мощности на кинетику сушки моркови в форме соломки. Исследования влияния подводимой мощности ИК излучения на кинетику сушки моркови проводились в диапазоне 1,9–11,3 кВт/м^2. Морковь шинковалась соломкой длинной – 0,02 м, шириной – 0,003 м и высотой – 0,001 м. Масса загрузки кассеты с продуктом составляла 50 г.

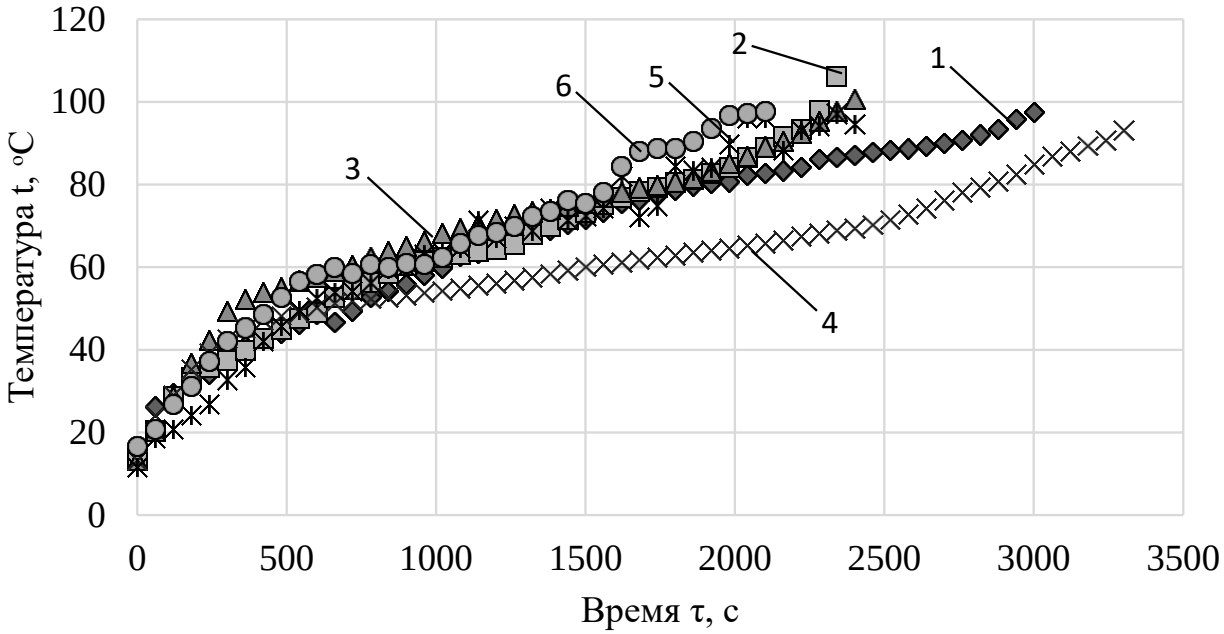


Рисунок 4.25 – Термограммы слайсов овощей и фруктов, где 1 – свекла; 2 – картофель; 3 – тыква; 4 – лук; 5 – морковь, 6 – яблоко

Первичные данные, полученные в ходе экспериментальных исследований, в неподвижном слое отражают изменение массы во времени. Основной ряд экспериментов проводился с мощностью ИК излучения в 6 кВт/м^2 (рисунок 4.26).

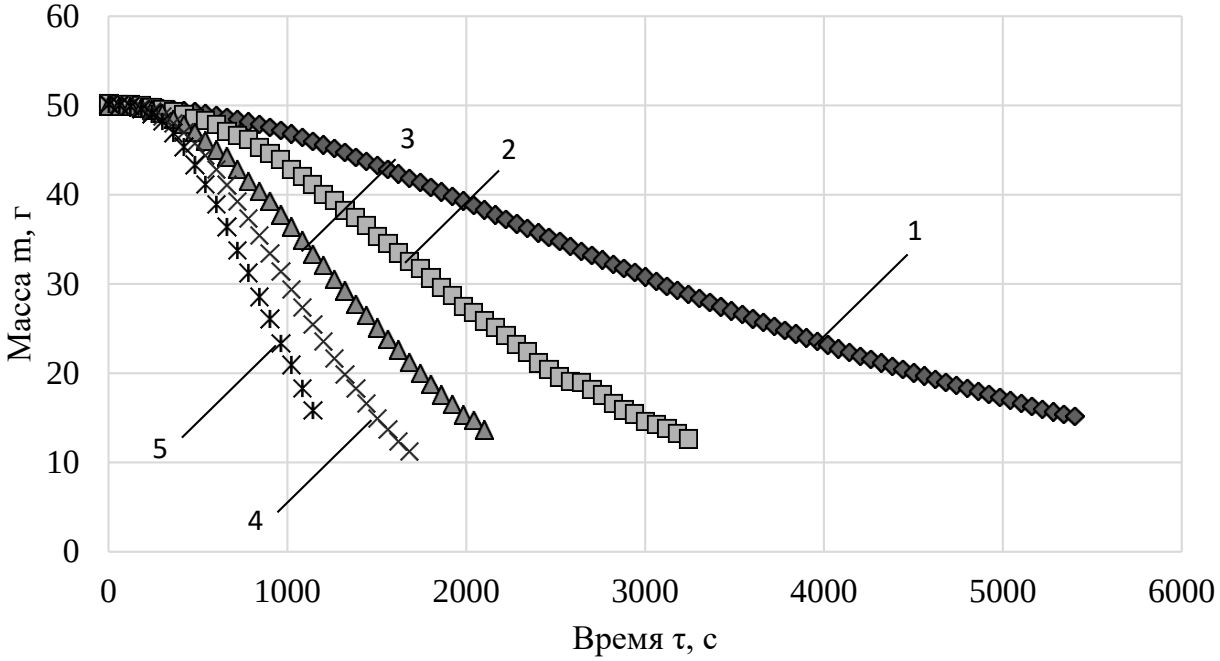


Рисунок 4.26. Влияние подводимой мощности ИК излучения на кинетику процесса сушки соломки моркови, где 1 – N = 1,9 кВт/м^2; 2 – N = 3,75 кВт/м^2; 3 – N = 6 кВт/м^2; 4 – N = 8,75 кВт/м^2; 5 – N = 11,3 кВт/м^2

При мощности в 6 кВт/м^2 высушивание до массы в 14 г (масса сухих веществ составляла 8,5 г), время процесса сушки составило 2000 с. При уменьшении мощности ИК излучения в 0,6 и 0,3 раза, время процесса увеличилось в 1,5 и 2,75 раза соответственно. При увеличении подводимой мощности ИК излучения в 1,5 и 1,9 раза, время процесса уменьшилось в 1,25 и 1,8 раза соответственно.

Исходя из полученных данных, по уравнениям материального баланса рассчитано изменение влажности продукта в процессе сушки. Изменение влажности продукта (рисунок 4.27), в зависимости от подводимой мощности ИК излучения, до необходимой влажности в 11–15 % достигается за 1100–5450 с.

Энергетические затраты на процесс сушки до необходимой влажности 11–15 % (рисунок 4.28) при мощности в 1,9 кВт/м^2 составили 410 кДж при длительности процесса в 5450 с, а при мощности в 11,3 кВт/м^2 – 520 кДж при длительности процесса в 1100 с.

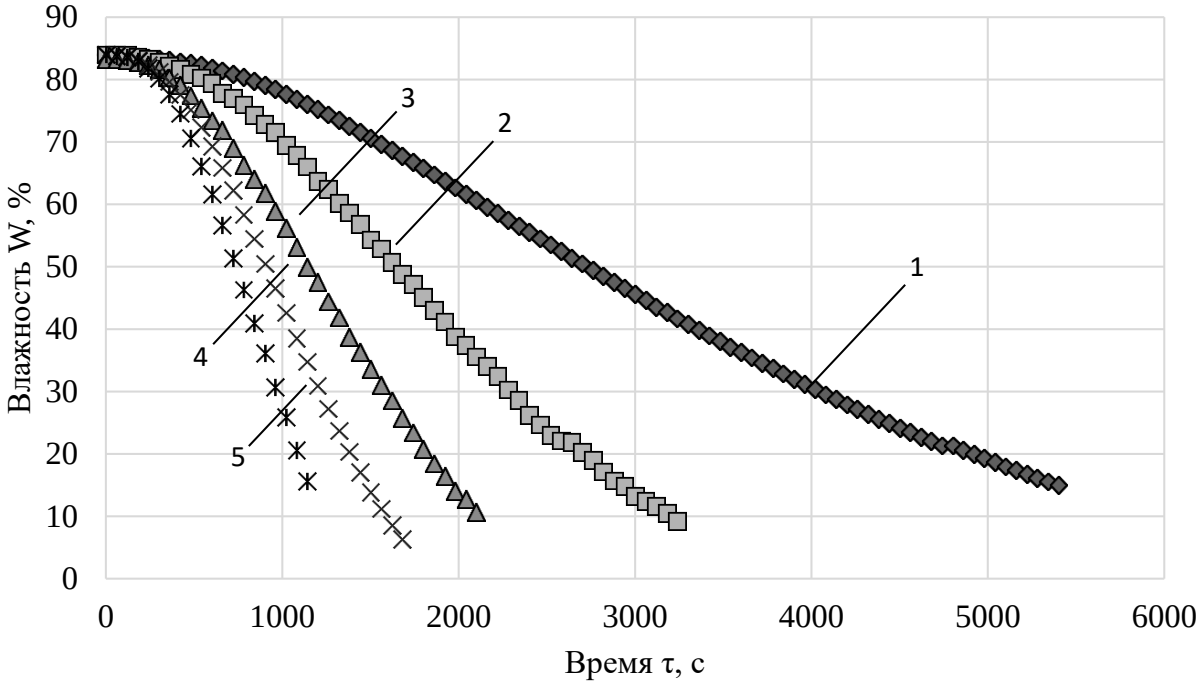


Рисунок 4.27. Влияние мощности на изменение влажности соломки моркови, где 1 – N = 1,9 кВт/м^2; 2 – N = 3,75 кВт/м^2; 3 – N = 6 кВт/м^2; 4 – N = 8,75 кВт/м^2; 5 – N = 11,3 кВт/м^2

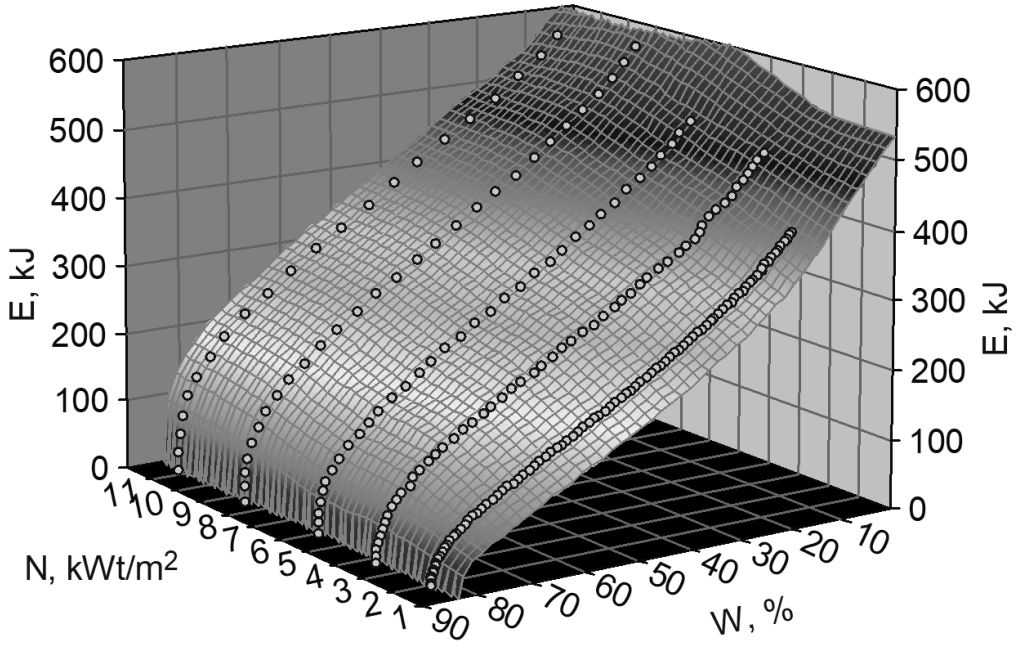


Рисунок 4.28. Влияние мощности ИК излучения на энергетические затраты процесса сушки соломки моркови

В зависимости от подводимой мощности ИК излучателей скорость сушки (рисунок 4.29) изменялась в диапазоне 0,48–2,48 г/мин удаленной влаги. Постоянная скорость сушки протекает в среднем до влажности 13–16 %.

Температуры (рисунок 4.30) продукта в ходе процесса сушки не превышали 100 °С. При мощности в 1,9 кВт/м^2 температура не превышала 56 °С даже при длительной обработке сырья.

На следующем этапе исследовалось влияние подводимой мощности на кинетику сушки соломки яблок.

Влияние подводимой мощности на кинетику сушки яблок в форме соломки. Исследования влияния подводимой мощности на кинетику сушки яблок проводились в диапазоне изменения уровней интенсивности ИК излучения 3,75–11,3 кВт/м^2. Яблоко шинковалась соломкой длинной – 0,02 м, шириной – 0,003 м и высотой – 0,001 м. Масса загрузки кассеты с продуктом составляла 50 г.

Исследовался неподвижный слой, основной объем экспериментов проводился с мощностью ИК излучения в 6 кВт/м^2.

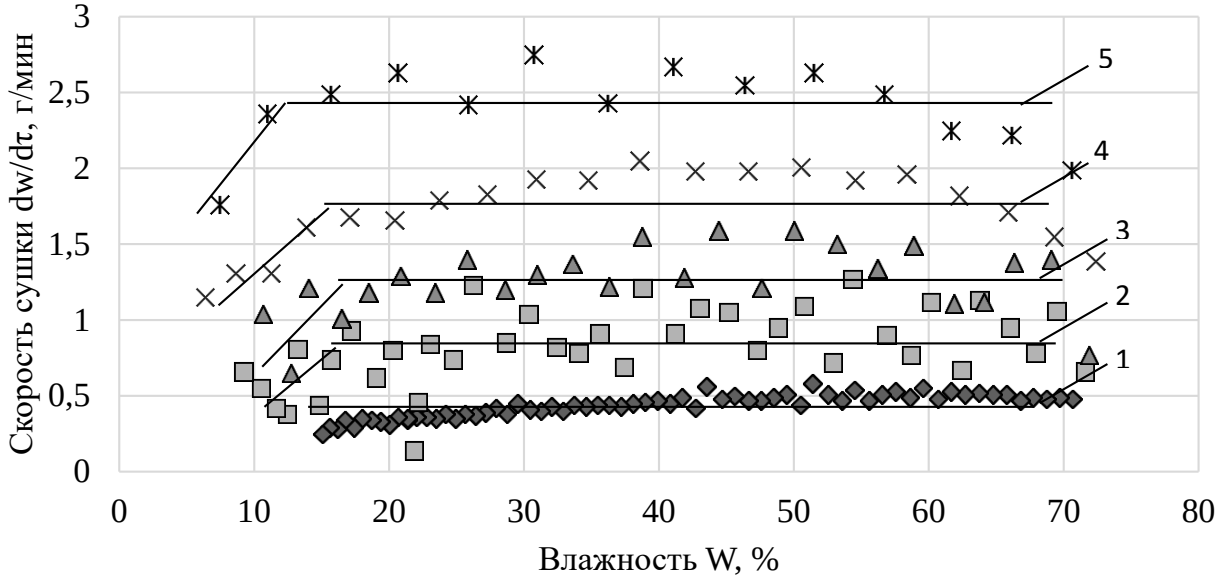


Рисунок 4.29. Влияние мощности на скорости сушки соломки моркови, где 1 – N = 1,9 кВт/м^2; 2 – N = 3,75 кВт/м^2; 3 – N = 6 кВт/м^2; 4 – N = 8,75 кВт/м^2; 5 – N = 11,3 кВт/м^2

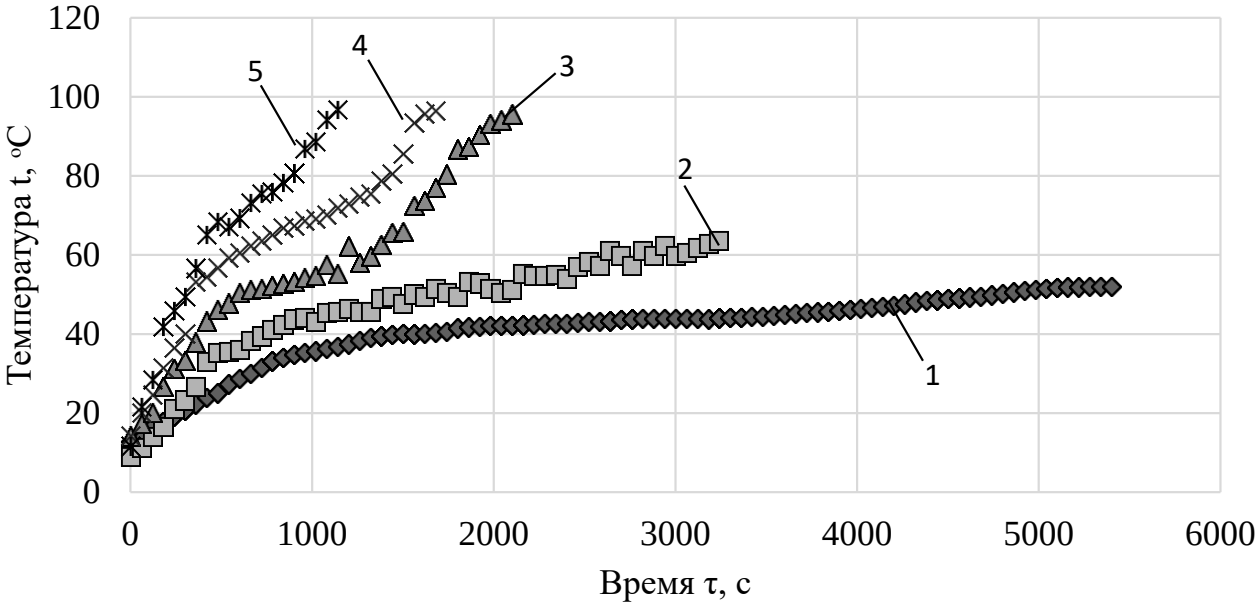


Рисунок 4.30. Влияние мощности излучения на термограммы соломки моркови, где 1 – N = 1,9 кВт/м^2; 2 – N = 3,75 кВт/м^2; 3 – N = 6 кВт/м^2; 4 – N = 8,75 кВт/м^2; 5 – N = 11,3 кВт/м^2

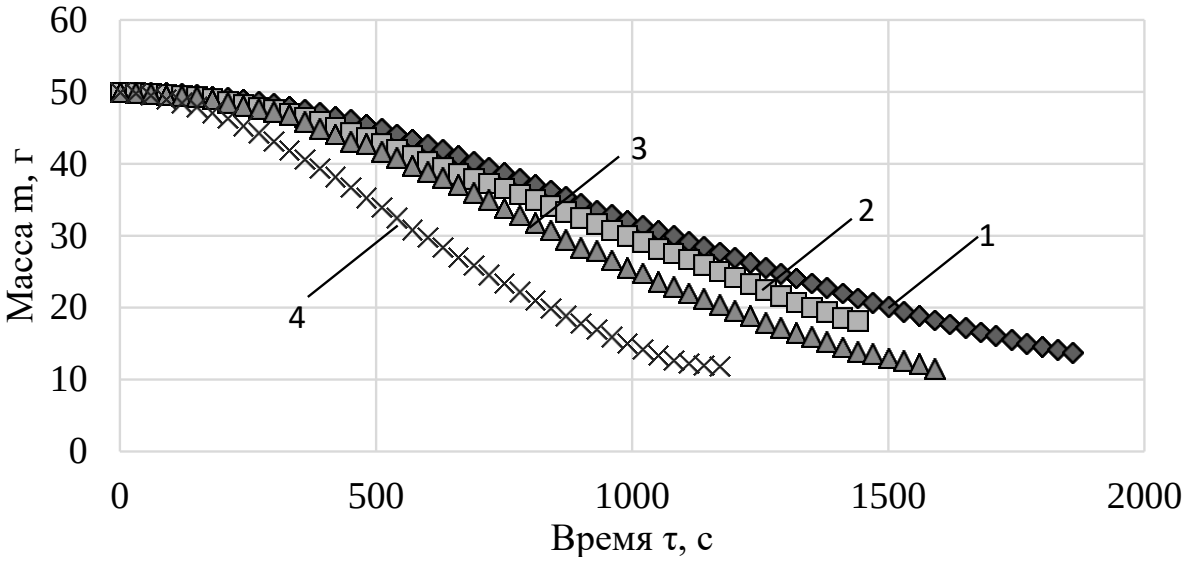


Рисунок 4.31. Влияние подводимой мощности ИК излучения на кинетику процесса сушки соломки яблок, где 1 – N = 3,75 кВт/м^2; 2 – N = 6 кВт/м^2; 3 – N = 8,75 кВт/м^2; 4 – N = 11,3 кВт/м^2

При мощности в 6 кВт/м^2, высушивание до массы в 14 г (масса сухих веществ составляла 8,5 г), время процесса сушки (рисунок 4.31) составило 1450 с. При уменьшении мощности ИК излучения в 0,3 раза, время процесса увеличилось в

1,2 раза соответственно. При увеличении подводимой мощности ИК излучения в 1,5 и 1,9 раза, время процесса уменьшилось в 1,145 и 1,3 раза соответственно.

Рассчитана зависимость изменения влажности продукта от мощности подводимой энергии. В зависимости от подводимой мощности ИК излучения до необходимой влажности в 11–15 % время процесса (рисунок 4.32), составляет 900–1750 с.

Энергетические затраты на процесс сушки до необходимой влажности 11–15 % (рисунок 4.33) при мощности в 3,75 кВт/м^2 составили 325 кДж при длительности процесса в 4600 с, а при мощности в 11,3 кВт/м^2 – 490 кДж при длительности процесса в 1100 с.

В зависимости от подводимой мощности ИК излучателей скорость сушки (рисунок 4.34) изменялась в диапазоне 0,71–1,23 г/мин удаленной влаги. Постоянная скорость сушки протекает в среднем до влажности 20–25 %.

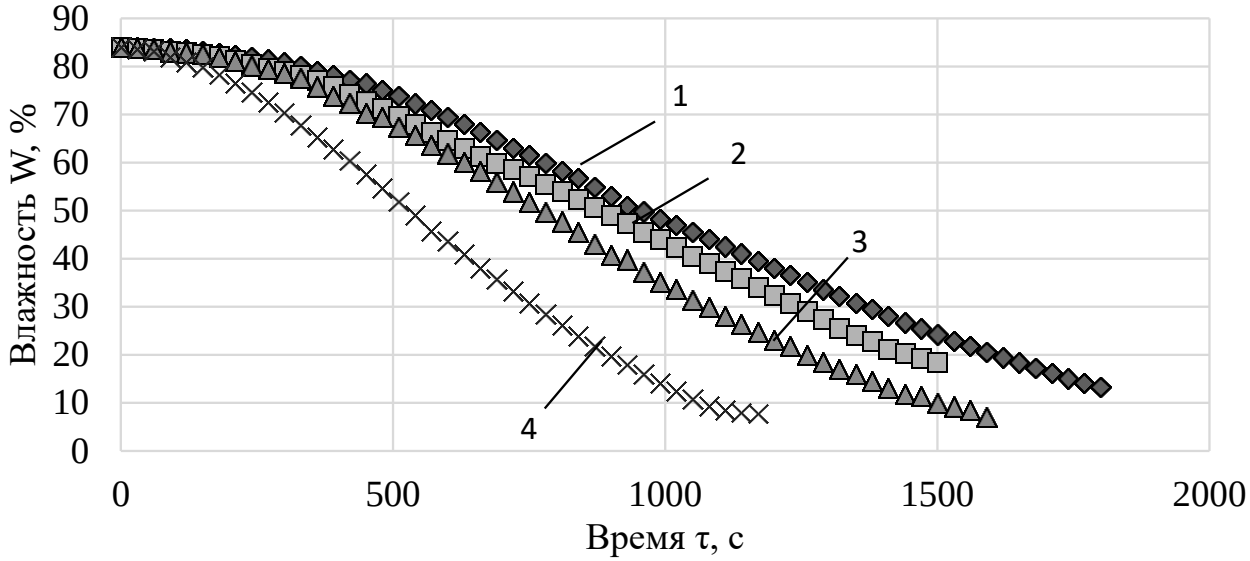


Рисунок 4.32. Влияние мощности излучения на кинетику сушки соломки яблок, где 1 – N = 3,75 кВт/м^2; 2 – N = 6 кВт/м^2; 3 – N = 8,75 кВт/м^2; 4 – N = 11,3 кВт/м^2

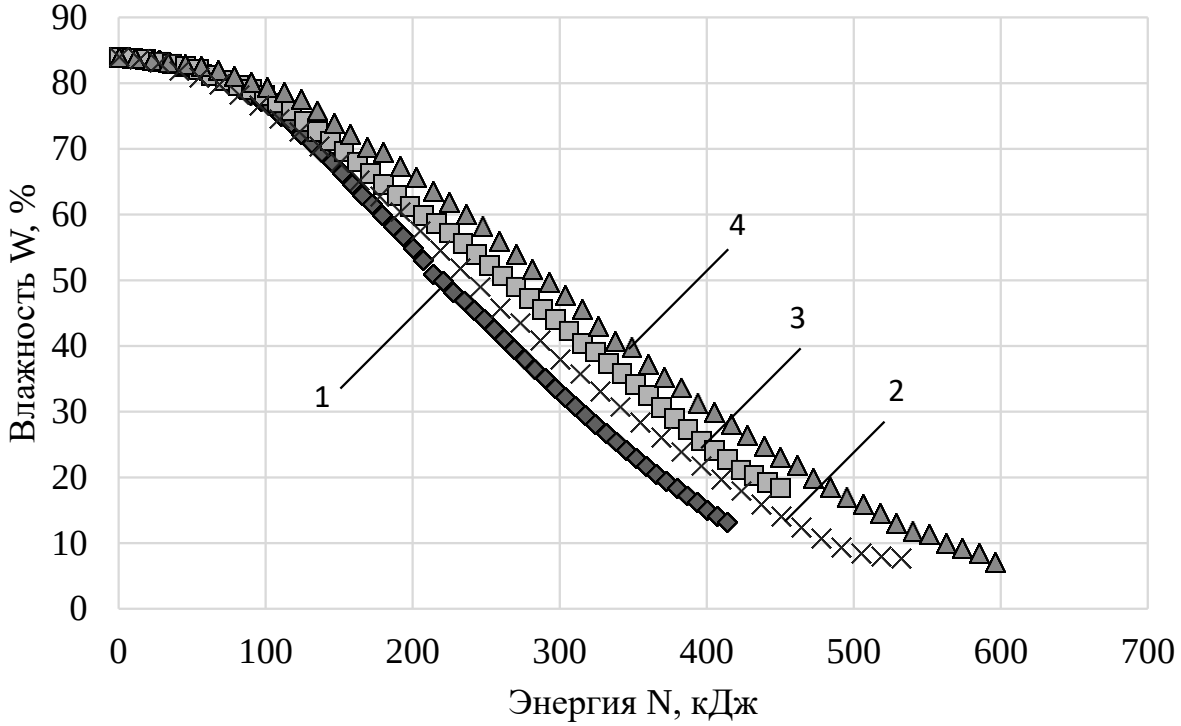


Рисунок 4.33. Влияние мощности ИК излучения на энергетические затраты процесса сушки соломки яблок, где 1 – N = 3,75 кВт/м^2; 2 – N = 6 кВт/м^2; 3 – N = 8,75 кВт/м^2; 4 – N = 11,3 кВт/м^2

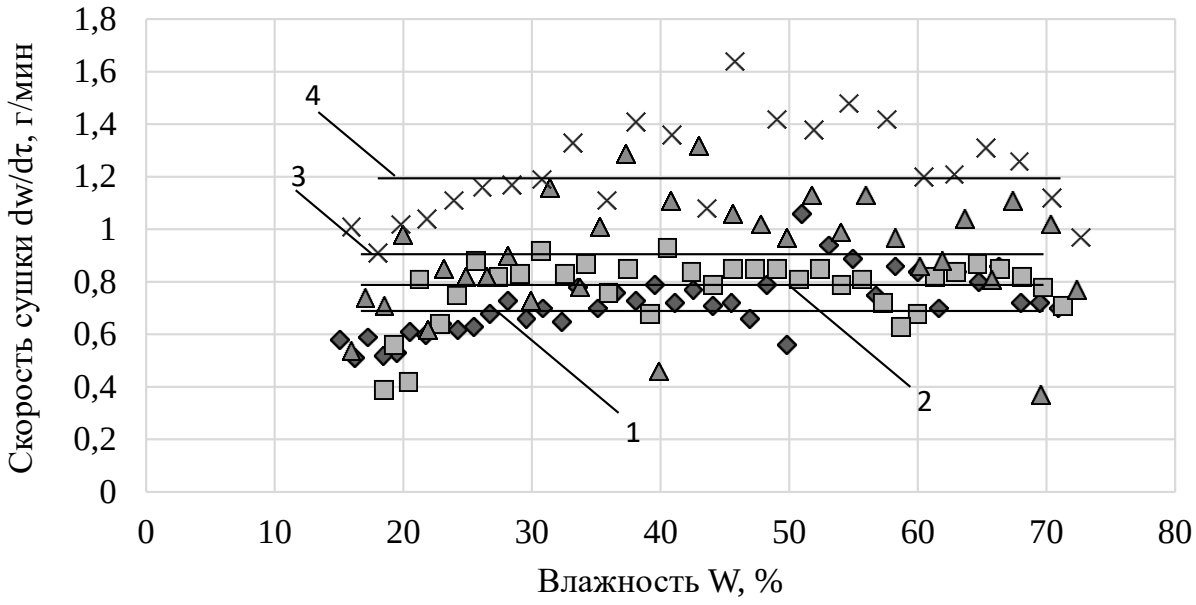


Рисунок 4.34. Влияние мощности излучения на скорости сушки соломки яблок, где 1 – N = 3,75 кВт/м^2; 2 – N = 6 кВт/м^2; 3 – N = 8,75 кВт/м^2; 4 – N = 11,3 кВт/м^2

Температуры продукта (рисунок 4.35) не превышали 100 °С. Температуры продукта при сушке четко коррелируются с уровнем мощности излучения.

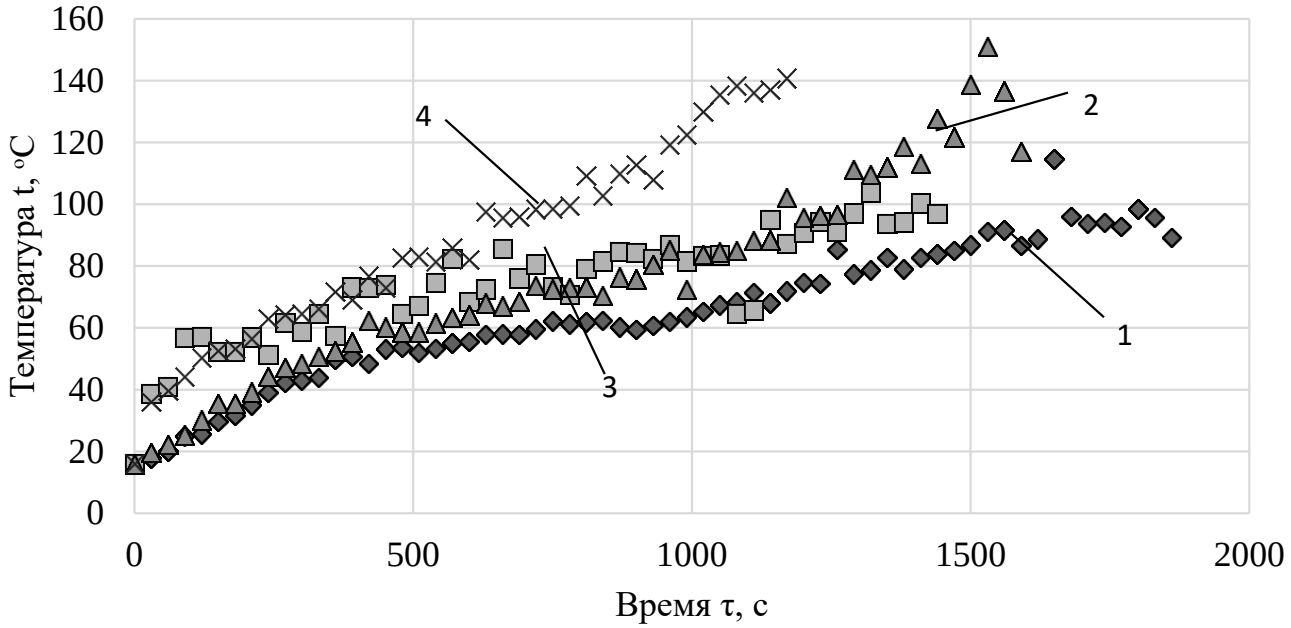


Рисунок 4.35. Влияние мощности на термограммы соломки яблок,
где 1 – N = 3,75 кВт/м^2; 2 – N = 6 кВт/м^2; 3 – N = 8,75 кВт/м^2; 4 – N = 11,3 кВт/м^2

На следующем этапе экспериментов исследовалось влияния толщины слоя на процесс сушки овощей и фруктов в форме соломки.

Влияние толщины слоя на кинетику сушки моркови в форме соломки. Проведены исследования при толщине слоя соломки моркови – 3, 5, 7 и 10 мм, морковь шинковалась соломкой длинной – 0,02 м, шириной – 0,003 м и высотой – 0,001 м.

Мощность ИК излучения составила – 6 кВт/м^2, масса загрузки кассеты с продуктом составляла 50 г.

Результатами эксперимента стала зависимость изменения массы продукта во времени (рисунок 4.36). Время процесса увеличивается по мере увеличения толщины слоя. До необходимой влажности морковь высушивается в течении 2100 с, при увеличении толщины слоя в 1,7 раза время процесса увеличивается в 1,3 раза, при увеличении в 2,3 раза время процесса увеличивается

в 1,55 раза и при увеличении толщины слоя в 3,3 раза время увеличивается в 1,7 раза.

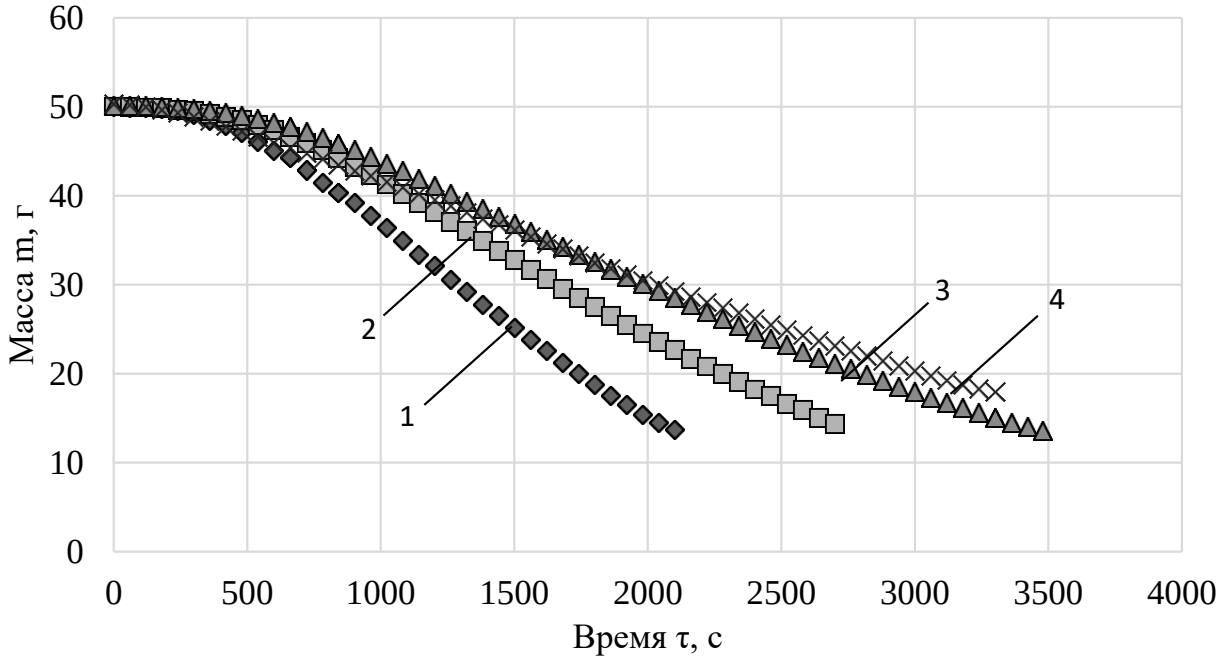


Рисунок 4.36. Влияние толщины слоя на кинетику процесса сушки соломки моркови, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 7 мм; 4 – h = 10 мм

Изменение влажности продукта (рисунок 4.37), в зависимости от толщины слоя с 84 % до 15 % занимает 2100–3750 с. После увеличения слоя моркови в 1,7 раза наблюдается значительное ухудшение процесса сушки.

Энергетические затраты на процесс сушки до необходимой влажности 11–15 % (рисунок 4.38) при толщине слоя в 3 мм составили 480 кДж энергии при длительности процесса в 2100 с, а при толщине слоя в 10 мм – энергетические затраты увеличились в 1,9 раза при длительности процесса в 3750 с.

Скорости сушки (рисунок 4.39) в зависимости от толщины слоя моркови, изменялись в диапазоне 0,61–1,37 г/мин удаленной влаги. При постоянной скорости сушка протекает в среднем до влажности 22–26 %.

При любой толщине слоя его влияние на температуру (рисунок 4.40) соломки моркови не столь значимое. Температуры достигали 100 °С в последний период обработки, длительность которого 5–12 минут.

На следующем этапе исследовались влияния основных факторов на процесс сушки соломки из различных овощей и фруктов.

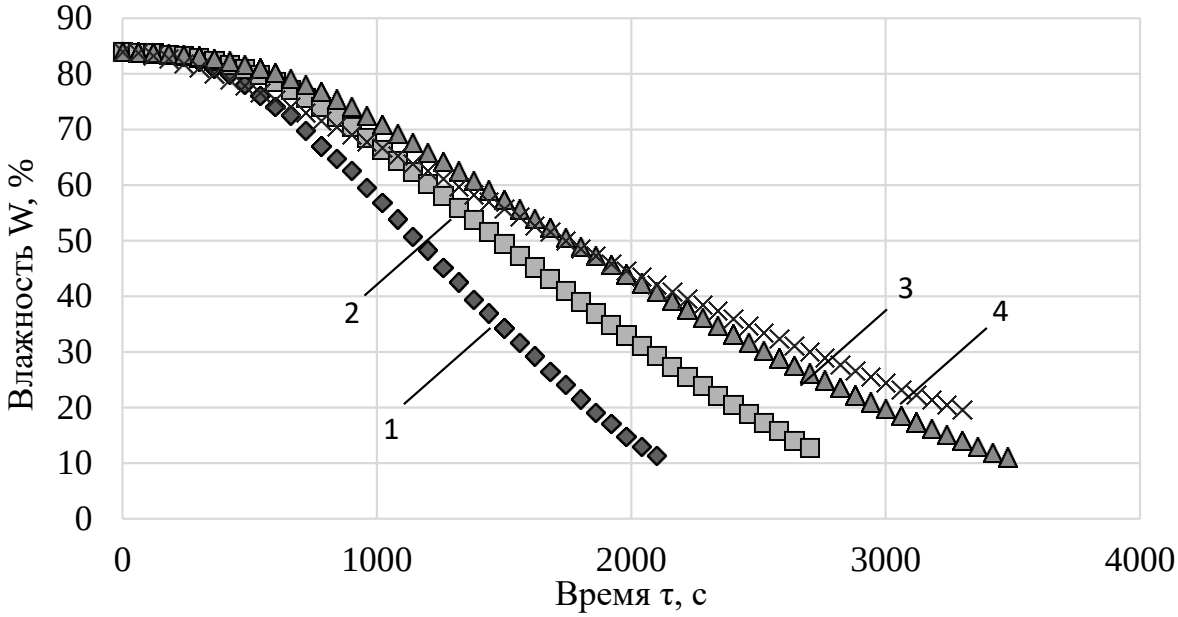


Рисунок 4.37. Влияние толщины слоя на влажность соломки моркови, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 7 мм; 4 – h = 10 мм

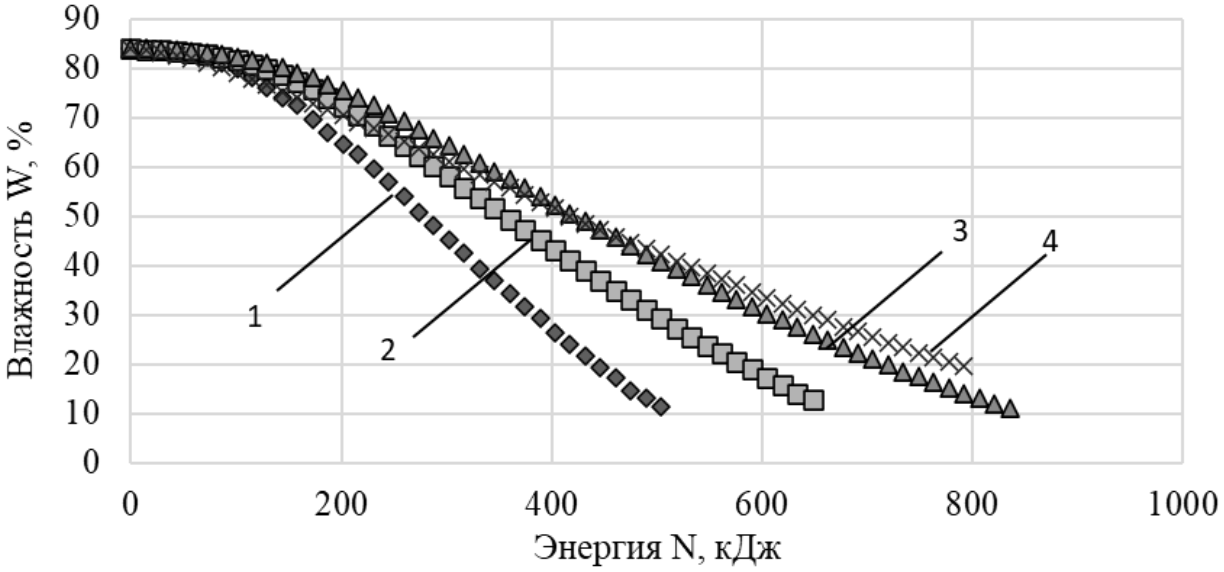


Рисунок 4.38. Влияние толщины слоя на энергетические затраты процесса сушки соломки моркови, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 7 мм; 4 – h = 10 мм

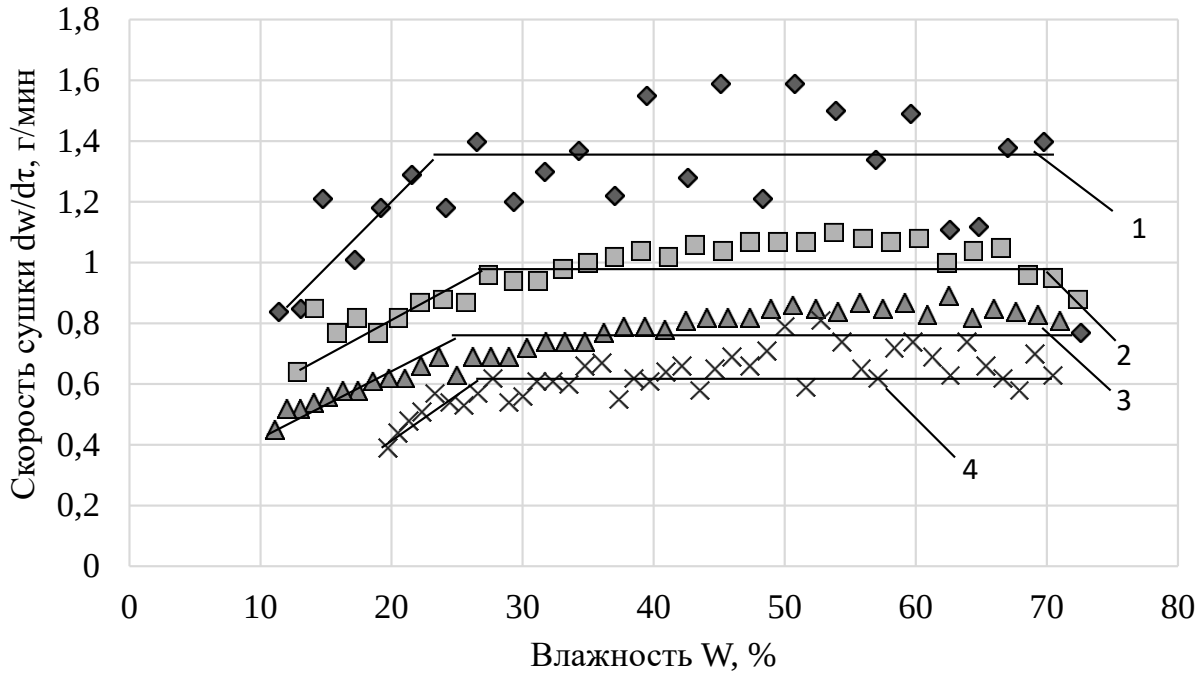


Рисунок 4.39. Влияние толщины слоя на скорость сушки соломки моркови, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 7 мм; 4 – h = 10 мм

Кинетика сушки различных овощей и фруктов в форме соломки. Уровень интенсивности ИК излучения во всех опытах составлял 6 кВт/м^2. Продукт шинковался соломкой длинной – 0,02 м, шириной – 0,003 м и высотой – 0,001 м. Масса загрузки кассеты с продуктом составляла 50 г.

Экспериментальные линии убыли влаги в неподвижном слое (рисунок 4.41) получены при сушке шести видов продуктов с различными особенностями, структурой и свойствами (таблица 3.4).

При удельной мощности излучения в 6 кВт/м^2, высушивание до массы в 14 г (масса сухих веществ составляла 8,5 г), требовало времени процесса сушки 2000–3300 с. Время высушивания свеклы и лука наиболее длительны, остальные же продукты характеризуются приблизительно одинаковым значением скорости сушки.

В зависимости от вида продукта время изменение влажности (рисунок 4.42), до необходимого значения в 11–15 % составляет 2000–3300 с.

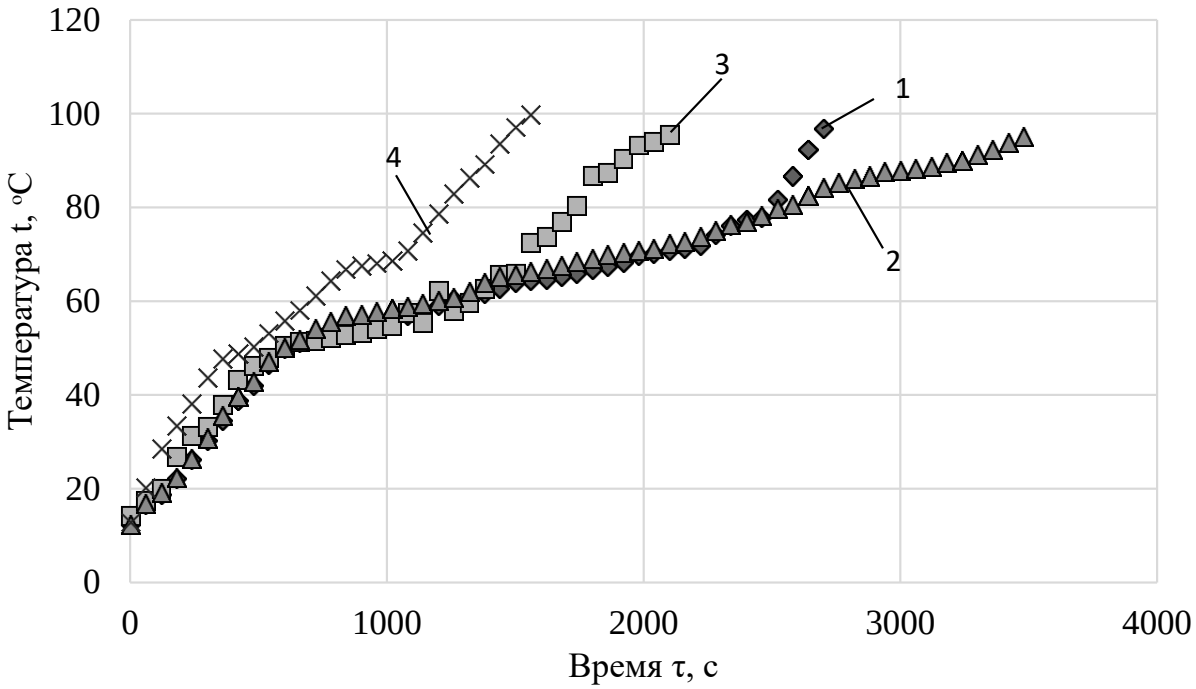


Рисунок 4.40. Влияние толщины слоя на термограммы соломки моркови, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 7 мм; 4 – h = 10 мм

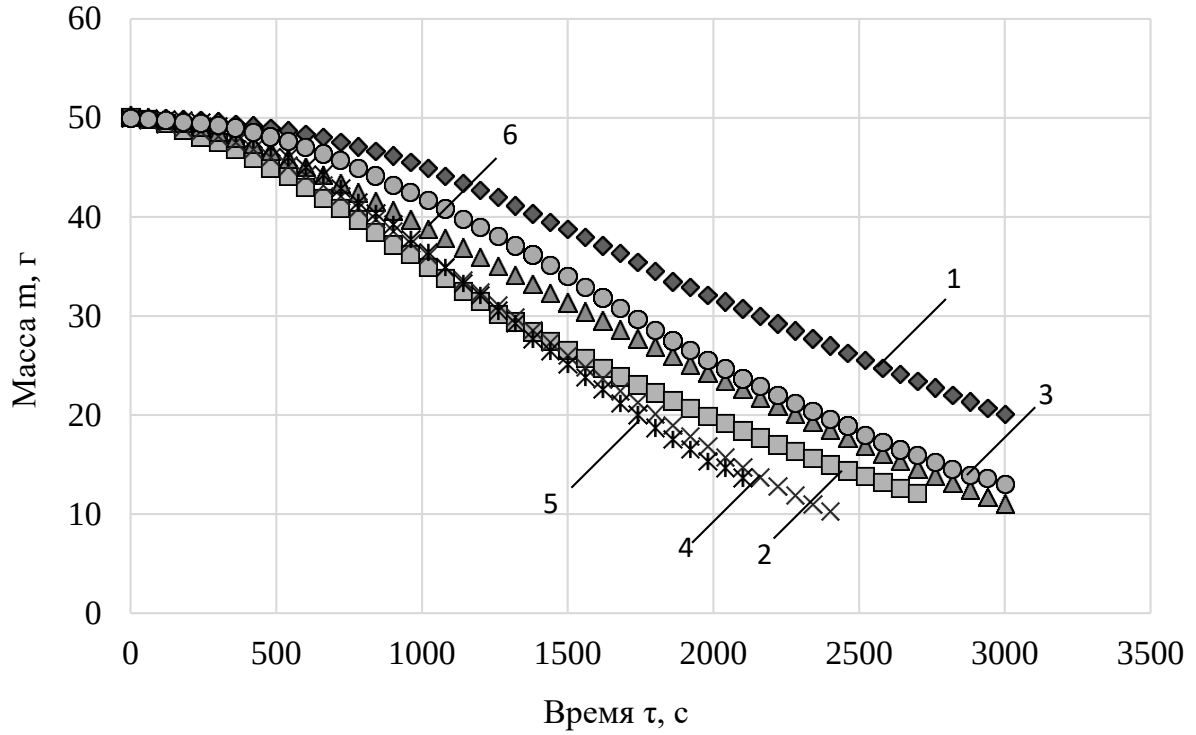


Рисунок 4.41. Кинетика сушки соломки овощей и фруктов, где 1 – свекла; 2 – картофель; 3 – тыква; 4 – лук; 5 – морковь, 6 – яблоко

Энергетические затраты на процесс сушки до необходимой влажности 11–15 % (рисунок 4.45) составили 440–790 кДж. Свекла и лук требуют больших затрат энергии.

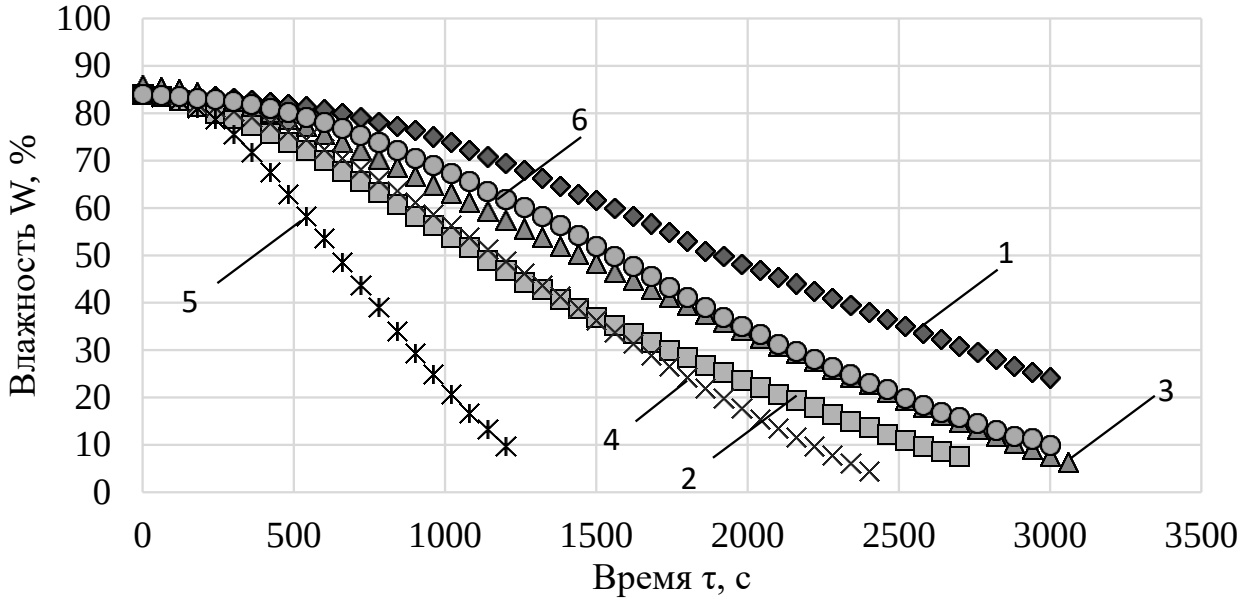


Рисунок 4.42. Изменение влажности соломки овощей и фруктов, где 1 – свекла; 2 – картофель; 3 – тыква; 4 – лук; 5 – морковь, 6 – яблоко

Для каждого продукта линия скорости сушки (рисунок 4.44) имеет постоянную скорость сушки до влажности в 20–23 %, после чего скорость сушки замедляется. В периоде спада скорости сушки необходимо регулировать мощность подводимой энергии, уменьшать ее в соответствии с количеством оставшейся влаги в продукте.

Температуры продукта (рисунок 4.45) не превышали 100 °С (за исключением картофеля). Малое время обработки при ИК излучении предопределяет сохранность пищевого потенциала сырья.

Получена обширная база экспериментальных данных, которая дает возможность провести анализ влияния ключевых факторов на кинетику сушки и провести их обобщение методами теории подобия.

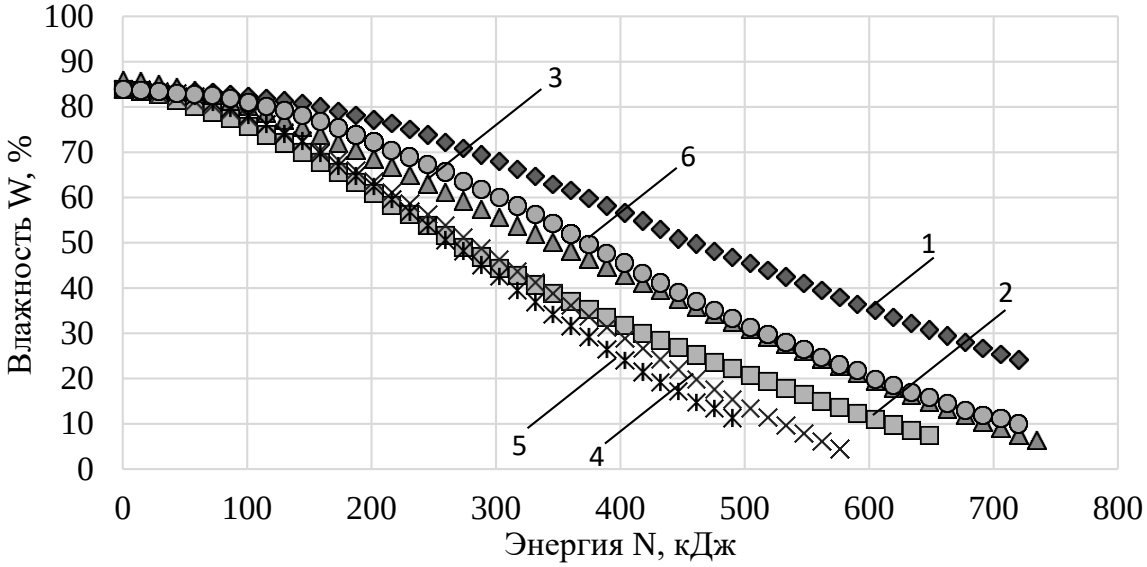


Рисунок 4.43. Энергетические затраты процесса сушки, где 1 – свекла; 2 – картофель; 3 – тыква; 4 – лук; 5 – морковь, 6 – яблоко

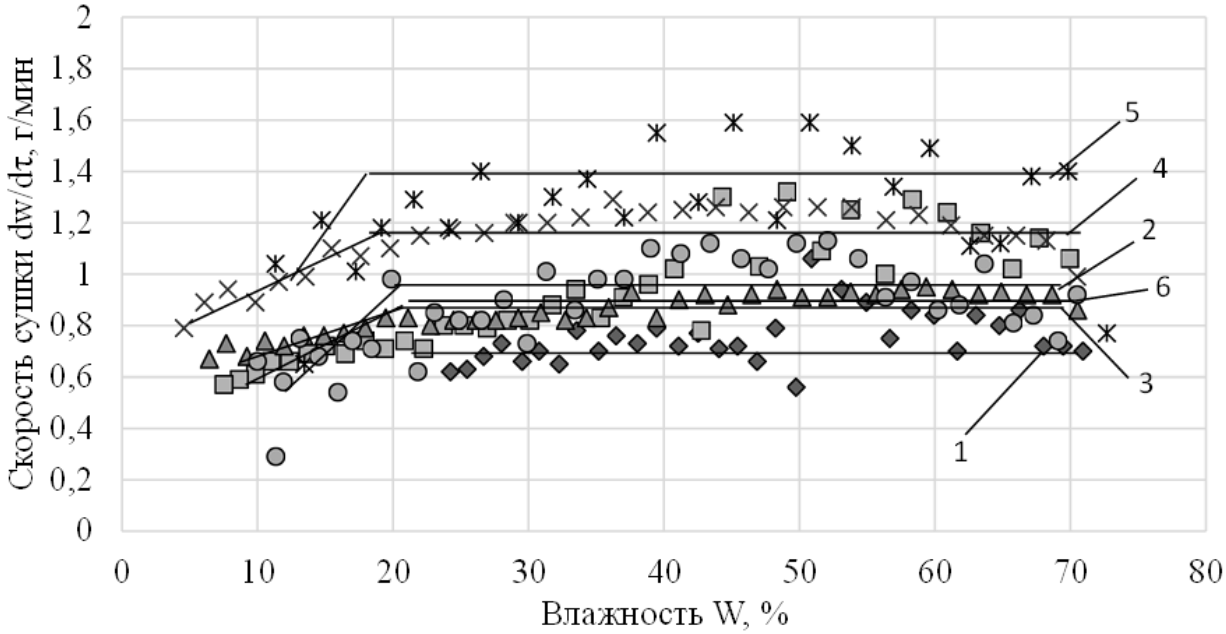


Рисунок 4.44. Линия скорости сушки соломки овощей и фруктов, где 1 – свекла; 2 – картофель; 3 – тыква; 4 – лук; 5 – морковь, 6 – яблоко

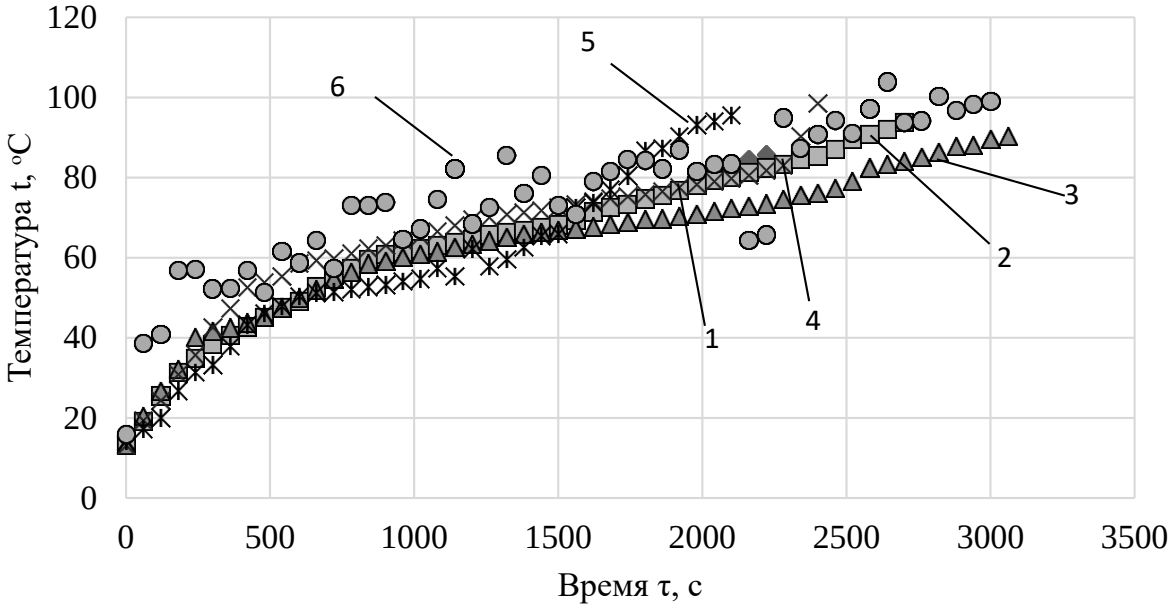


Рисунок 4.45. Термограммы соломки овощей и фруктов, где 1 – свекла; 2 – картофель; 3 – тыква; 4 – лук; 5 – морковь, 6 – яблоко

4.1.2. Анализ результатов исследований

База экспериментальных данных (таблица 4.1–4.5) позволяет вывести обобщенную модель процесса сушки в виде критериальных уравнений. Отображение влияния мощности, толщины слоя и фактора формы позволили вычислить расчетное число Шервуда, которое совпадает с отличием в 5–10 % с экспериментальным.

Таблица 4.1. Диапазон экспериментального моделирования по сушке слайсов моркови

№	ΔG, г	$\Delta\tau$, с	N, Вт	q, кВт/м^2	a, м	b, м	h, м
1	26,5	2850	75	1,9	0,11	0,11	0,003
2	25,8	1830	150	3,75	0,11	0,11	0,003
3	25,1	1390	240	6	0,11	0,11	0,003
4	24,8	1000	340	8,75	0,11	0,11	0,003
5	24,4	770	450	11,3	0,11	0,11	0,003
6	32,1	1600	240	6	0,11	0,11	0,003

Продолжение таблицы 4.1.

№	ΔG, г	$\Delta\tau$, с	N, Вт	q, кВт/м^2	a, м	b, м	h, м
7	31,8	2650	240	6	0,1	0,1	0,005
8	27,8	3000	240	6	0,095	0,09	0,007
9	23	3450	240	6	0,09	0,085	0,01

Таблица 4.2. Диапазон экспериментального моделирования по сушке соломки моркови

№	ΔG, г	$\Delta\tau$, с	N, Вт	q, кВт/м^2	a, м	b, м	h, м
1	31,4	3650	75	1,9	0,11	0,11	0,003
2	30,3	2100	150	3,75	0,11	0,11	0,003
3	29,7	1400	240	6	0,11	0,11	0,003
4	29	1000	340	8,75	0,11	0,11	0,003
5	28	750	450	11,3	0,11	0,11	0,003
6	33,1	1580	240	6	0,11	0,11	0,003
7	30,5	2300	240	6	0,1	0,1	0,005
8	28,1	2800	240	6	0,095	0,09	0,007
9	24,1	3000	240	6	0,09	0,085	0,01

Таблица 4.3. Диапазон экспериментального моделирования по сушке слайсов яблок

№	ΔG, г	$\Delta\tau$, с	N, Вт	q, кВт/м^2	a, м	b, м	h, м
1	25,6	2850	75	1,9	0,11	0,11	0,003
2	29,1	1800	150	3,75	0,11	0,11	0,003
3	31,2	1400	240	6	0,11	0,11	0,003
4	32,8	1050	340	8,75	0,11	0,11	0,003
5	31,1	780	450	11,3	0,11	0,11	0,003
6	31,1	1450	240	6	0,11	0,11	0,003
7	30,2	2100	240	6	0,1	0,1	0,005
8	33,8	3000	240	6	0,095	0,09	0,007
9	33,1	3950	240	6	0,09	0,085	0,01

Таблица 4.4. Диапазон экспериментального моделирования по сушке слайсов овощей и фруктов

№	ΔG, г	$\Delta\tau$, с	N, Вт	q, кВт/м^2	a, м	b, м	h, м
1	34,1	2250	240	6	0,11	0,11	0,003
2	33,2	1850	240	6	0,11	0,11	0,003
3	35,8	1650	240	6	0,11	0,11	0,003
4	34,3	2700	240	6	0,11	0,11	0,003
5	33,4	1800	240	6	0,11	0,11	0,003
6	34,1	1500	240	6	0,11	0,11	0,003

Таблица 4.5. Диапазон экспериментального моделирования по сушке соломки овощей и фруктов

№	ΔG, г	$\Delta\tau$, с	N, Вт	q, кВт/м^2	a, м	b, м	h, м
1	28	2300	240	6	0,11	0,11	0,003
2	30,8	2000	240	6	0,11	0,11	0,003
3	31	2500	240	6	0,11	0,11	0,003
4	34,8	1800	240	6	0,11	0,11	0,003
5	32,1	1450	240	6	0,11	0,11	0,003
6	34,6	2500	240	6	0,11	0,11	0,003

Параметры таблиц 4.2–4.5 являлись исходными для расчета безразмерных комплексов и чисел подобия. Методика обработки данных следующая.

1. Определяется масса удаленной влаги на участке постоянной скорости сушки M, кг/с:

$$M = \frac{\Delta G}{\Delta\tau \cdot 10^3 \cdot 60} \tag{4.1}$$

где M – скорость влагоудаления, г/мин;

ΔG – масса удаленной влаги, г;

$\Delta\tau$ – время процесса сушки, с.

2. Определяется объемный расход влаги W, м^3/с:

$$W = M \cdot \frac{1}{\rho} \tag{4.2}$$

где W – расход пара, м^3/с;

ρ – плотность, кг/м^3.

3. Определяется площадь поверхности фазового контакта f, м^2:

$$f = a \cdot b \tag{4.3}$$

где a – ширина продукта на кассете, м;

b – длинна продукта на кассете, м.

4. Определяется коэффициент массоотдачи β, м/с:

$$\beta = \frac{W}{f} \tag{4.4}$$

5. Определяется число Шервуда Sh:

$$Sh = \frac{\beta \cdot d}{D} \tag{4.5}$$

где d – толщина слоя, м;

D – эквивалентный диаметр, м.

6. Рассчитывается число энергетического действия (число Бурдо) Bu:

$$Bu = \frac{N}{M \cdot r} \tag{4.6}$$

где N – мощность, Вт;

M – скорость влагоудаления, кг/с;

r – скрытая теплота фазового перехода.

7. Рассчитывается безразмерная толщина слоя:

$$H = \frac{h}{h_0} \tag{4.7}$$

где, h – текущее значение толщины слоя, м;

h_0 – базовое значение толщины слоя, м (принято 1 м).

8. Рассчитывается фактор формы

$$Ff = \frac{h}{B} \tag{4.8}$$

где, B – текущее значение ширины слоя, м.

Следующей задачей является определение констант в критериальном уравнении:

$$Sh = A \cdot Bu^n \cdot H^m \cdot Ff^k \tag{4.9}$$

Процедура нахождения констант следующая.

1. Расчет n:

$$\lg Sh_1 = \lg c + n \lg Bu_1 \tag{4.10}$$

$$\lg Sh_2 = \lg c + n \lg Bu_2 \tag{4.11}$$

Выражаем $\lg c$:

$$\lg c = \lg Sh_2 - n \lg Bu_2 \tag{4.12}$$

Производим подстановку в 1-е выражение:

$$\lg Sh_1 = \lg Sh_2 - n \lg Bu_2 + n \lg Bu_1 \tag{4.13}$$

$$\lg Sh_1 - \lg Sh_2 = n \lg Bu_1 - n \lg Bu_2 \tag{4.14}$$

$$\lg Sh_1 - \lg Sh_2 = n\left(\lg Bu_1 - \lg Bu_2\right) \tag{4.15}$$

$$n = \frac{\lg Sh_1 - \lg Sh_2}{\lg Bu_1 - \lg Bu_2} \tag{4.16}$$

2. Расчет m:

$$\lg S_1 = \lg b + m \lg H_1 \tag{4.17}$$

$$\lg S_2 = \lg b + m \lg H_2 \tag{4.18}$$

Выражаем $\lg b$:

$$\lg b = l \lg S_2 - m \lg H_2 \tag{4.19}$$

Производим подстановку в 1-е выражение

$$\lg S_1 = l \lg S_2 - m \lg H_2 + m \lg H_1 \tag{4.20}$$

$$\lg S_1 - l \lg S_2 = m \lg H_1 - m \lg H_2 \tag{4.21}$$

$$\lg S_1 - l \lg S_2 = m\left(\lg H_1 - \lg H_2\right) \tag{4.22}$$

$$m = \frac{\lg S_1 - \lg S_2}{\lg H_1 - \lg H_2} \tag{4.23}$$

3. Расчет k:

$$\lg Sk_1 = \lg a + k \lg Ff_1 \tag{4.24}$$

$$\lg Sk_2 = \lg a + k \lg Ff_2 \tag{4.25}$$

Выражаем $\lg a$:

$$\lg a = \lg Sk_2 - k \lg Ff_2 \tag{4.26}$$

Производим подстановку в 1-е выражение:

$$\lg Sk_1 = \lg Sk_2 - k \lg Ff_2 + k \lg Ff_1 \quad (4.27)$$

$$\lg Sk_1 - \lg Sk_2 = k \lg Ff_1 - k \lg Ff_2 \quad (4.28)$$

$$\lg Sk_1 - \lg Sk_2 = k\left(\lg Ff_1 - \lg Ff_2\right) \quad (4.29)$$

$$k = \frac{\lg Sk_1 - \lg Sk_2}{\lg Ff_1 - \lg Ff_2} \quad (4.30)$$

4. Расчет A:

$$A = \lg Sk_1 - k \lg Ff_1 \quad (4.31)$$

Результаты расчетов по изложенной выше методике предоставлены в Таблицах 4.6–4.10.

Таблица 4.6. Обработка базы экспериментальных данных по сушке слайсов моркови

№	β, м/с	Sh	Bu	H	Ff
1	0,000000768	0,000107	3,37	0,003	0,008617634
2	0,000001165	0,000162	4,44	0,003	0,008617634
3	0,000001492	0,000207	5,54	0,003	0,008617634
4	0,000002050	0,000285	5,72	0,003	0,008617634
5	0,000002619	0,000364	5,92	0,003	0,008617634
6	0,000001658	0,000230	4,99	0,003	0,212532
7	0,000001200	0,000278	8,34	0,005	0,29876
8	0,000001084	0,000351	10,80	0,007	0,373888
9	0,000000871	0,000403	15,02	0,01	0,474252

Таблица 4.7. Обработка базы экспериментальных данных по сушке соломки моркови

№	β, м/с	Sh	Bu	H	Ff
1	0,000000711	0,000099	3,64	0,003	0,001020724
2	0,000001192	0,000166	4,34	0,003	0,001020724
3	0,000001753	0,000244	4,72	0,003	0,001020724
4	0,000002397	0,000333	4,89	0,003	0,001020724

Продолжение таблицы 4.7.

№	β, м/с	Sh	Bu	H	Ff
5	0,000003085	0,000429	5,03	0,003	0,001020724
6	0,000001731	0,000240	4,78	0,003	0,205845976
7	0,000001326	0,000307	7,55	0,005	0,205845976
8	0,000001174	0,000380	9,98	0,007	0,205845976
9	0,000001050	0,000486	12,46	0,01	0,205845976

Таблица 4.8. Обработка базы экспериментальных данных по сушке слайсов яблок

№	β, м/с	Sh	Bu	H	Ff
1	0,000000742	0,000103	3,48	0,003	0,008617634
2	0,000001336	0,000186	3,87	0,003	0,008617634
3	0,000001842	0,000256	4,49	0,003	0,008617634
4	0,000002582	0,000359	4,54	0,003	0,008617634
5	0,000003295	0,000458	4,71	0,003	0,008617634
6	0,000001773	0,000246	4,67	0,003	0,188207
7	0,000001438	0,000333	6,96	0,005	0,264567
8	0,000001318	0,000427	8,89	0,007	0,331096
9	0,000001095	0,000507	11,95	0,01	0,419974

Таблица 4.9. Обработка базы экспериментальных данных по сушке слайсов овощей и фруктов

№	β, м/с	Sh	Bu	H	Ff
1	0,000001253	0,000174	6,61	0,003	0,008617634
2	0,000001483	0,000206	5,58	0,003	0,008617634
3	0,000001793	0,000249	4,61	0,003	0,008617634
4	0,000001050	0,000146	7,88	0,003	0,008617634
5	0,000001534	0,000213	5,40	0,003	0,008617634
6	0,000001879	0,000261	4,40	0,003	0,008617634

При обработке базы экспериментальных данных получены результаты, отображающие процесс сушки, который выражен критериальным уравнением (4.9).

Результаты полученных коэффициентов обобщающей модели процесса сушки представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.10. Обработка базы экспериментальных данных по сушке соломки овощей и фруктов

№	β, м/с	Sh	Bu	H	Ff
1	0,000001006	0,000140	8,22	0,003	0,008617634
2	0,000001273	0,000177	6,50	0,003	0,008617634
3	0,000001025	0,000142	8,07	0,003	0,008617634
4	0,000001598	0,000222	5,18	0,003	0,008617634
5	0,000001830	0,000254	4,52	0,003	0,008617634
6	0,000001144	0,000159	7,23	0,003	0,008617634

Таблица 4.11. Коэффициенты обобщающей модели процесса сушки

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

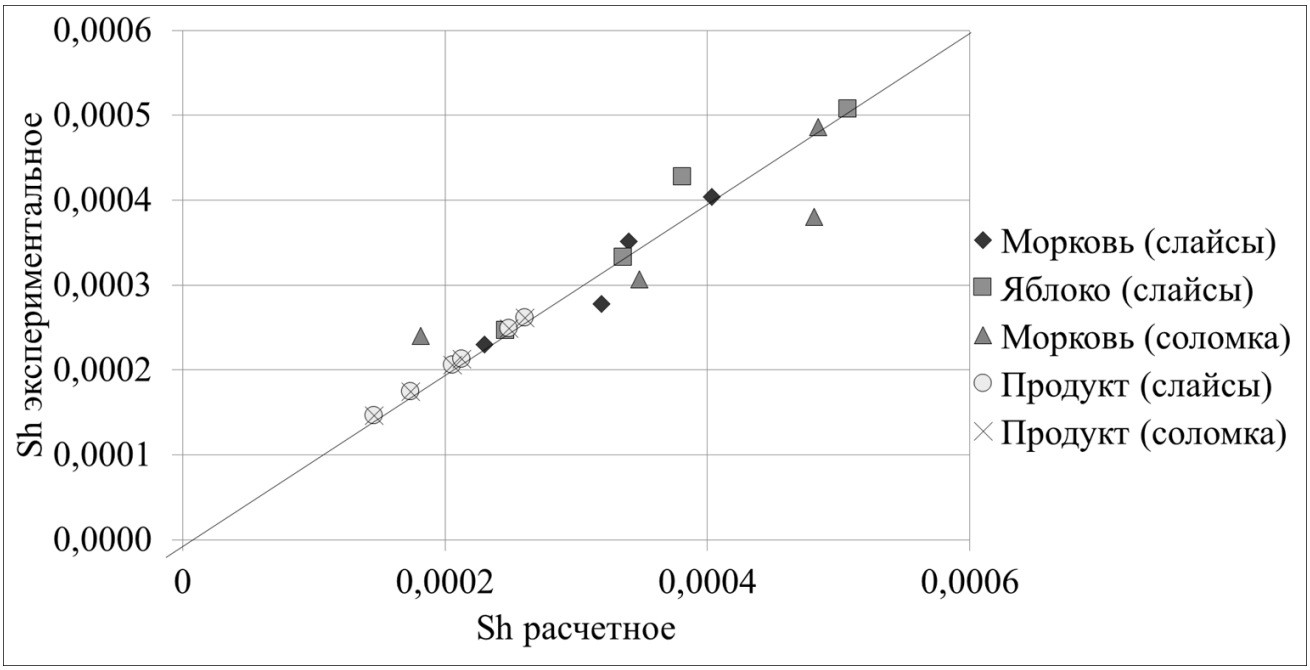


Рисунок 4.46. Сравнение данных расчетных и экспериментальных по числу Шервуда

Проведя проверку на адекватность полученной модели (4.9) и сравнив полученные расчетные и экспериментальные данные (рисунок 4.46), было определено, что полученная модель соответствует экспериментальным данным с различием в 5–10 %, что является весомым результатом проведенных исследований, подтверждающим эффективность и точность полученных критериальных уравнений.

4.1.3. Сравнение энергетических затрат конвективной и ИК сушки

Для сравнения эффективности двух видов сушки, о которых сказано выше, использован универсальный показатель, k_v (отношение скорости сушки v_c к тепловому потоку q_c) описанный в разделе 3 (уравнения 3.58 и 3.59).

На графиках (рисунок 4.47, 4.48) представлены зависимости энергетических затрат на процесс от скорости воздуха в сушильной камере при различных значениях температуры воздуха, контактирующего с объектом сушки.

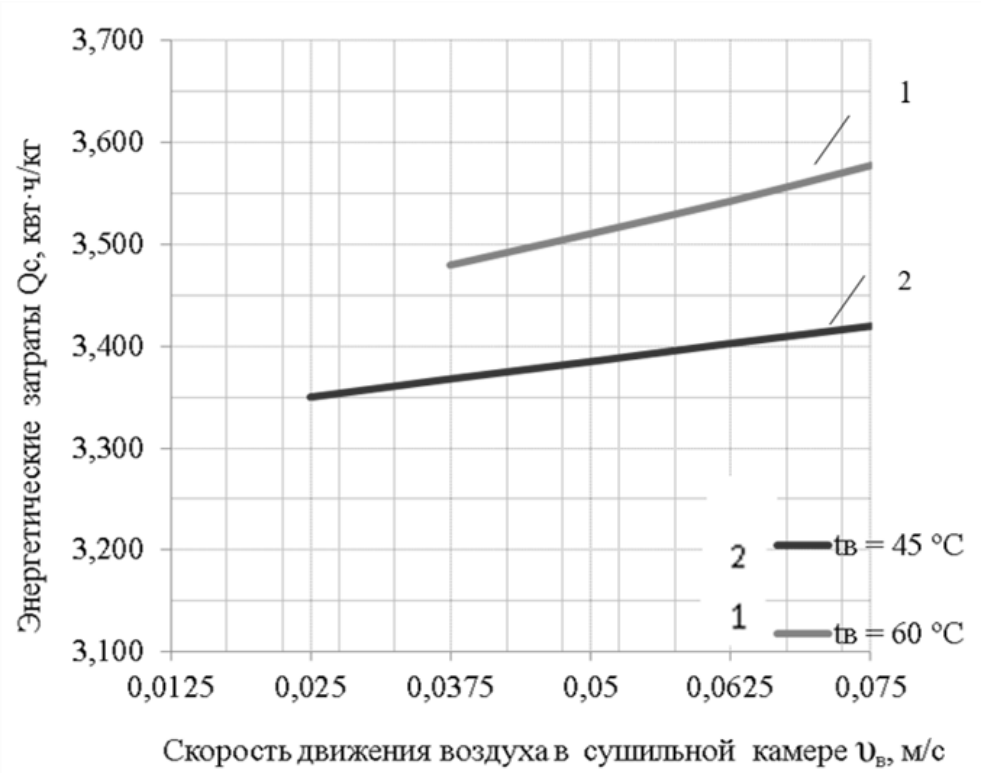


Рисунок 4.47. Зависимость энергетических затрат на сушку от скорости движения воздуха в сушильной камере (конвективная сушка)

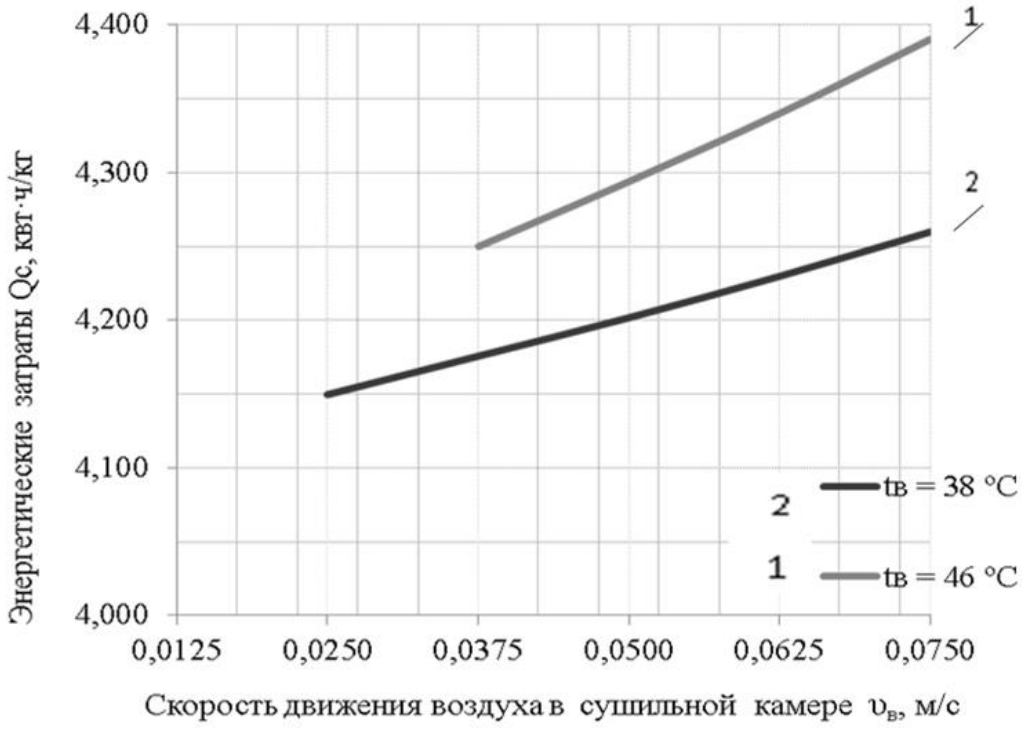


Рисунок 4.48. Зависимость энергетических затрат на сушку от скорости движения воздуха в сушильной камере (ИК сушка)

На графике (рисунок 4.49) приведена модель сушки в виде сравнительных графических зависимостей приведенной величины k_v от величины влажности массы, подвергаемой сушке.

В начальный период сушки скорость процесса выше при ИК сушке (это отражает большее значение величины k_v на графике); объясняется это тем, что ИК лучи проникают вглубь материала нагревают его, образуется градиент температур между материалом сушки и окружающим воздухом, что создаёт хорошие условия для движения влаги к поверхностному слою; при снижении влажности материала, скорость уменьшается.

В дальнейшем скорость протекания процесса в двух описываемых способах выравнивается, а затем скорость сушки при конвективном способе превышает эту величину для ИК сушки; объясняется это тем, что переместившаяся к поверхностному слою влага испаряется быстрее, в случае более интенсивного уноса влаги тепловым агентом (его более высокой влагопоглощающей способности), что имеет место при конвективном способе.

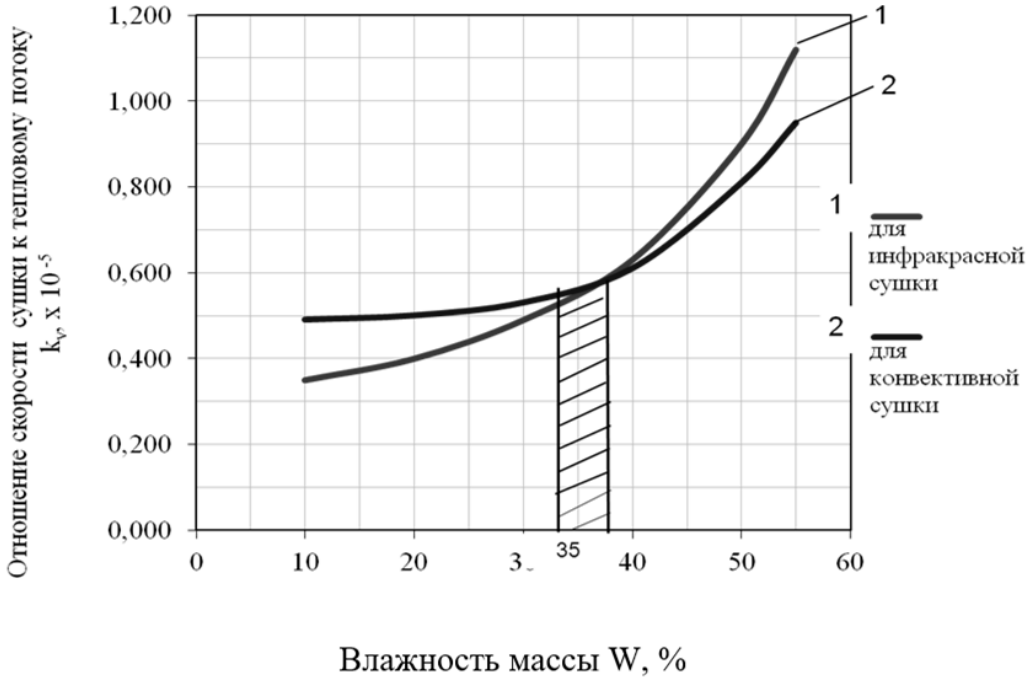


Рисунок 4.49. Закономерность динамики процесса для ИК и конвективной сушки

4.2. Сушка растительного сырья в неподвижном слое в СВЧ поле

В разделе решалась задача комплексного исследования кинетики и энергетики сушки растительного сырья в СВЧ поле. Интерес представлял анализ и сравнение результатов с данными по сушке в ИК поле. Экспериментальный стенд представлен на (рисунок 3.1). Отличие состояло только в том, что в камере работал генератор СВЧ энергии – магнетрон. Методики исследования, продукты, их размеры и исходные характеристики, параметры удельной мощности поля выдерживались такими же, как и при сушке в ИК поле. Это упрощало задачу корректного сравнения двух технологий сушки.

4.2.1. Кинетика сушки овощей и фруктов в СВЧ поле

В качестве сырья использовались лук, морковь и яблоки. Форма продукта – слайсы и соломка. Последовательность проведения опытов аналогична экспериментам по сушке в ИК поле.

Влияние толщины слоя на кинетику сушки моркови в форме слайсов.

При удельной мощности СВЧ излучения в 6 кВт/м^2, проведены исследования (рисунок 4.50) сушки слоя слайсов моркови. Радиус слайсов 0,025 м, и толщина – 3, 5, и 10 мм. Загрузки кассеты с продуктом составляла 50 г.

Видно (рисунок 4.50), что, по сравнению с сушкой в ИК поле (рисунок 4.11), увеличение толщины слоя не оказывает существенного влияния не процесс сушки моркови. Практически не влияет толщина слоя и на продолжительность процесса сушки. Снижение влажности продукта (рисунок 4.51) с 84 % до 15 % занимает 1150 с.

Энергетические затраты на процесс сушки до необходимой влажности 11–15 % (рисунок 4.52) составляют в среднем 280 кДж.

Скорости сушки (рисунок 4.53) в зависимости от толщины слоя моркови изменялась в диапазоне 2,01–2,37 г/мин удаленной влаги. При постоянной скорости сушки протекает в среднем до влажности 20–25 %.

Температуры продукта (рисунок 4.54) не превышали 100 °С. Увеличение толщины слоя практически не влияет на рост температур при СВЧ виде подвода энергии.

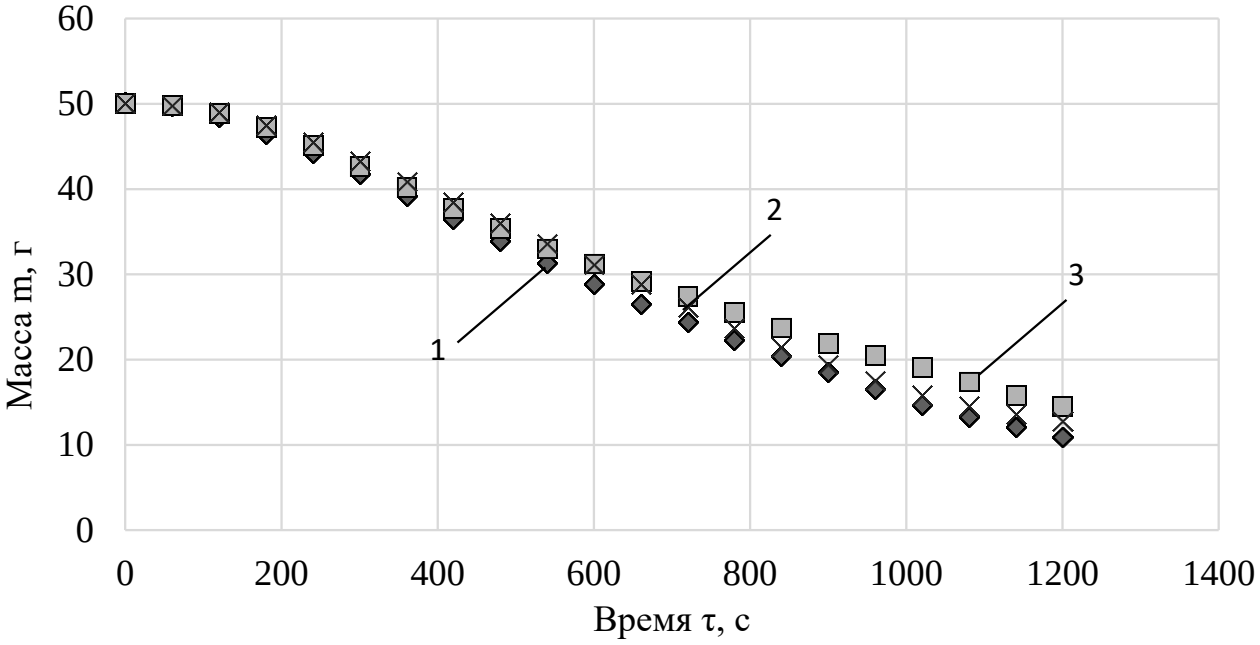


Рисунок 4.50. Влияние толщины слоя на кинетику сушки слайсов моркови, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 10 мм

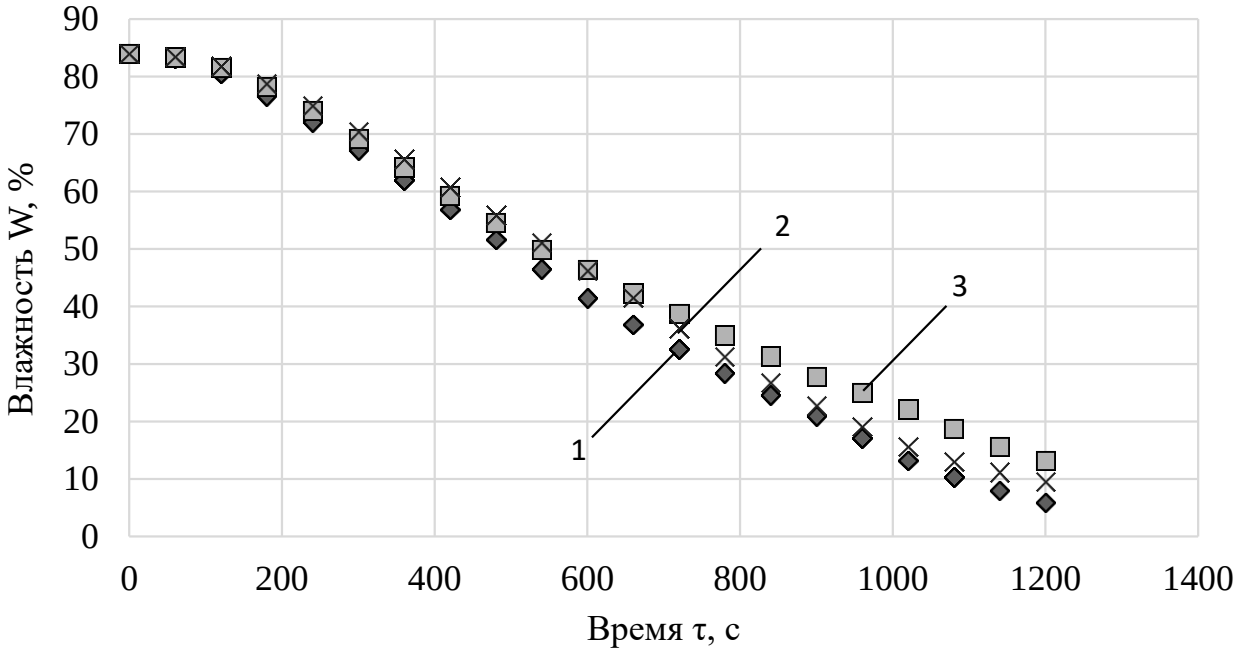


Рисунок 4.51. Изменение влажности слайсов моркови, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 10 мм

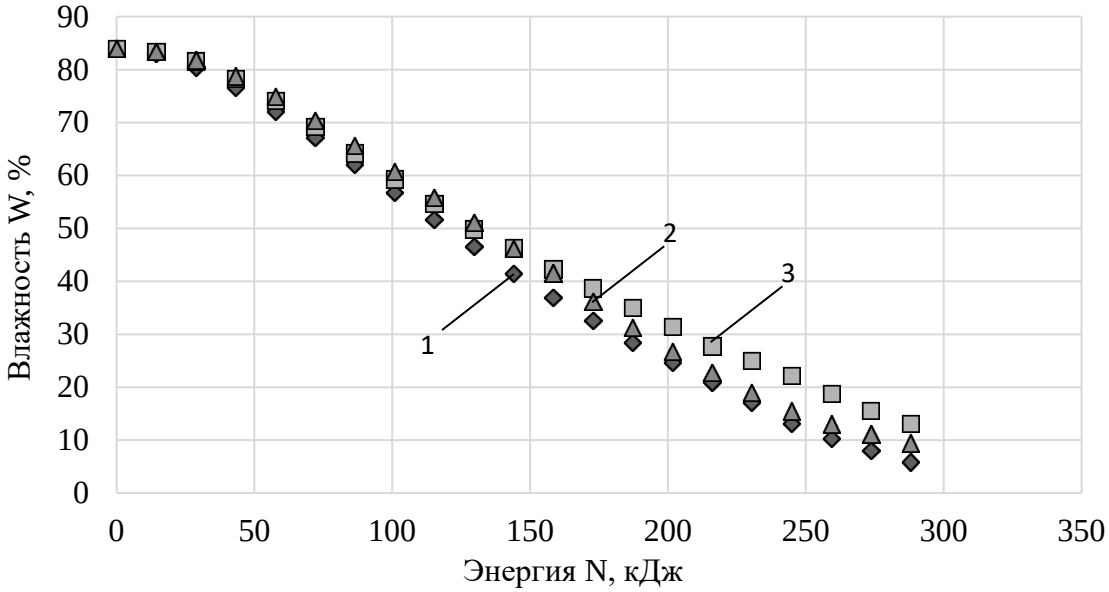


Рисунок 4.52. Влияние толщины слоя на энергетические затраты процесса сушки слайсов моркови, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 10 мм

Дальнейшие исследования сушки овощей и фруктов проводились при толщине слоя в 3 мм и удельной мощности СВЧ поля в 6 кВт/м^2.

Влияние толщины слоя на кинетику сушки слайсов овощей и фруктов. Исследовались (рисунок 4.55) слайсы моркови, яблока и лука толщиной 3 мм, и радиусом 0,025 м. Загрузки кассеты с продуктом составляла 50 г.

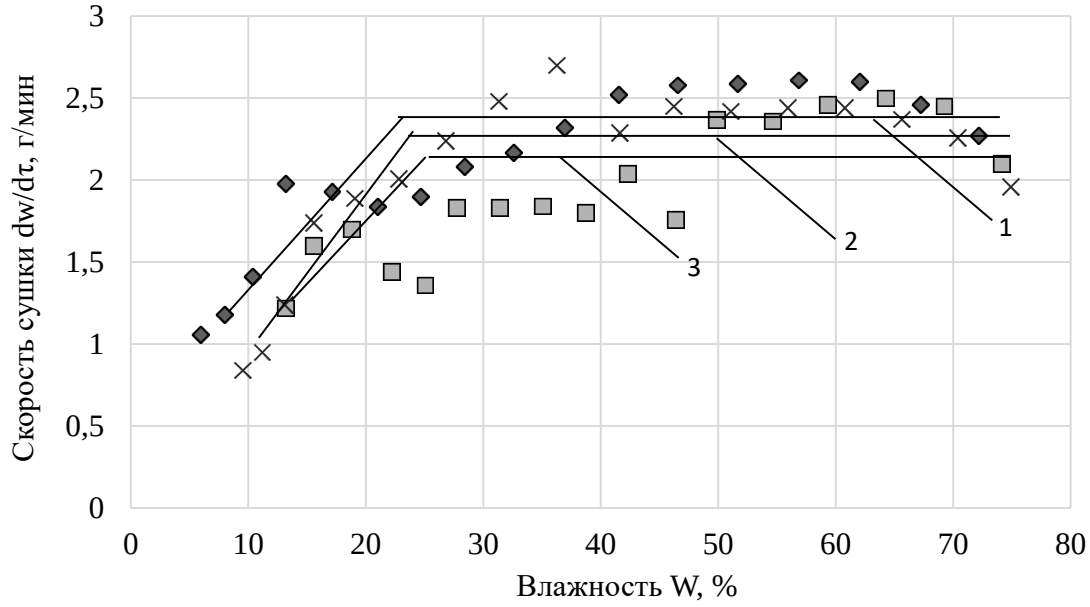


Рисунок 4.53. Влияние толщины слоя на скорости сушки слайсов моркови, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 10 мм

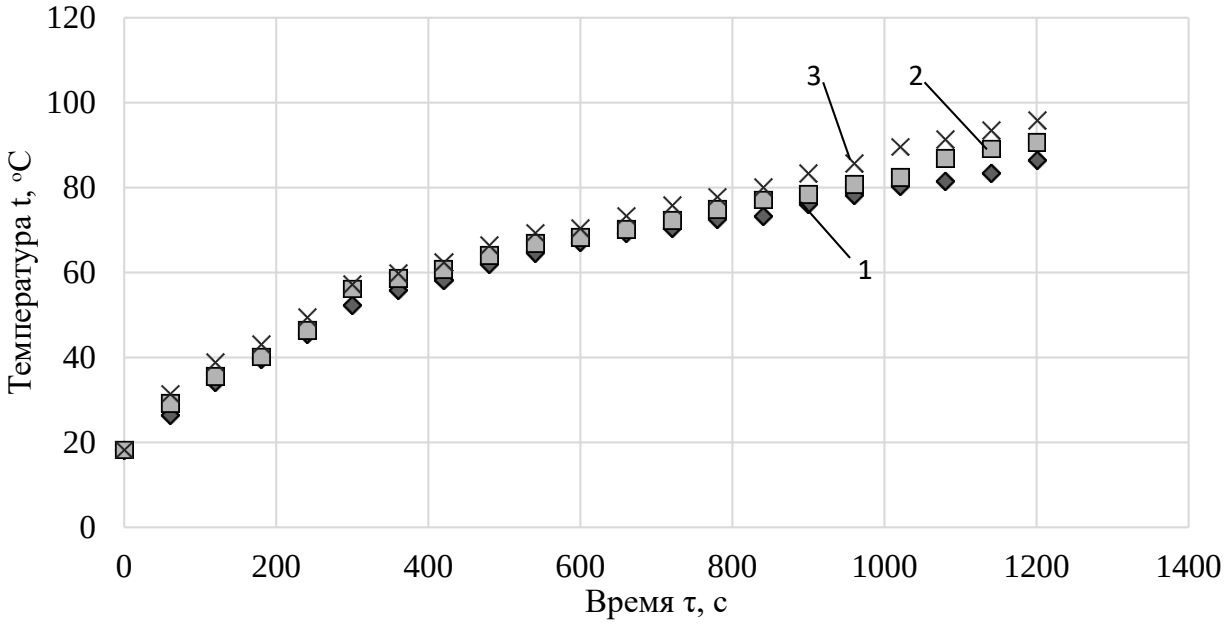


Рисунок 4.54. Влияние толщины слоя на термограммы слайсов моркови, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 10 мм

Оказалось (рисунок 4.56), что вид продукта оказывает слабое влияние на кинетику сушки. Время сушки при изменении влажности продукта с 84 % до 15 % занимает 1000–1180 с (рисунок 4.56).

Энергетические затраты на процесс сушки до необходимой влажности 11–15 % (рисунок 4.57) составляют 230–280 кДж.

Скорости сушки (рисунок 4.58) овощей и фруктов изменялись в диапазоне 1,95–2,23 г/мин удаленной влаги. Постоянная скорость сушки сохраняется в среднем до влажности 23–28 %.

Температуры моркови (рисунок 4.59) не превышали 90 °С. А для яблок и лука – 60 °С.

Дальнейшие исследования проведены с продуктом в форме соломки.

Влияние толщины слоя на кинетику сушки соломки моркови. В условиях СВЧ поля с удельной мощностью излучения в 6 кВт/м^2 проведены исследования кинетики и энергетики сушки моркови, которая шинковалась соломкой длинной – 0,02 м, шириной – 0,003 м и высотой – 0,001 м. Толщина слоя варьировалась (Рисунок4.60). Загрузки кассеты с продуктом составляла 50 г.

Так же, как и в опытах со слайсами, толщина слоя не оказывает существенного влияния на процесс сушки моркови (рисунок 4.60). Продолжительность сушки при изменении влажности продукта (рисунок 4.61) с 84 % до 15 % занимает 1150 с.

Энергетические затраты на процесс сушки до необходимой влажности 11–15 % (рисунок 4.62) составляют в среднем 270 кДж.

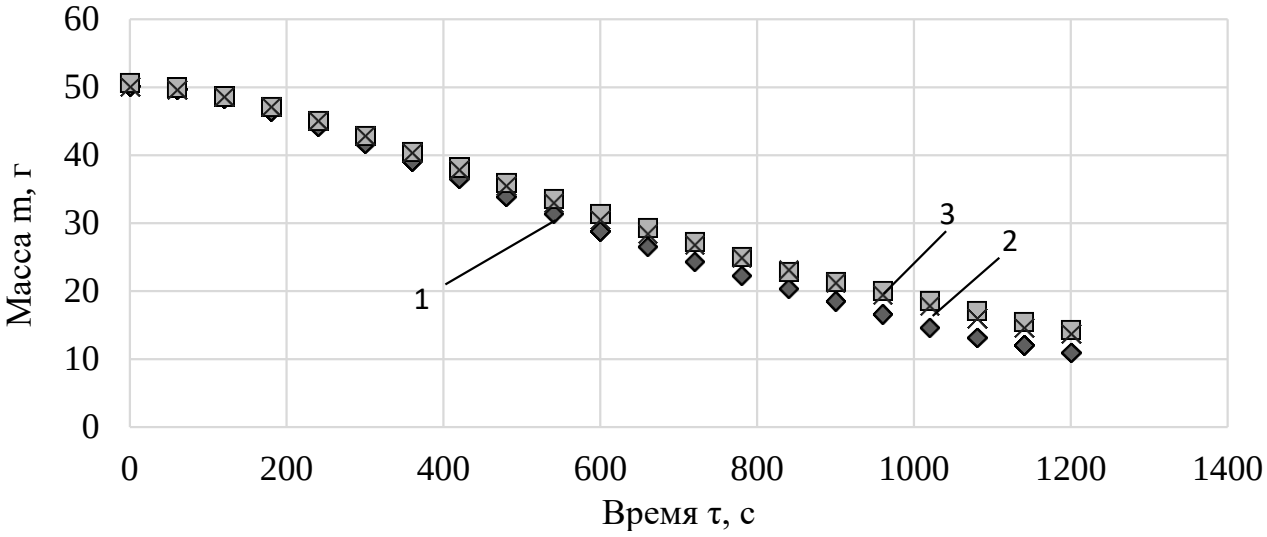


Рисунок 4.55. Кинетика процесса сушки слайсов овощей и фруктов, где 1 – морковь; 2 – яблоко; 3 – лук

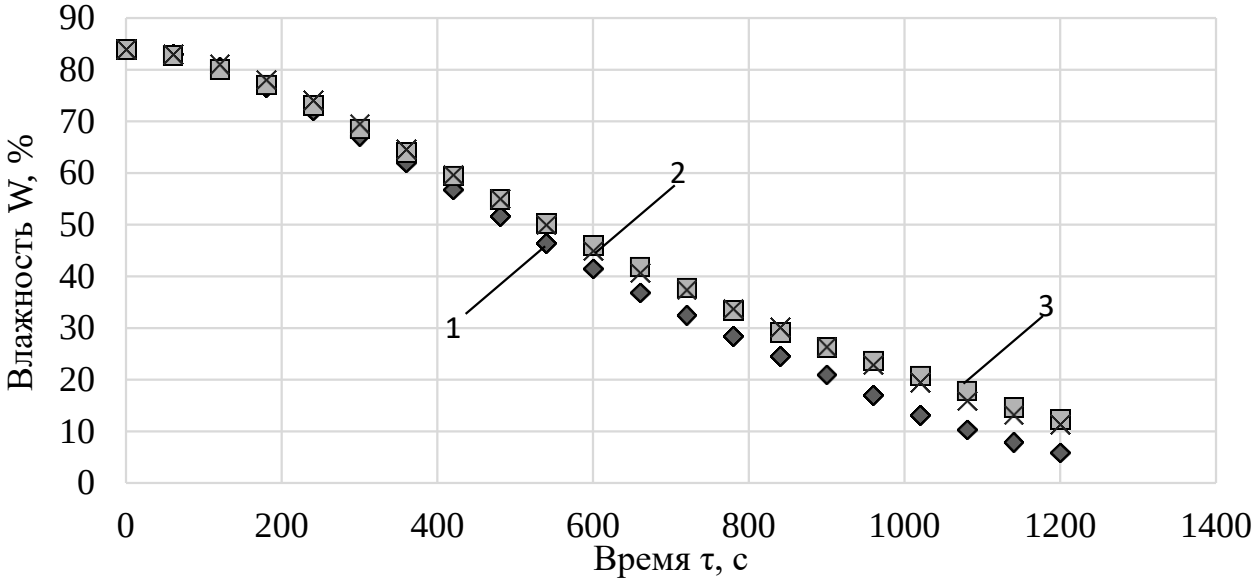


Рисунок 4.56. Кинетика сушки слайсов овощей и фруктов в СВЧ поле, где 1 – морковь; 2 – яблоко; 3 – лук

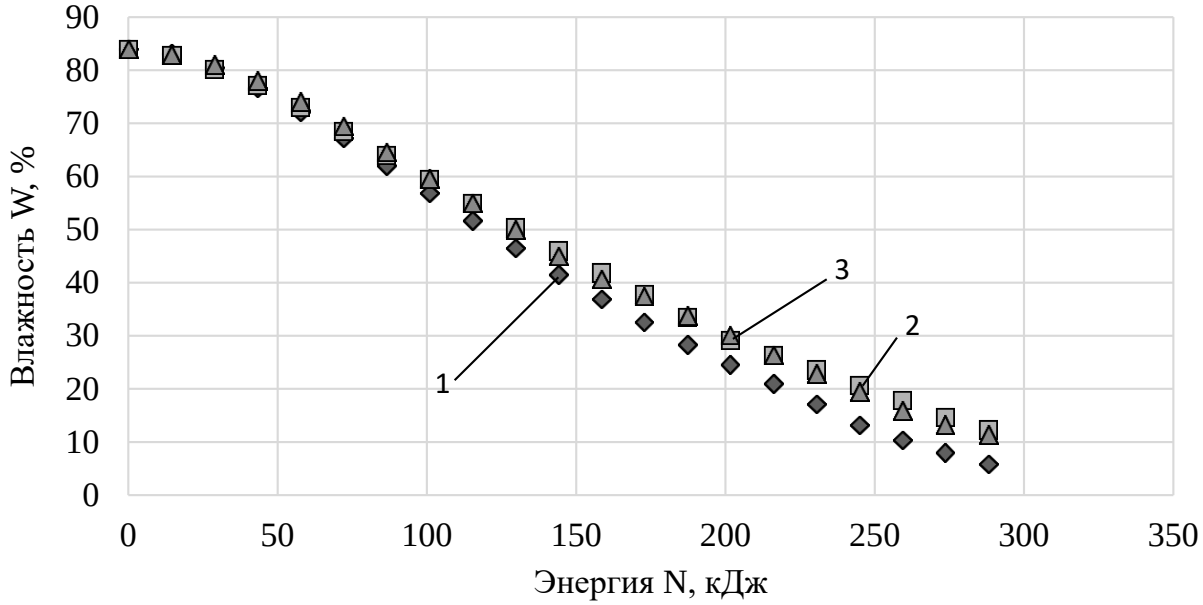


Рисунок 4.57. Энергетические затраты процесса сушки слайсов овощей и фруктов в СВЧ поле, где 1 – морковь; 2 – яблоко; 3 – лук

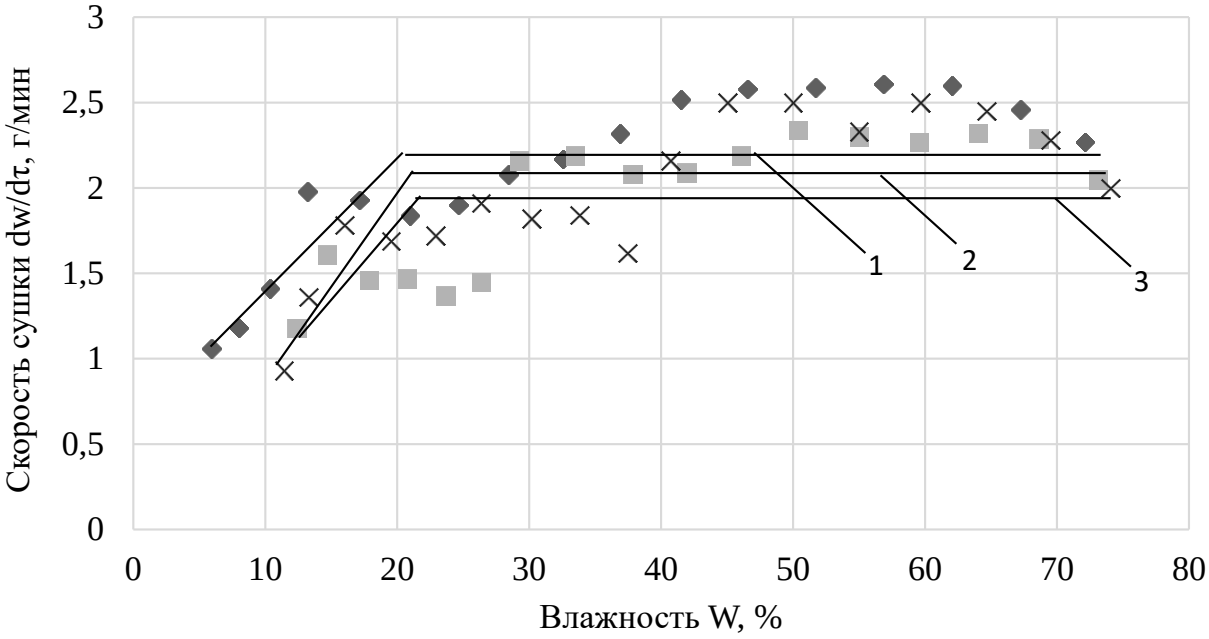


Рисунок 4.58. Линия скорости сушки слайсов овощей и фруктов, где 1 – морковь; 2 – яблоко; 3 – лук

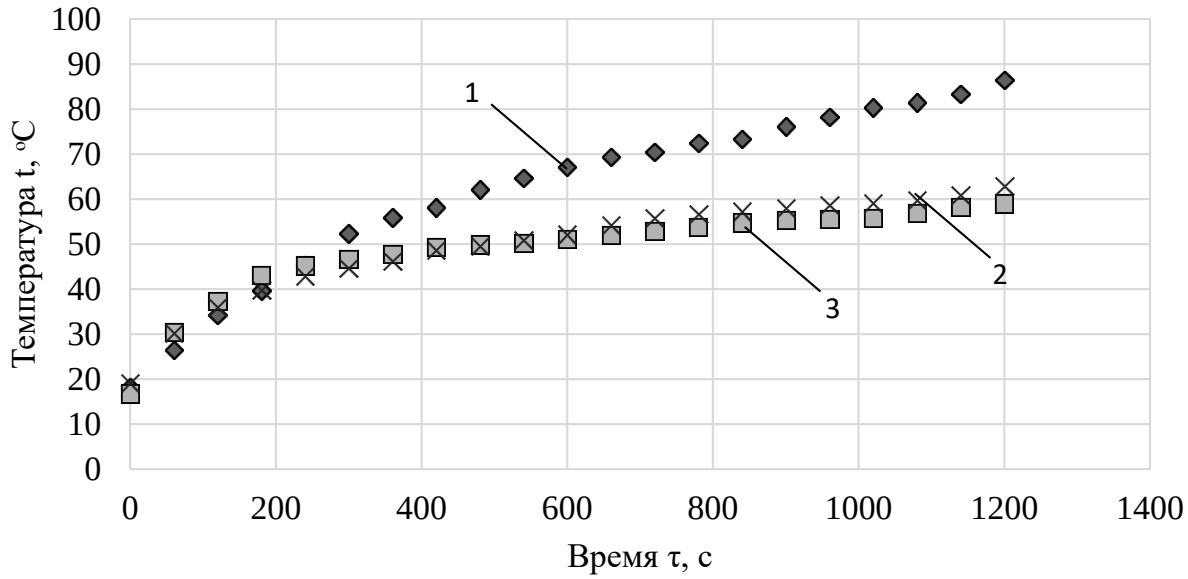


Рисунок 4.59. Термограммы слайсов овощей и фруктов,
где 1 – морковь; 2 – яблоко; 3 – лук

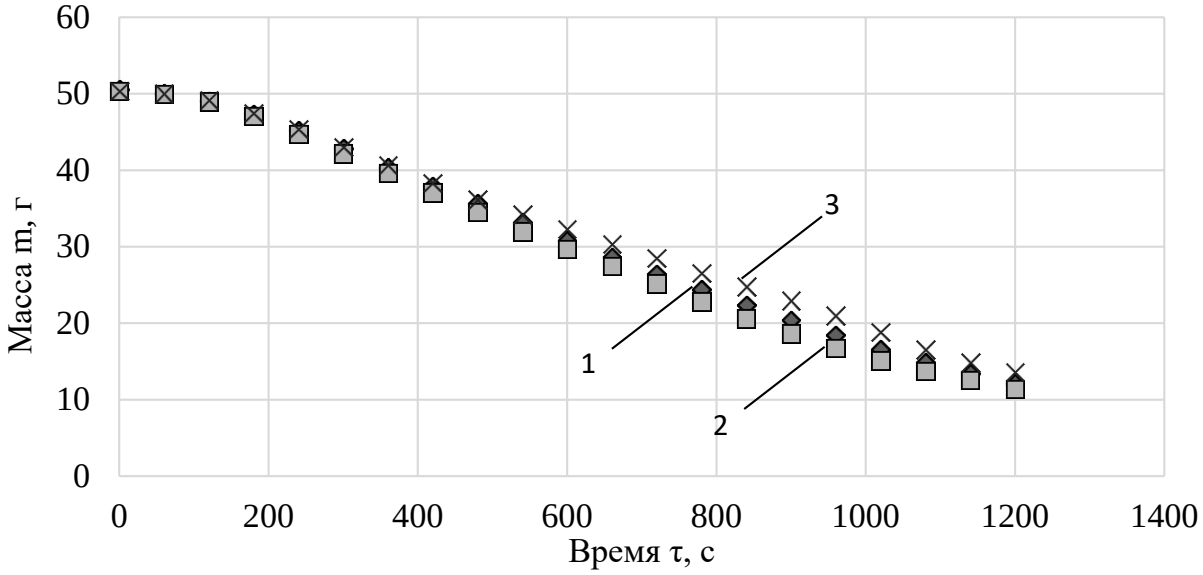


Рисунок 4.60. Влияние толщины слоя на кинетику процесса сушки соломки моркови в СВЧ поле, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 10 мм.

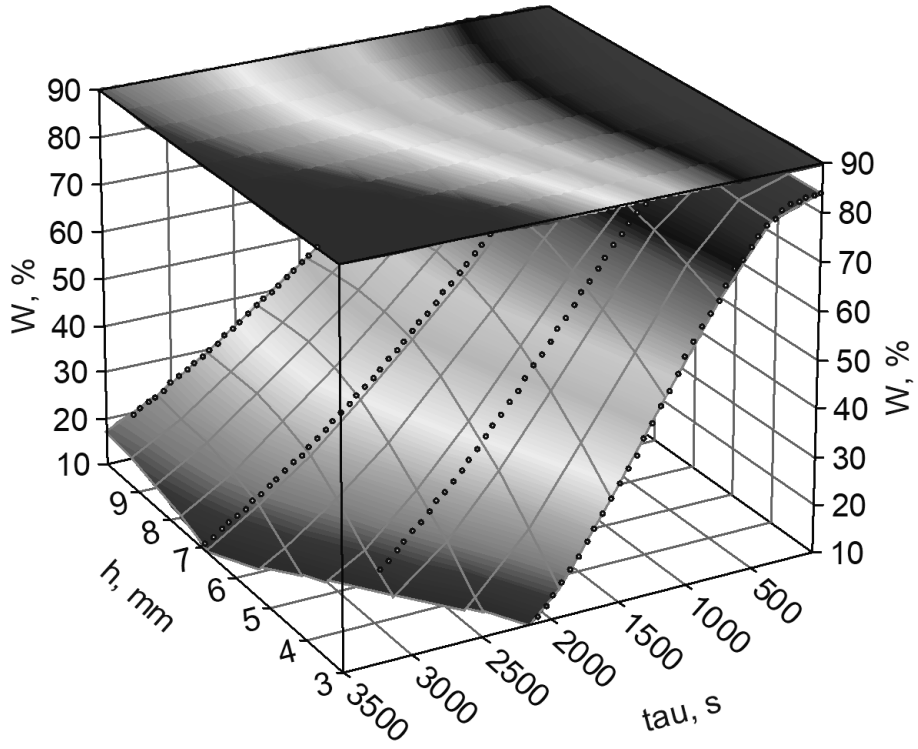


Рисунок 4.61. Влияние толщины слоя на кинетику сушки соломки моркови

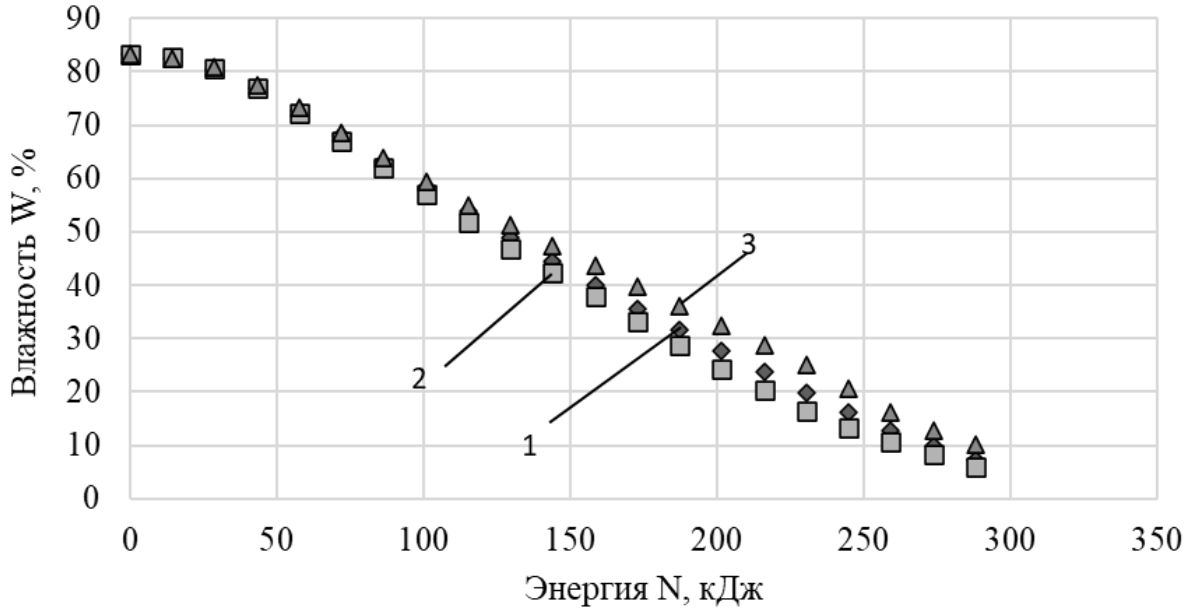


Рисунок 4.62. Влияние толщины слоя на энергетические затраты процесса сушки соломки моркови в СВЧ поле, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 10 мм

Скорости сушки соломки моркови (рисунок 4.63) изменялись в диапазоне 1,98–2,41 г/мин удаленной влаги. Постоянная скорость сушки сохраняется в среднем до влажности 20 %.

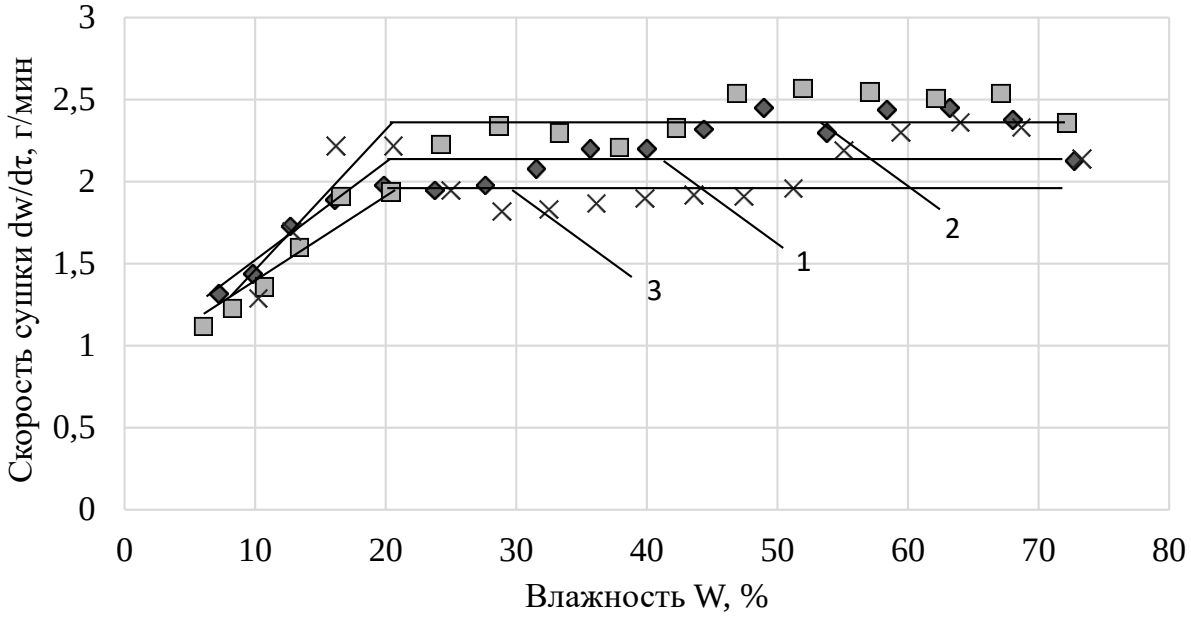


Рисунок 4.63. Влияние толщины слоя на скорости сушки соломки моркови, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 10 мм

Влияние толщины слоя на температуру (рисунок 4.64) моркови не столь значимо как при использовании ИК излучения. Рост температур при увеличении толщины слоя не менялся и не превышал 85 °С.

На следующем этапе проведены исследования влияние толщины слоя на кинетику процесса сушки соломки овощей и фруктов при использовании СВЧ энергии.

Кинетика сушки овощей и фруктов в форме соломки. В условиях СВЧ поля с удельной мощностью излучения в 6 кВт/м^2, проведены исследования процесса сушки моркови, яблок и лука, которые шинковались соломкой длинной – 0,02 м, шириной – 0,003 м и высотой – 0,001 м. Загрузка кассеты с продуктом составляла 50 г.

Получена зависимость изменения массы продукта во времени (рисунок 4.65). Вид продукта не оказывает заметного влияния на кинетику сушки. В зависимости от вида продукта при изменении влажности от 84 % до 15 % (рисунок 4.66), продолжительность процесса составляла от 1050 до 1280 с.

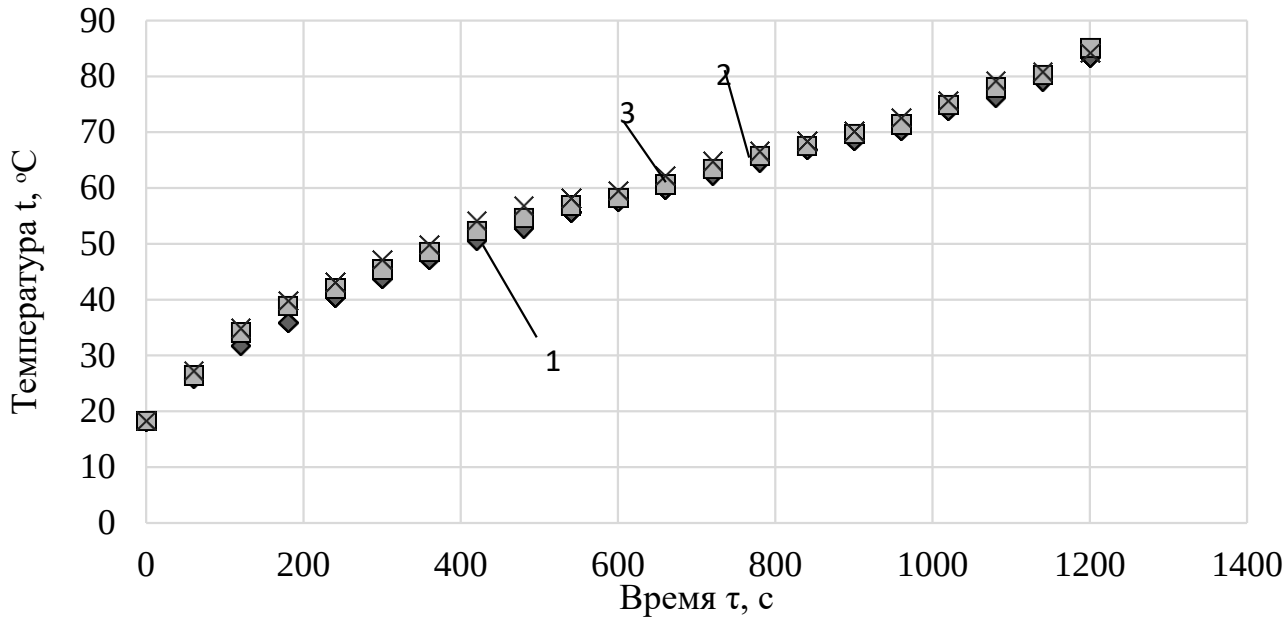


Рисунок 4.64. Влияние толщины слоя на термограммы соломки моркови, где 1 – h = 3 мм; 2 – h = 5 мм; 3 – h = 10 мм

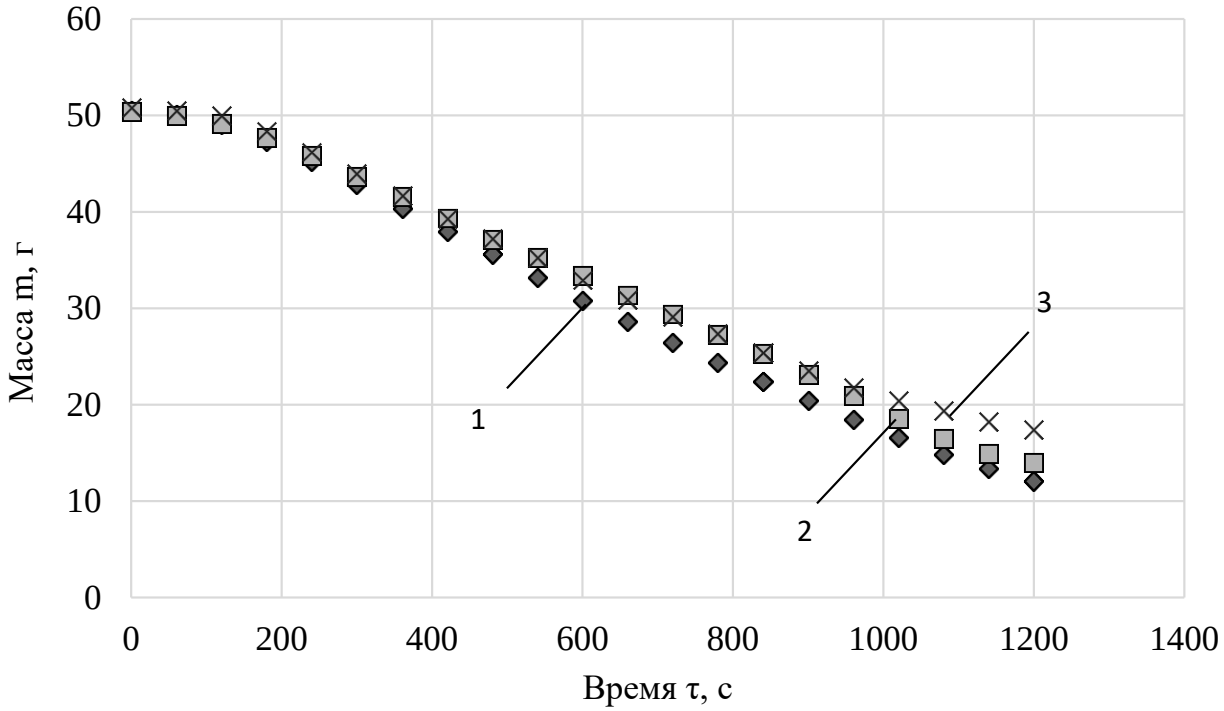


Рисунок 4.65. Кинетика процесса сушки соломки овощей и фруктов, где 1 – морковь; 2 – яблоко; 3 – лук

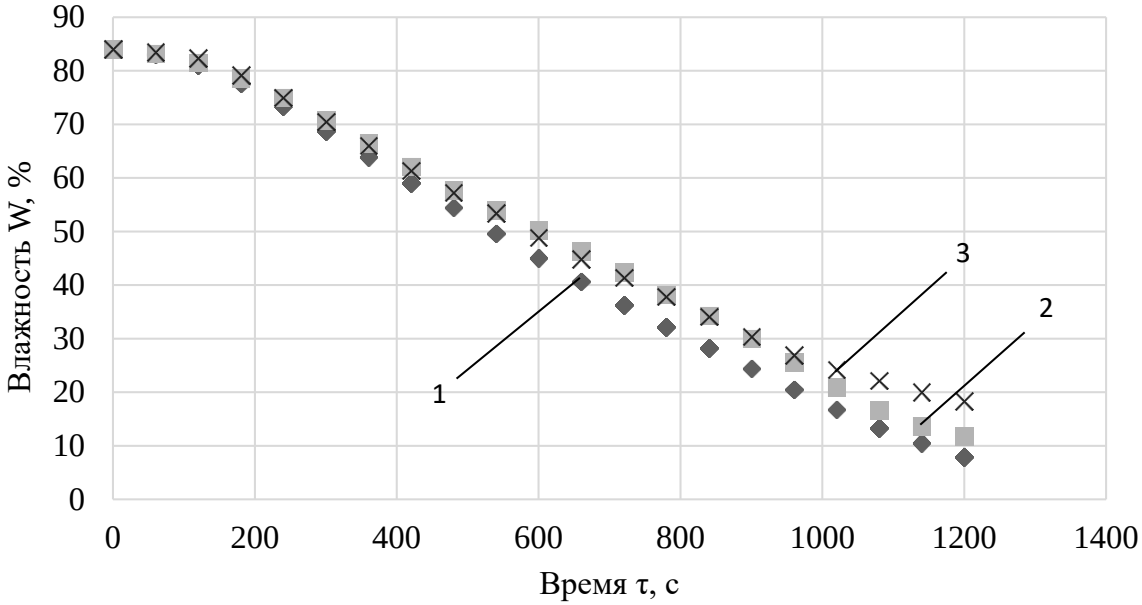


Рисунок 4.66. Кинетика сушки соломки овощей и фруктов в СВЧ поле, где 1 – морковь; 2 – яблоко; 3 – лук

Энергетические затраты на процесс сушки до необходимой влажности 11–15 % (рисунок 4.67) составляют 260–280 кДж.

Скорости сушки (рисунок 4.68) овощей и фруктов изменялась в диапазоне 1,91–2,23 г/мин удаленной влаги. Постоянная скорость сушки сохраняется в среднем до влажности 23–28 %.

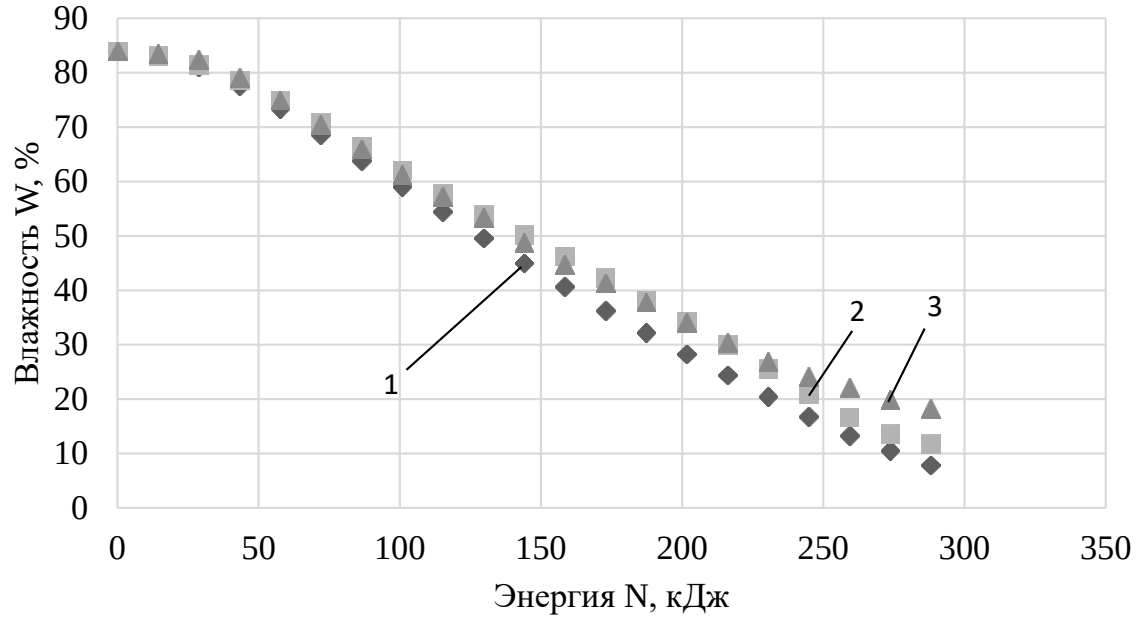


Рисунок 4.67. Энергетические затраты процесса сушки соломки овощей и фруктов в СВЧ поле, где 1 – морковь; 2 – яблоко; 3 – лук

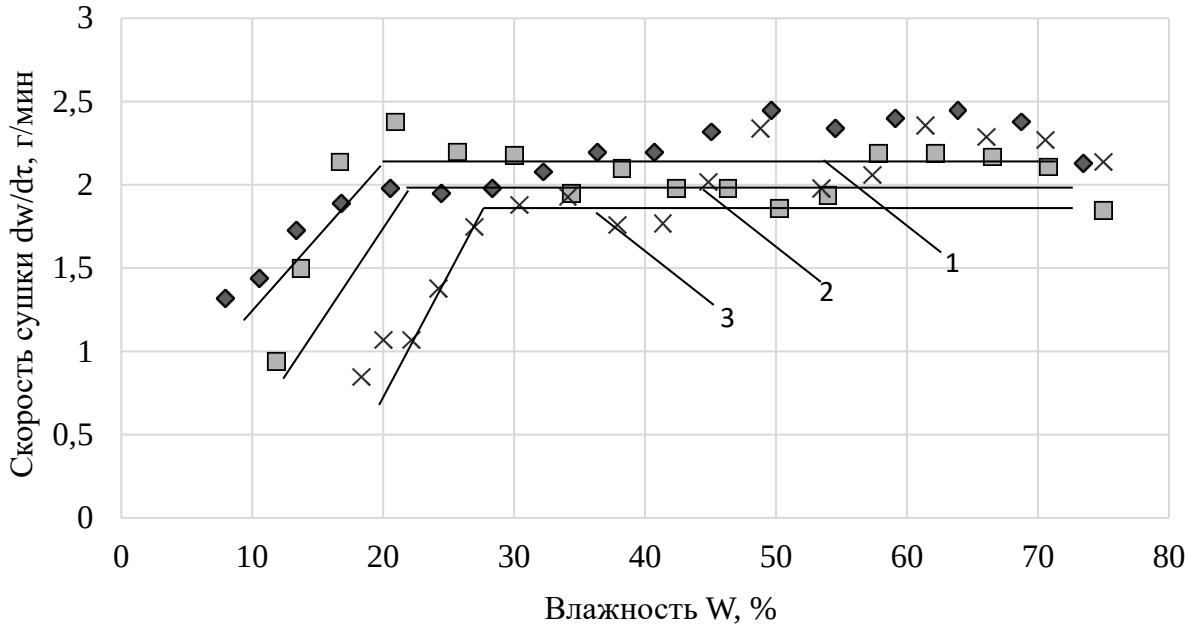


Рисунок 4.68. Линия скорости сушки соломки овощей и фруктов,
где 1 – морковь; 2 – яблоко; 3 – лук

Температуры продукта в опытах (рисунок 4.69) не превышали 84^0С для моркови и 62^0С для яблок и лука.

Проведем анализ полученной базы экспериментальных данных.

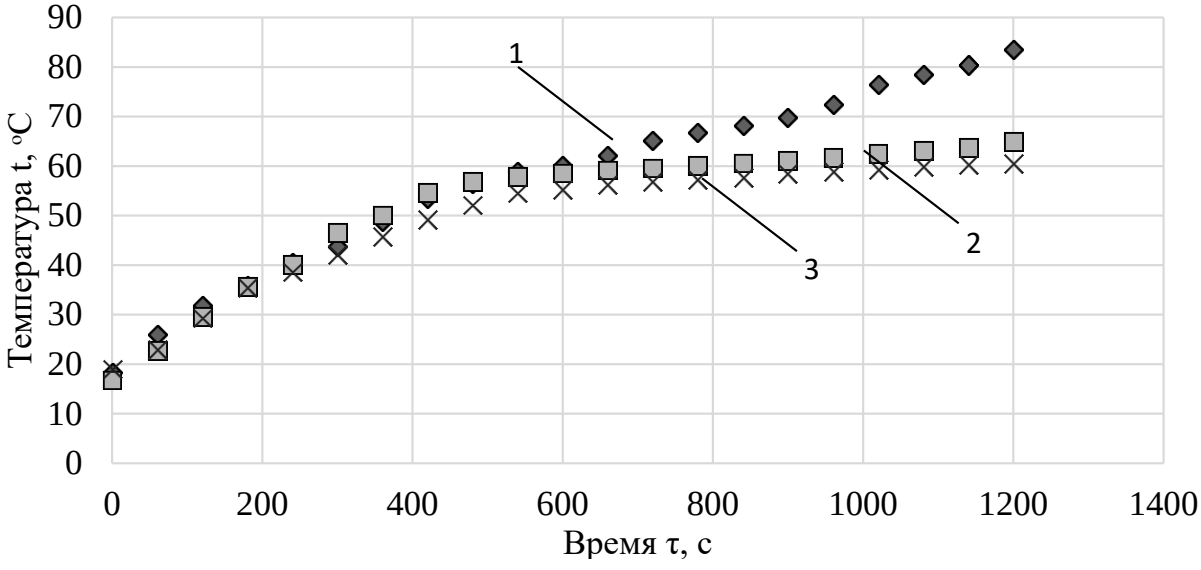


Рисунок 4.69. Термограммы соломки овощей и фруктов,
где 1 – морковь; 2 – яблоко; 3 – лук

4.2.2. Анализ результатов исследований сушки в СВЧ поле

База экспериментальных данных сведена в (таблицы 4.12–4.15).

Таблица 4.12. Диапазон экспериментального моделирования по сушке слайсов моркови

№	ΔG, г	$\Delta\tau$, с	N, Вт	q, кВт/м^2	a, м	b, м	h, м
1	36	910	240	6	0,11	0,11	0,003
2	36	980	240	6	0,1	0,1	0,005
3	36	1100	240	6	0,095	0,09	0,01

Таблица 4.13. Диапазон экспериментального моделирования по сушке соломки моркови

№	ΔG, г	$\Delta\tau$, с	N, Вт	q, кВт/м^2	a, м	b, м	h, м
1	35	920	240	6	0,11	0,11	0,003
2	35	950	240	6	0,1	0,1	0,005
3	35	1300	240	6	0,095	0,09	0,01

Результаты расчетов по методике, которая использована в анализах процесса сушки в ИК поле, предоставлены в таблицах 4.16–4.19.

Данные таблиц позволили вывести обобщенную модель процесса сушки в форме критериальных уравнений. Константы критериальных моделей приведены в таблице 4.20.

Таблица 4.14. Диапазон экспериментального моделирования по сушке слайсов овощей и фруктов

№	ΔG, г	$\Delta\tau$, с	N, Вт	q, кВт/м^2	a, м	b, м	h, м
1	36	920	240	6	0,11	0,11	0,003
2	36	960	240	6	0,11	0,11	0,003
3	36	970	240	6	0,11	0,11	0,003

Таблица 4.15. Диапазон экспериментального моделирования по сушке соломки овощей и фруктов

№	ΔG, г	$\Delta\tau$, с	N, Вт	q, кВт/м^2	a, м	b, м	h, м
1	36	920	240	6	0,11	0,11	0,003
2	36	980	240	6	0,11	0,11	0,003
3	36	1030	240	6	0,11	0,11	0,003

Таблица 4.16. Обработка базы экспериментальных данных по сушке слайсов моркови

№	β, м/с	Sh	Bu	H	Ff
1	0,000003269	0,000454	2,53	0,003	0,008617634
2	0,000003673	0,000850	2,73	0,005	0,010427337
3	0,000003828	0,001772	3,06	0,01	0,012195716

Таблица 4.17. Обработка базы экспериментальных данных по сушке соломки моркови

№	β, м/с	Sh	Bu	H	Ff
1	0,000003088	0,000429	2,68	0,003	0,205845976
2	0,000003542	0,000820	2,83	0,005	0,205845976
3	0,000003899	0,001805	3,00	0,01	0,205845976

Таблица 4.18. Обработка базы экспериментальных данных по сушке слайсов овощей и фруктов

№	β, м/с	Sh	Bu	H	Ff
1	0,000003234	0,000449	2,56	0,003	0,212532
2	0,000003099	0,000430	2,67	0,003	0,212532
3	0,000003067	0,000426	2,70	0,003	0,212532

Таблица 4.19. Обработка базы экспериментальных данных по сушке соломки овощей и фруктов

№	β, м/с	Sh	Bu	H	Ff
1	0,000003234	0,000449	2,56	0,003	0,205845976
2	0,000003036	0,000422	2,73	0,003	0,205845976
3	0,000002889	0,000401	2,86	0,003	0,205845976

Таблица 4.20. Коэффициенты обобщающей модели процесса сушки

Продукт	Форма	n	m	k	A
Морковь	Слайсы	7,18	0,51	-0,0047	$7{,}1*10^{-6}$
	Соломка	3,49	0,86	0	$2{,}1*10^{-3}$
Яблоко	Слайсы	7,18	0,51	-0,0047	$7{,}1*10^{-6}$
	Соломка	3,49	0,86	0	$2{,}1*10^{-3}$
Лук	Слайсы	7,18	0,51	-0,0047	$7{,}1*10^{-6}$
	Соломка	3,49	0,86	0	$2{,}1*10^{-3}$

Анализ результатов обобщения позволил сделать два вывода.

1. Константы моделей A разные для слайсов и соломки, и одинаковые для всех исследованных продуктов.

2. Фактор формы имеет показатель степени близкий к нулю, поэтому может быть исключен из критериальных моделей.

Таким образом, для расчета интенсивности сушки в условиях СВЧ поля предлагается два уравнения.

Для сушки слайсов:

$$Sh = 7{,}1 \cdot 10^{-6} \cdot Bu^{7{,}18} \cdot H^{0{,}51} \qquad (4.32)$$

Для сушки соломки:

$$Sh = 2{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot Bu^{3{,}49} \cdot H^{0{,}86} \qquad (4.33)$$

Полученные модели проверены на адекватность. Сравнивались значения чисел Шервуда, рассчитанные по (4.32) и (4.33) с экспериментальными значениями (рисунок 4.70).

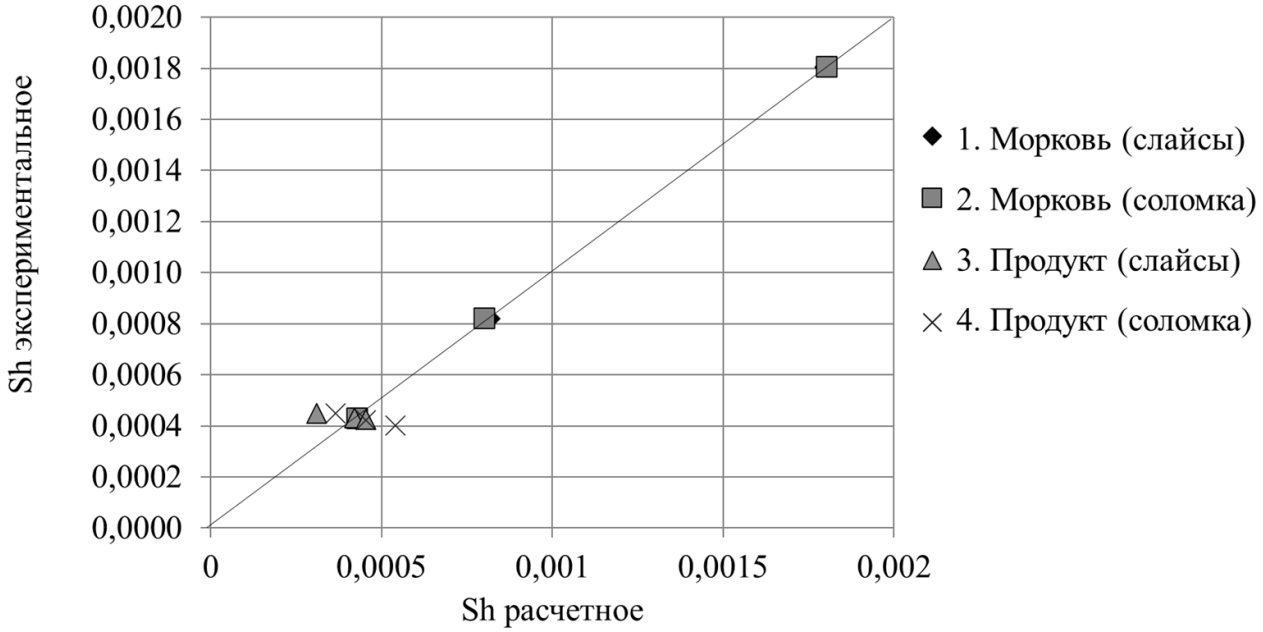


Рисунок 4.70. Сравнение данных расчетных и экспериментальных значений чисел Шервуда

Оценка адекватности показывает, что предложенные модели (4.32) и (4.33) с погрешностью не более 10 % описывают кинетику процесса сушки растительного сырья в форме слайсов и соломки. Модели учитывают влияние на интенсивность сушки ключевых факторов: мощности СВЧ поля и толщины слоя продукта. Определяющее влияние оказывает мощность излучения, которая учитывается в моделях числом энергетического действия (числом Bu).

На основе предложенных моделей планируется разработка инженерной методики расчета и оптимизации инновационной сушильной техники с электромагнитными источниками энергии.

4.3. Результаты влияния вида электромагнитного поля на процесс сушки

Для анализа из данных экспериментов сделана выборка для трех продуктов (лук, морковь, яблоки), которые сушились в форме слайсов (рисунок 4.71). При этом, толщина слоя была одинаковой и удельная мощность излучения равнялась 6 кВт/м^2. Разными были источники электромагнитной энергии (ИК и СВЧ). Сводка таких

значений по кинетике сушки приведена в таблице 4.22, а по энергетике – в таблице 4.23.

Таблица 4.22. Сравнение кинетических характеристик сушки

№	Продукт	Скорость сушки, г/мин		Время процесса, с	
		ИК поле	СВЧ поле	ИК поле	СВЧ поле
1	Лук	0,8	1,8	720	300
2	Свекла	1,0	–	600	–
3	Морковь	1,1	2,5	540	260
4	Картофель	1,15	–	520	–
5	Яблоки	1,3	2,2	490	280
6	Тыква	1,5	–	480	–

Таблица 4.23. Сравнение энергетических показателей сушки

№	Продукт	Температура, °С		Затраты энергии, кДж	
		ИК поле	СВЧ поле	ИК поле	СВЧ поле
1	Лук	63	55	710	280
2	Свекла	80	–	690	–
3	Морковь	85	80	550	250
4	Картофель	95	–	510	–
5	Яблоки	82	60	480	270
6	Тыква	82	–	500	–

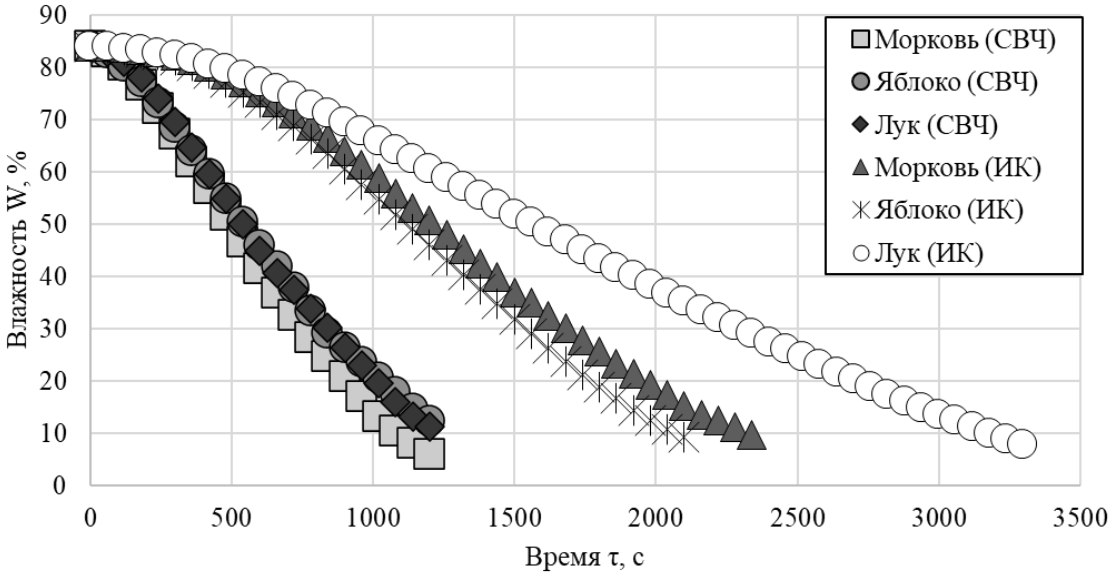


Рисунок 4.71. Кинетика сушки растительного сырья в форме слайсов

Выводы по рисунку 4.71 и таблицам 4.22, 4.23 можно сделать следующие.

1. СВЧ поле при одинаковом значении удельной мощности требует в 2 раза меньше времени на процесс и характеризуется в 2 раза большими значениями скорости сушки.

2. СВЧ поле при сушке до 11 % требует в 1,5–2 раза меньше затрат энергии на процесс, чем сушка в ИК поле, и характеризуется более низкими значениями температур сушки.

4.4. Стендовые исследования ленточной сушилки с комбинированным ИК и СВЧ энергоподводом

Исходя из поставленной задачи, в качестве объектов исследований были выбраны те же продукты, процесс сушки которых был исследован в разделе 4, а именно: яблоки, морковь, картофель. Все продукты также имели относительно одинаковую начальную влажность в 83–84 %. Для оценки влияния скорости движения продукта, значения входных параметров устанавливались таким образом, чтобы быть максимально близкими к параметрам, при которых проводились исследования сушки неподвижного слоя продукта [26].

Для возможности оперативной оценки скорости убыли влаги, продукт располагался на ленте в кассетах объемом 0,3 л., в которых размещалось до 50 г продукта. Для сравнения с экспериментальными данными, полученными для неподвижного слоя продукта, были проведены исследования сушки продукта в ИК поле, в СВЧ поле и при комбинированном энергоподводе. Диапазон параметров экспериментальных исследований приведен в таблице 4.24.

По результатам испытаний получили зависимости, аналогичные тем, которые были получены для сушки овощей и фруктов в неподвижном слое. Для сравнения представлены графики кинетики сушки слайсов моркови при толщине слоя 3 мм и скорости ленты 5 мм/с, при мощности излучателя 425, 300 и 170 Вт с соответствующей плотностью потока излучения в 22,5, 16, и 9 кВт/м^2 (рисунки 4.72

и 4.73), и графики кинетики сушки слайсов яблок при толщине слоя 3 мм и скорости ленты 5 мм при мощности излучателя 425 и 300 Вт с соответствующей плотностью потока излучения в 22,5 и 16 кВт/м^2 (рисунки 4.74 и 4.75).

Таблица 4.24. Диапазон параметров экспериментальных исследований

Вид продукта	Форма	Мощность N, кВт/м^2	Толщина слоя H, м	Скорость ленты ω, мм/с
Морковь	Слайсы	1,9–11,3	0,003–0,01	0–30
	Соломка	1,9–11,3	0,003–0,01	0–30
Яблоко	Слайсы	1,9–11,3	0,003–0,01	0–30
	Соломка	1,9–11,3	0,003–0,01	0–30
Свекла	Слайсы	1,9–11,3	0,003–0,01	0–30
Картофель	Соломка	1,9–11,3	0,003–0,01	0–30

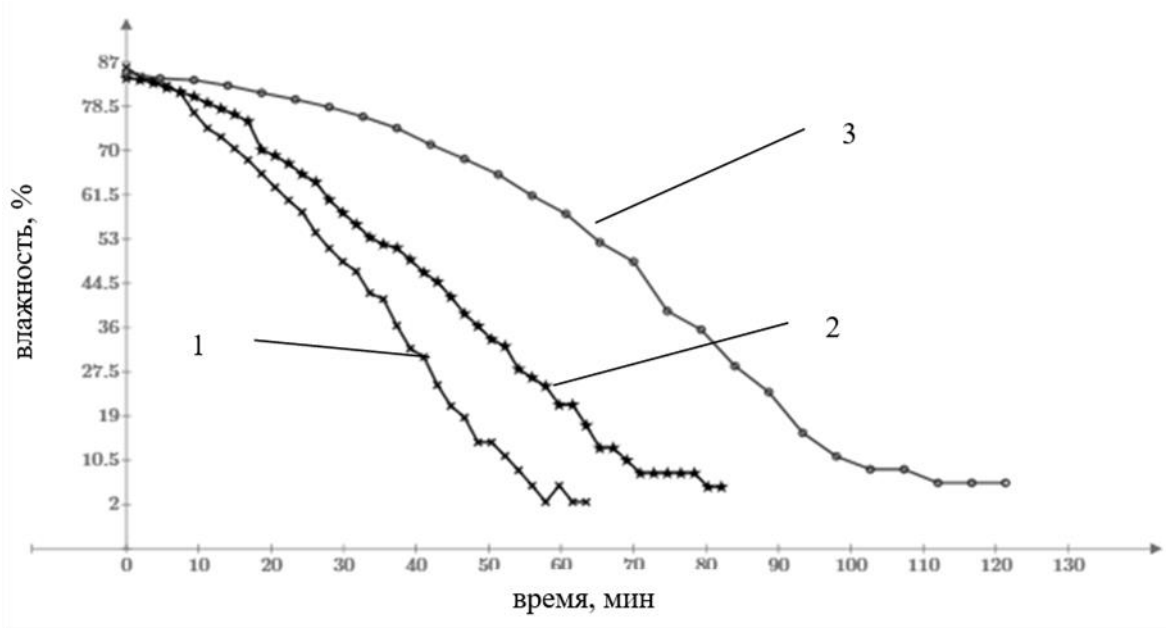


Рисунок 4.72. Кривые сушки слайсов моркови на ленте:
1 – Удельная мощность 22,5 кВт/м^2, 2 – Удельная мощность 16 кВт/м^2,
3 – Удельная мощность 9 кВт/м^2

При использовании ленточной сушилки для организации непрерывного процесса сушки определен и исследован параметр, который влияет на кинетику процесса сушки – это скорость ленты. Для определения влияния скорости ленты на

процесс сушки были проведены исследования по сушке слайсов моркови при удельной мощности 16 кВт/м^2 и толщине слоя 3 мм (рисунок 4.76–4.78).

При таких же параметрах определялось влияние скорости ленты на процесс сушки слайсов яблок (рисунок 4.79–4.81).

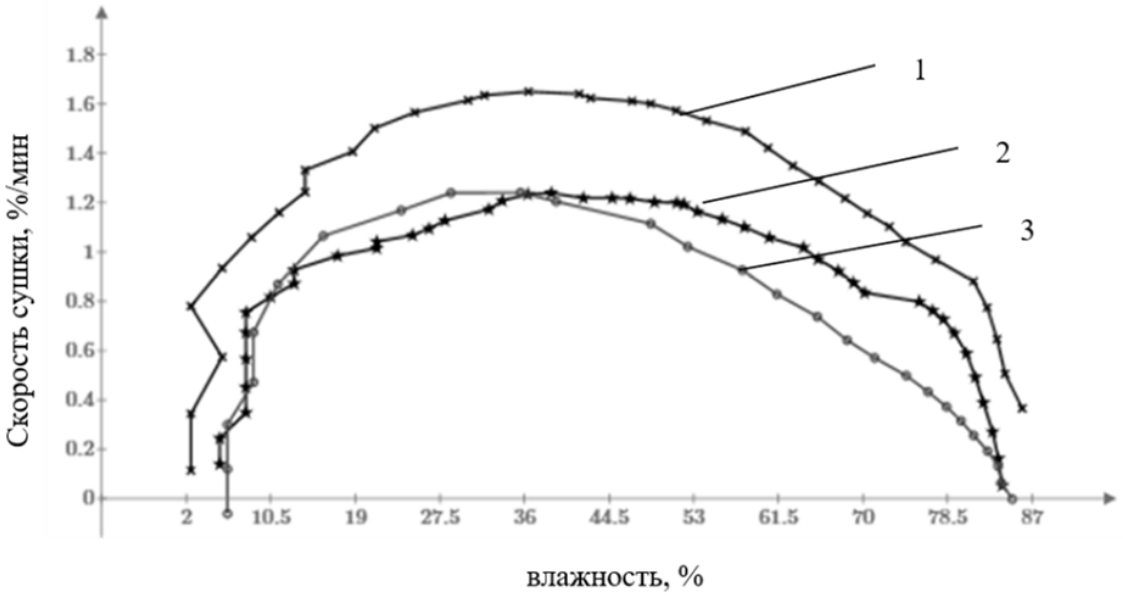


Рисунок 4.73. Кривые скорости сушки слайсов моркови на ленте:
1 – Удельная мощность 22,5 кВт/м^2, 2 – Удельная мощность 16 кВт/м^2,
3 – Удельная мощность 9 кВт/м^2

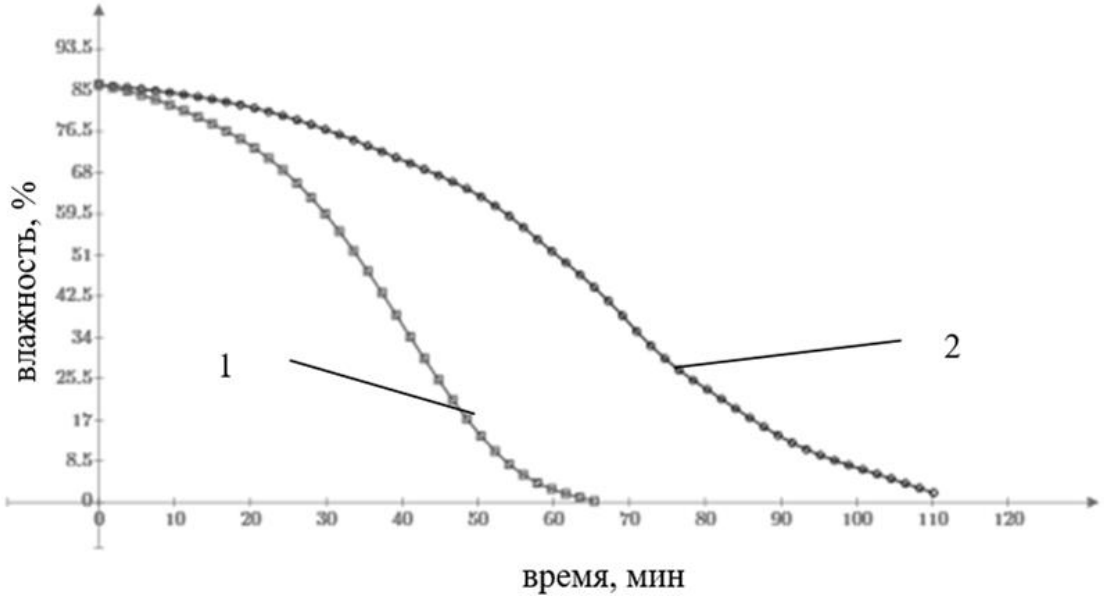


Рисунок 4.74. Кривые сушки слайсов яблок на ленте:
1 – Удельная мощность 22,5 кВт/м^2, 2 – Удельная мощность 16 кВт/м^2

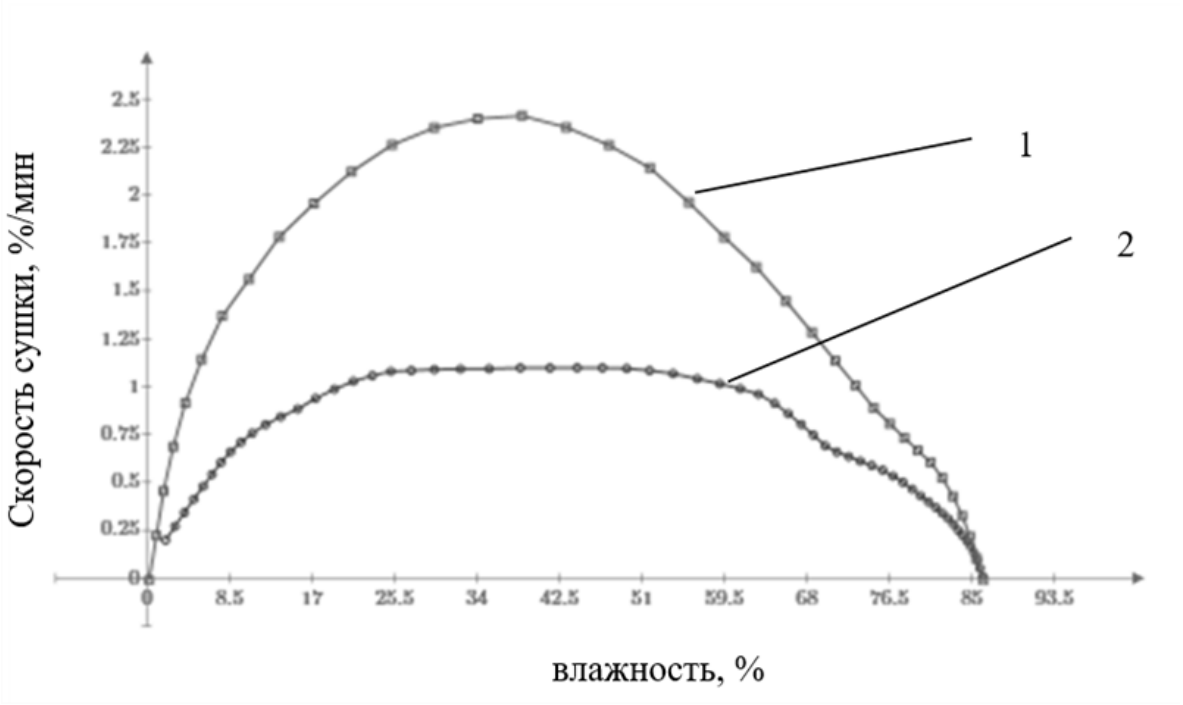


Рисунок 4.75. Кривые скорости сушки слайсов яблок на ленте:
1 – Удельная мощность 22,5 кВт/м^2, 2 – Удельная мощность 16 кВт/м^2

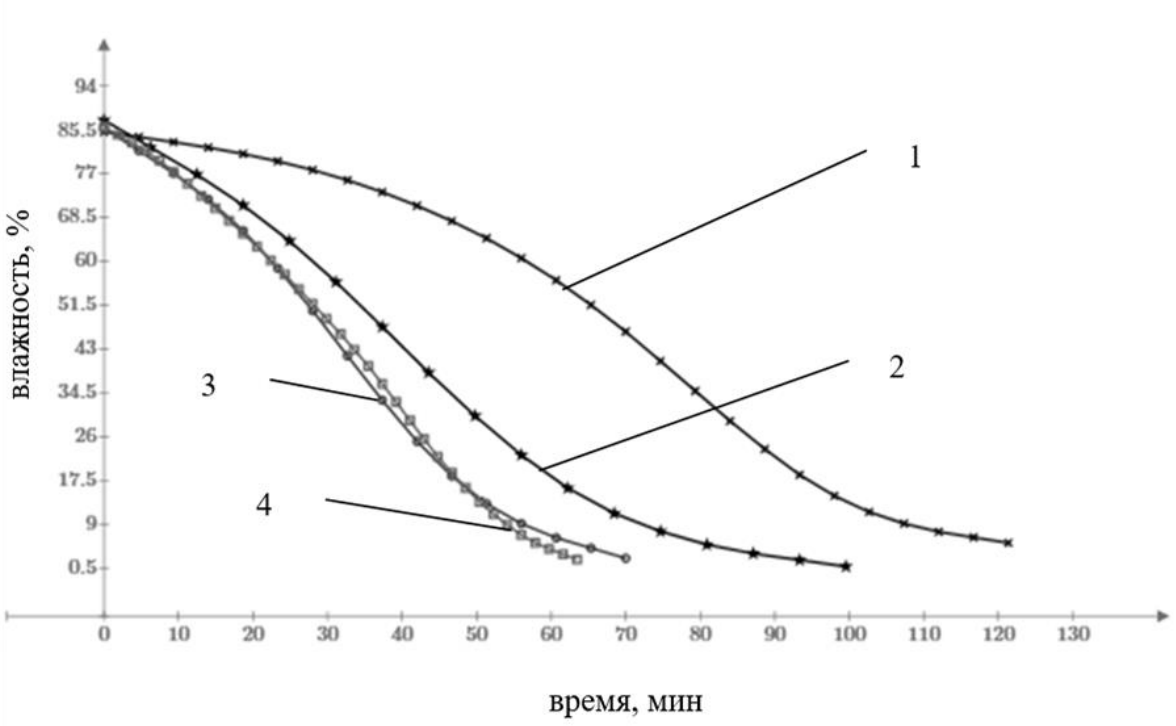


Рисунок 4.76. Кривые сушки слайсов моркови на ленте:
1 – скорость ленты 20 мм/с, 2 – скорость ленты 15 мм/с,
3 – скорость ленты 10 мм/с, 4 – скорость ленты 5 мм/с

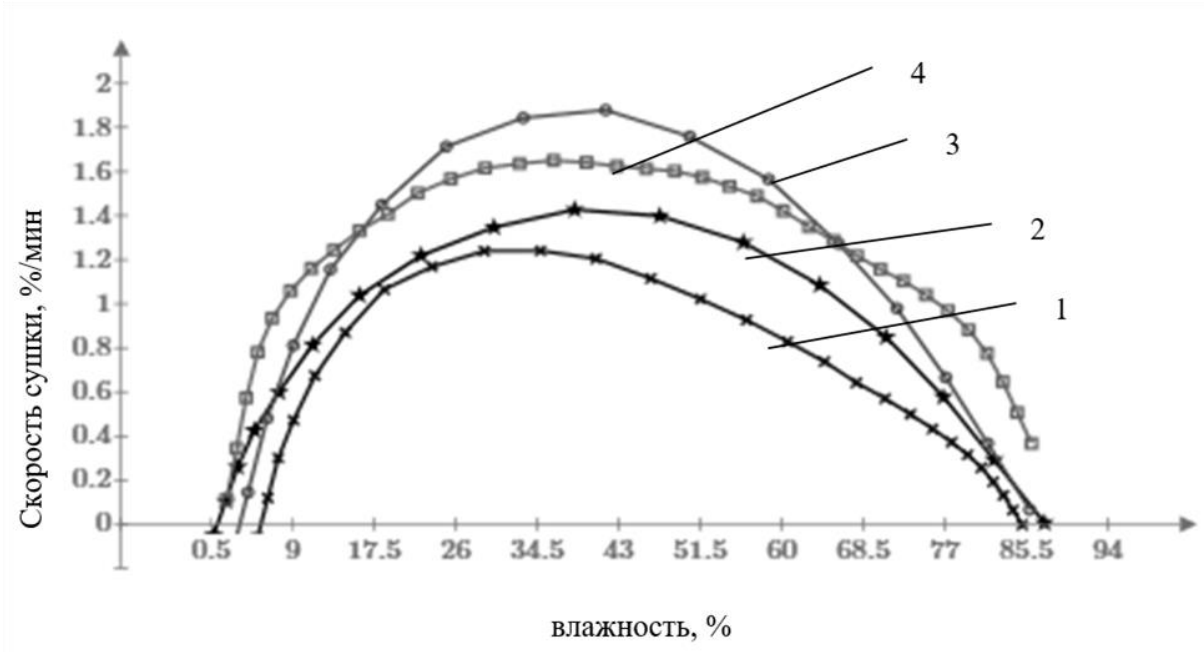


Рисунок 4.77. Кривые скорости сушки слайсов моркови на ленте:
1 – скорость ленты 20 мм/с, 2 – скорость ленты 15 мм/с,
3 – скорость ленты 10 мм/с, 4 – скорость ленты 5 мм/с

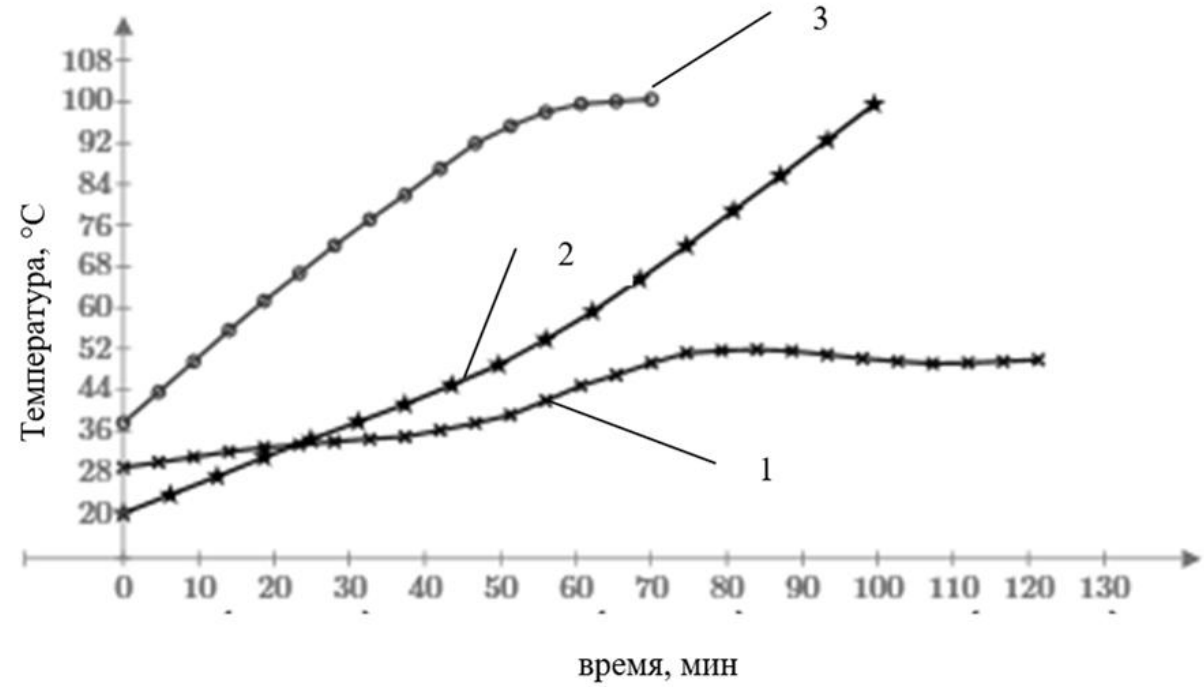


Рисунок 4.78. Термограммы сушки слайсов моркови на ленте:
1 – скорость ленты 20 мм/с, 2 – скорость ленты 15 мм/с,
3 – скорость ленты 10 мм/с

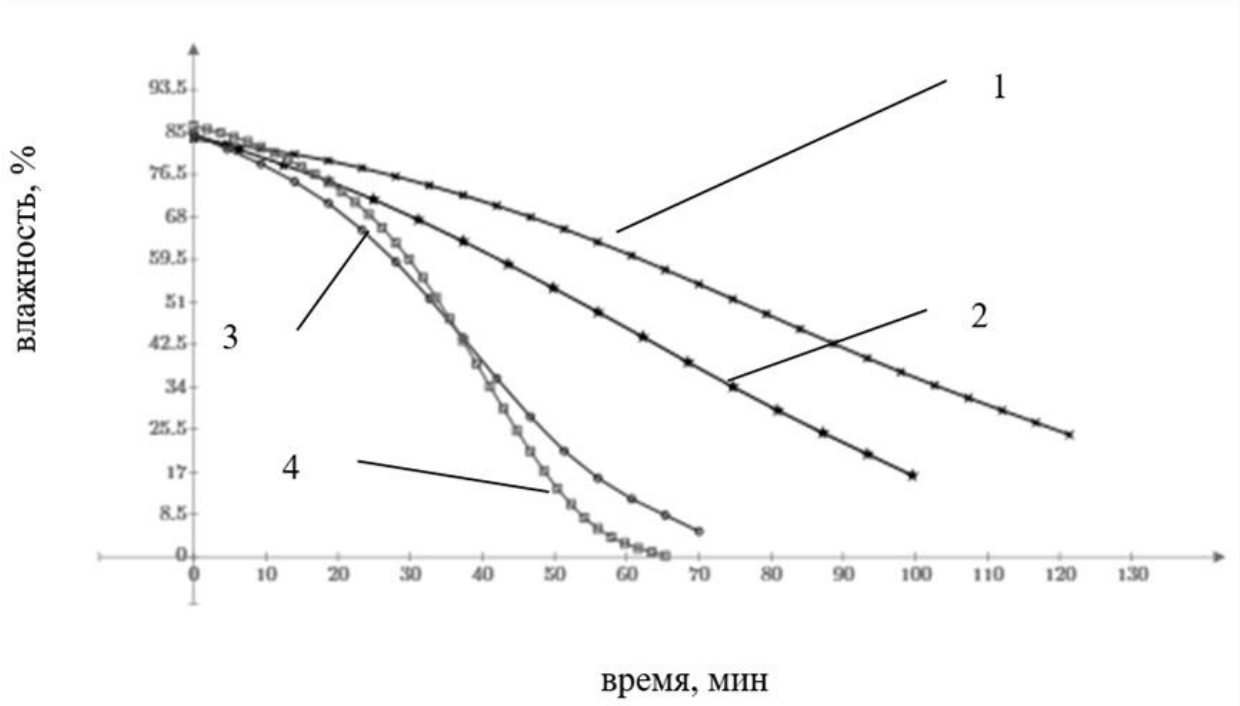


Рисунок 4.79. Кривые сушки слайсов яблок на ленте:
1 – скорость ленты 20 мм/с, 2 – скорость ленты 15 мм/с,
3 – скорость ленты 10 мм/с, 4 – скорость ленты 5 мм/с

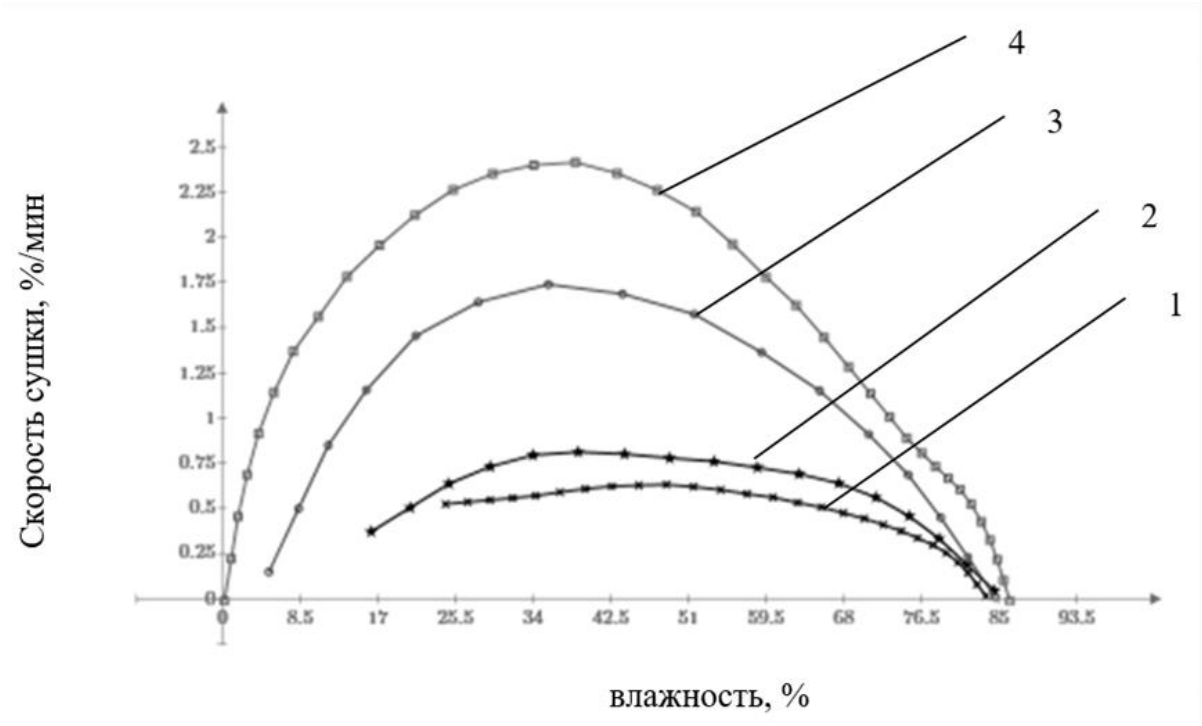


Рисунок 4.80. Кривые скорости сушки слайсов яблок на ленте:
1 – скорость ленты 20 мм/с, 2 – скорость ленты 15 мм/с,
3 – скорость ленты 10 мм/с, 4 – скорость ленты 5 мм/с

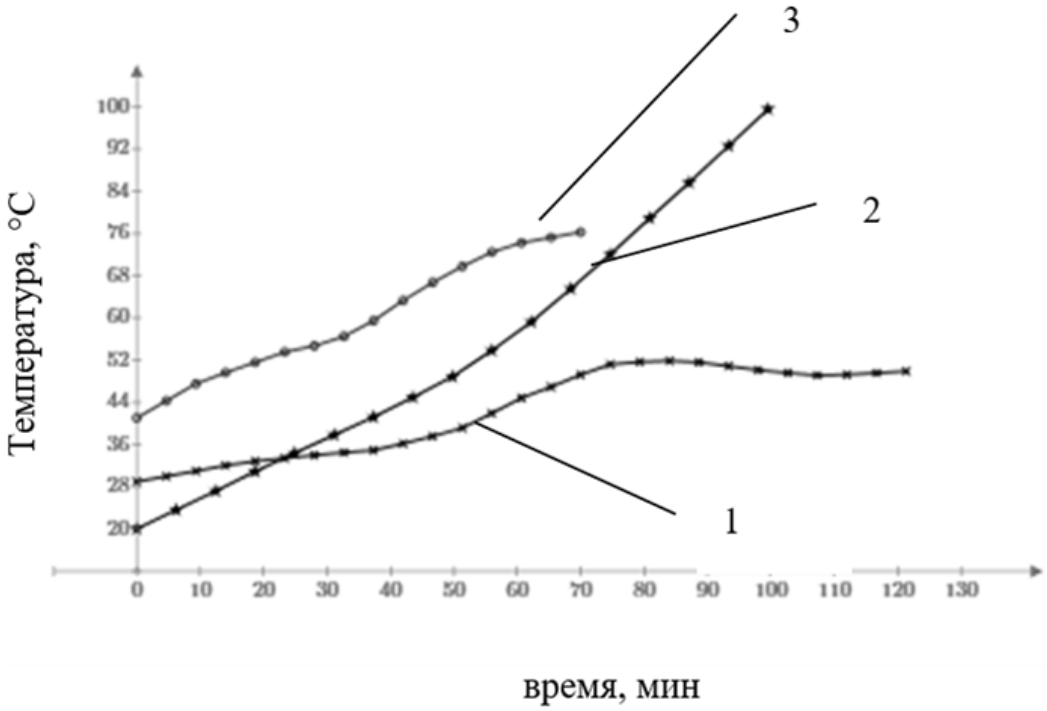


Рисунок 4.81. Термограммы сушки слайсов яблок на ленте:
1 – скорость ленты 20 мм/с, 2 – скорость ленты 15 мм/с,
3 – скорость ленты 10 мм/с

Такое изменение характера влияния скорости ленты связано с тем, что увеличение скорости ленты от 0 мм/с до 10 мм/с приводит к более эффективному удалению влаги из зоны воздействия инфракрасного излучения, так как продукт быстрее перемещается из зоны высокой влажности в зону более сухого воздуха. Это позволило ускорить процесс сушки и сократить время, необходимое для высушивания продукта. Также, увеличение скорости ленты в этом диапазоне приводит к более эффективному массообмену между продуктом и воздухом, что позволило ускорить процесс сушки. При этом температура и влажность продукта стали более равномерными, что также ускорило процесс сушки. Таким образом, оптимальное значение скорости ленты находится в диапазоне от 5 до 15 мм/с, и дальнейшие опыты были проведены на скорости ленты 10 мм/с.

Провели исследования по сушке слайсов свеклы толщиной 3 мм при мощности 435 Вт и скорости ленты 20 мм/с (1) и мощности 425 Вт и скорости ленты 10 мм/с (2). Удельная мощность 22,5 кВт/м^2 (рисунок 4.82–4.84).

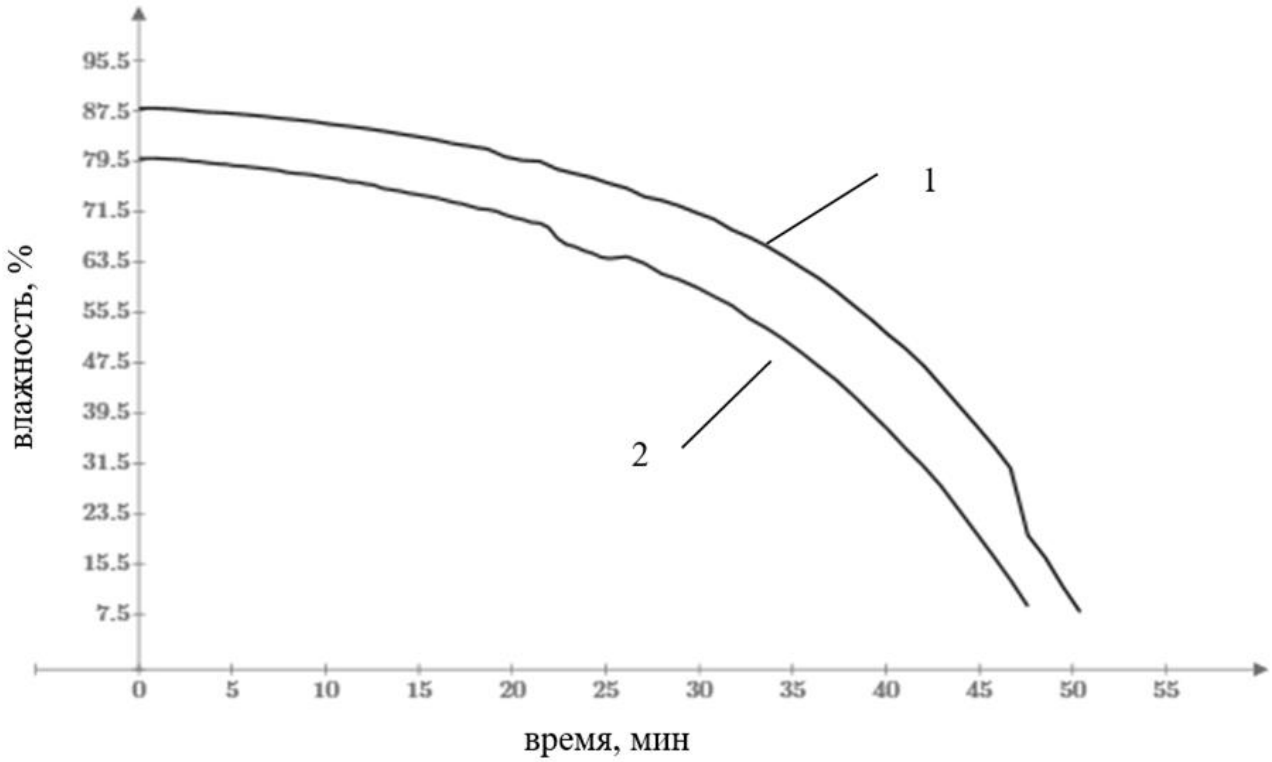


Рисунок 4.82. Кривые сушки слайсов свеклы на ленте:
1 – скорость лены 20 мм/с, 2 – скорость лены 10 мм/с

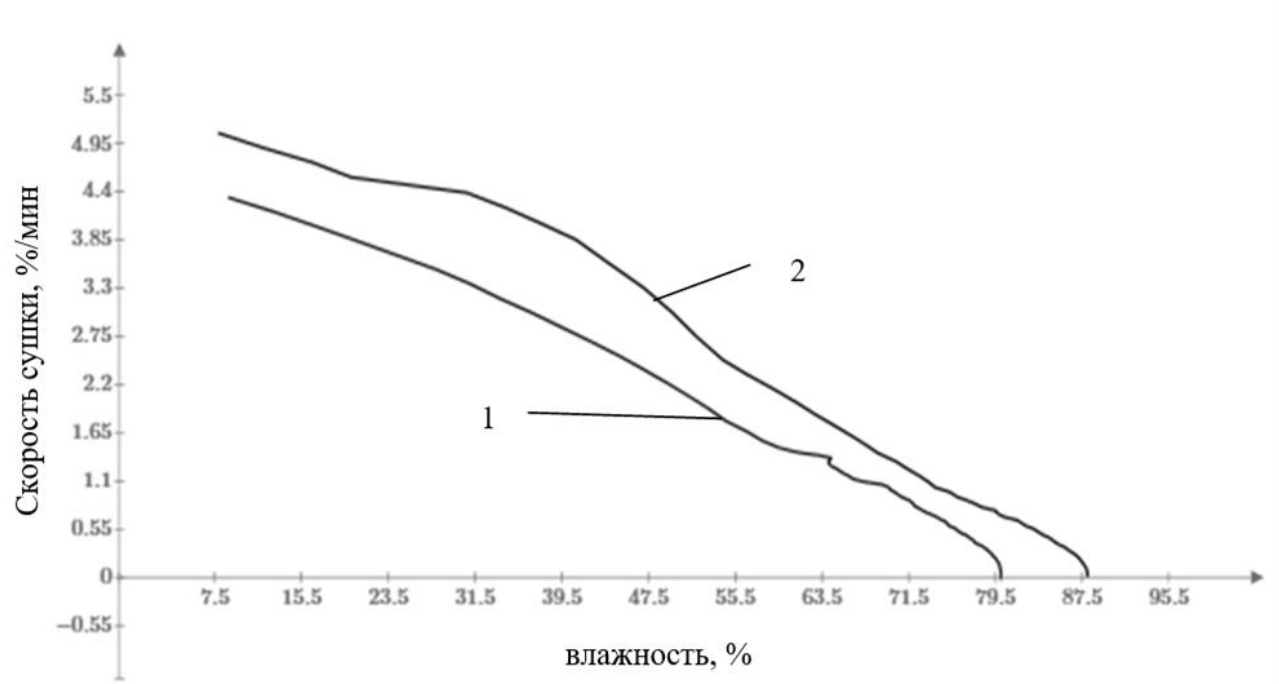


Рисунок 4.83. Кривые скорости сушки слайсов свеклы на ленте:
1 – скорость лены 20 мм/с, 2 – скорость лены 10 мм/с

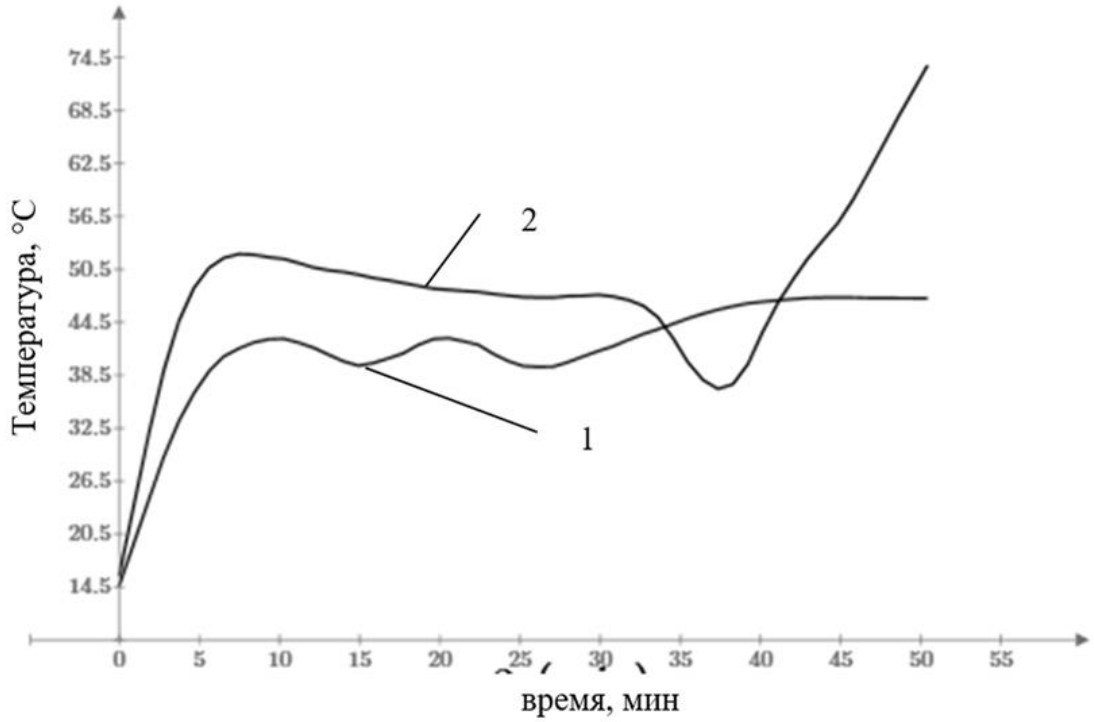


Рисунок 4.84. Термограммы сушки слайсов свеклы на ленте:
1 – скорость лены 20 мм/с, 2 – скорость лены 10 мм/с

Провели исследования по сушке слайсов картофеля толщиной 3 мм при мощности 435 Вт и скорости ленты 20 мм/с (1) и мощности 42 5Вт и скорости ленты 10 мм/с (2). Удельная мощность 22,5 кВт/м^2 (рисунки 4.85–4.87).

Так как режим сушки в ленточной сушилке отличается от непрерывного режима сушки в неподвижном слое, исследованного ранее [16, 25, 151, 216], то было оценено влияние мощности излучения и толщины слоя на кинетику процесса сушки (рисунок 4.88 и 4.89). Так как при сушке слайсов моркови в данной установке практически не наблюдалось постоянной скорости сушки при выбранном значении скорости ленты, то для уточненного расчета продолжительности процесса сушки рассмотрено влияние этих параметров на безразмерное влагосодержание, определенное как w^c / w_0^c, где w^c – текущее вдагосодержание, w_0^c – начальное влагосодержание.

Как видно (рисунок 4.89) при толщине слоя до 3-х мм при сушке слайсов моркови в ленточной сушилке ее влиянием можно пренебречь, и ключевым фактором, влияющим на продолжительность процесса сушки остается мощность

излучения (рисунок 4.88). Для определения возможности практического применения в системах расчета и проектирования данного типа установок были проанализированы известные теоретические модели.

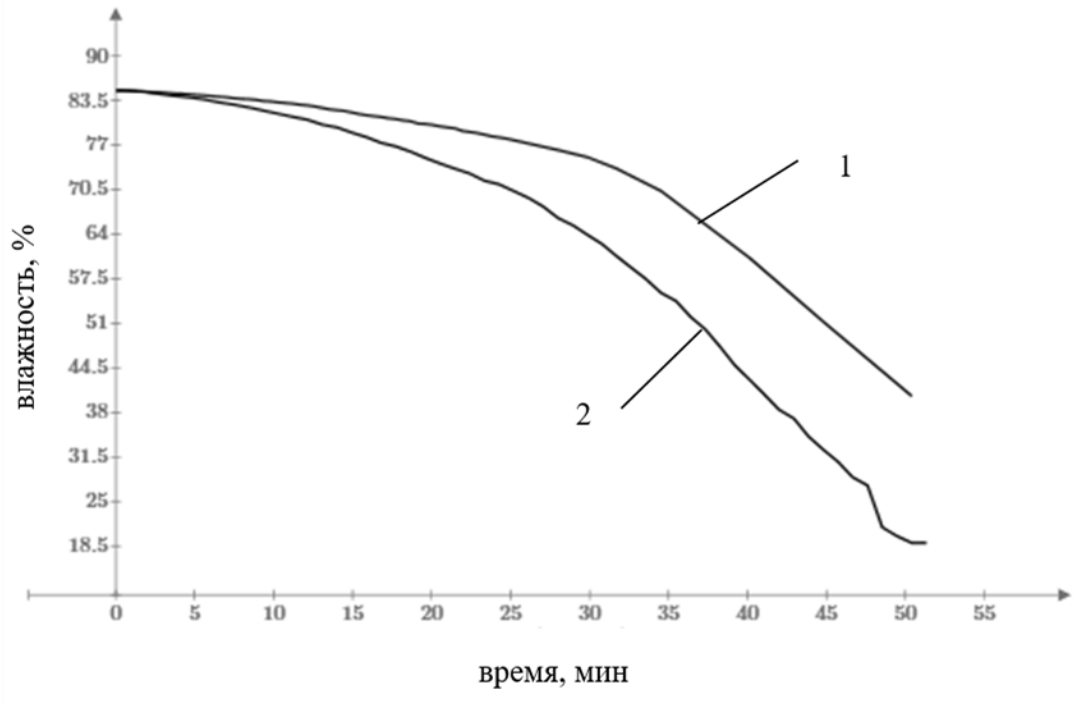


Рисунок 4.85. Кривые сушки слайсов картофеля на ленте:
1 – скорость лены 20 мм/с, 2 – скорость лены 10 мм/с

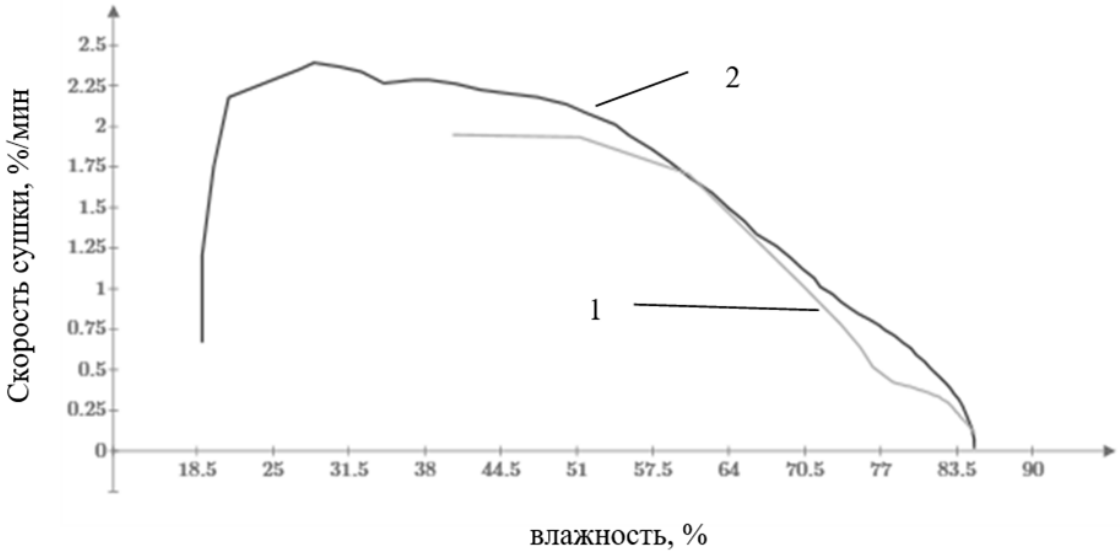


Рисунок 4.86. Кривые скорости сушки слайсов картофеля на ленте:
1 – скорость лены 20 мм/с, 2 – скорость лены 10 мм/с

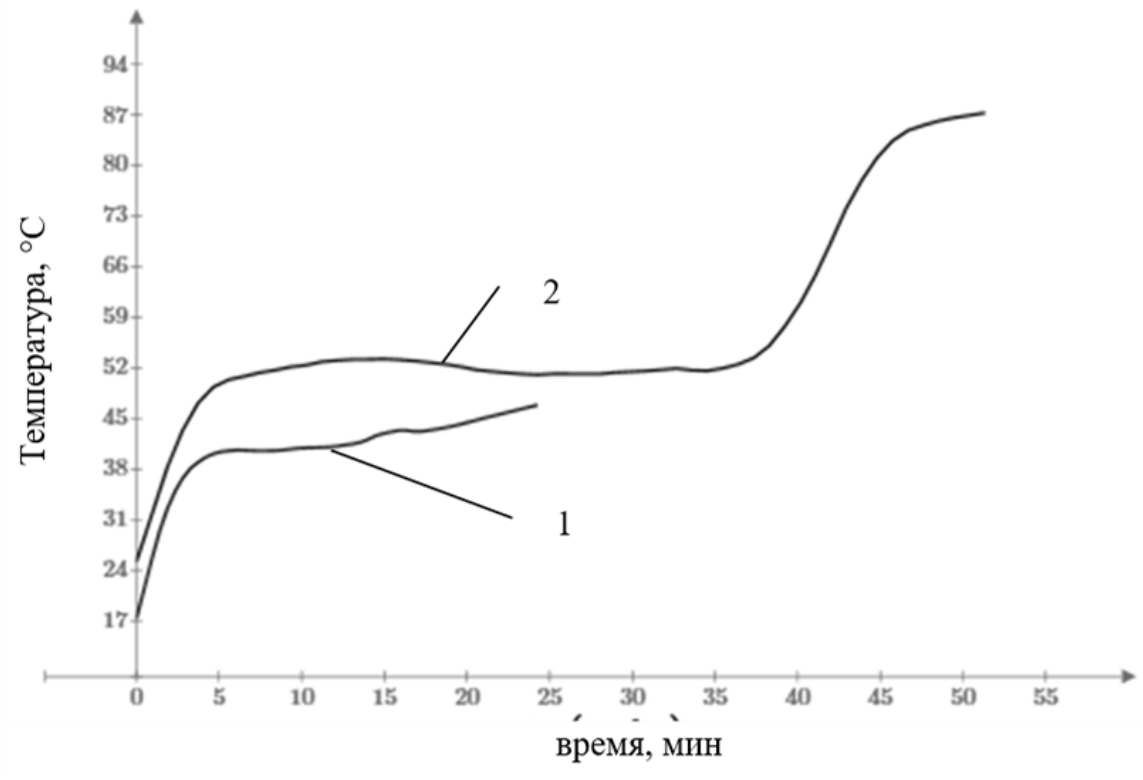


Рисунок 4.87. Термограммы сушки слайсов картофеля на ленте:
1 – скорость лены 20 мм/с, 2 – скорость лены 10 мм/с

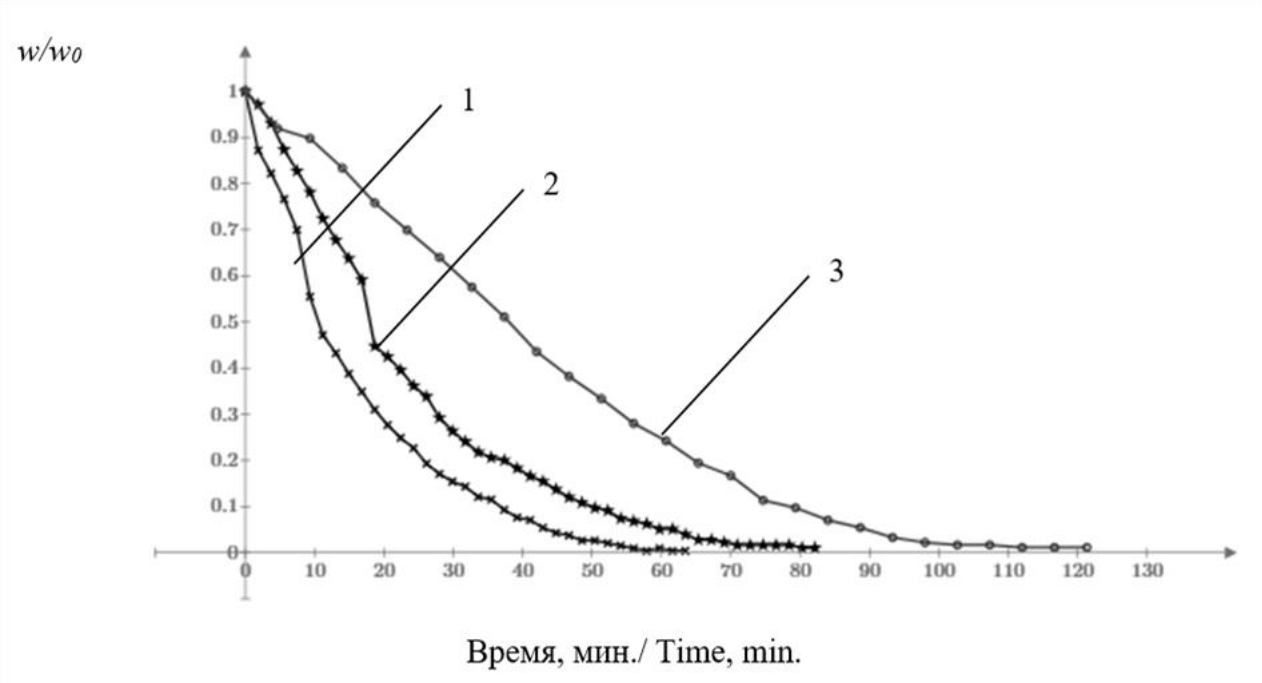


Рисунок 4.88. Кривые изменения безразмерного влагосодержания
при мощности излучателей: 1 – 450 Вт, 2 – 300 Вт, 3 – 170 Вт

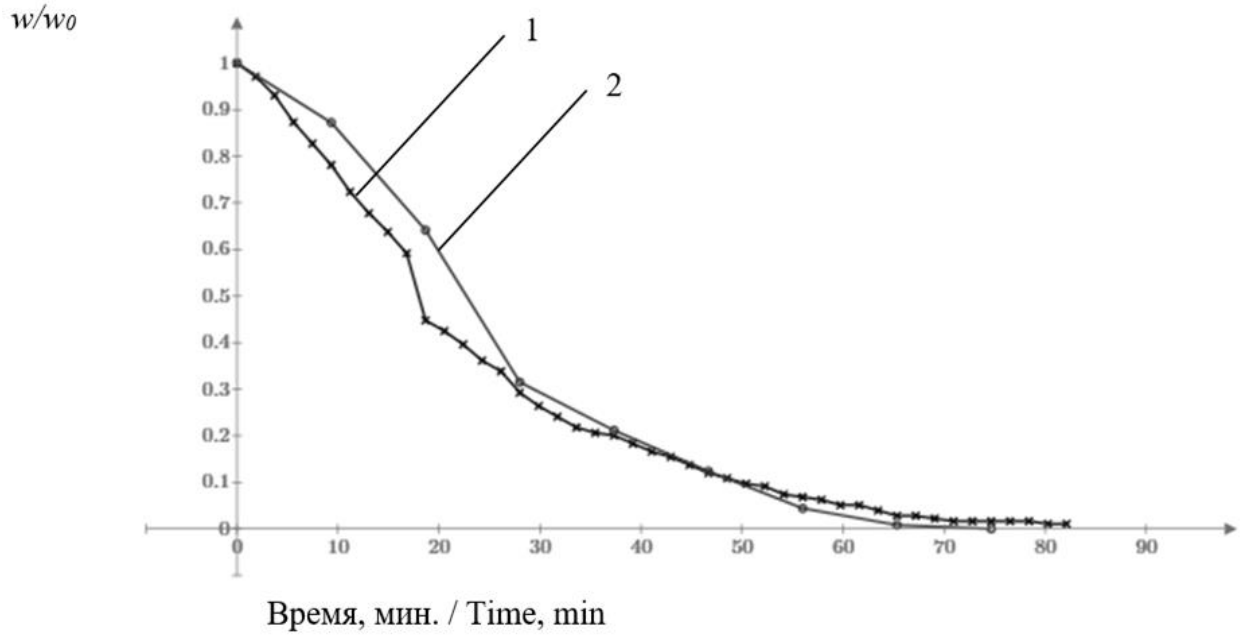


Рисунок 4.89. Кривые изменения безразмерного влагосодержания при толщине слоя: 1 – 3 мм, 2 – 1 мм

Модель Ньютона $w^c/w_0^c = e^{-k\cdot t}$ совпадает с экспериментальными данными только в крайних точках и расхождение модели с экспериментом растет с уменьшением подводимой мощности, так среднеквадратическое отклонение для 450 Вт составляет 0,072, для 300 Вт 0,095 и для 170 Вт –0,18.

Модель Хендерсона $w^c/w_0^c = a\cdot e^{-k\cdot t}$ удовлетворительно описывает экспериментальные данные после 1000 с. после начала процесса для 450 Вт и 300 Вт мощности излучателей. Однако для 170 Вт среднеквадратическое отклонение составило 0,234 и эти отклонения можно наблюдать визуально (рисунок 4.90).

Модель Пейджа $w^c/w_0^c = e^{-k\cdot t^n}$ для всего диапазона мощностей характеризуется заниженными значениями безразмерного относительного влагосодержания в начале процесса сушки и завышенными значениями в конце его. Среднеквадратичное отклонение находится в диапазоне 0,061 – 0,115. Наилучшее совпадение достигается для логарифмической модели $w^c/w_0^c = a\cdot e^{-k\cdot t} + c$. Значения среднеквадратичных отклонений приведены в таблице 4.25.

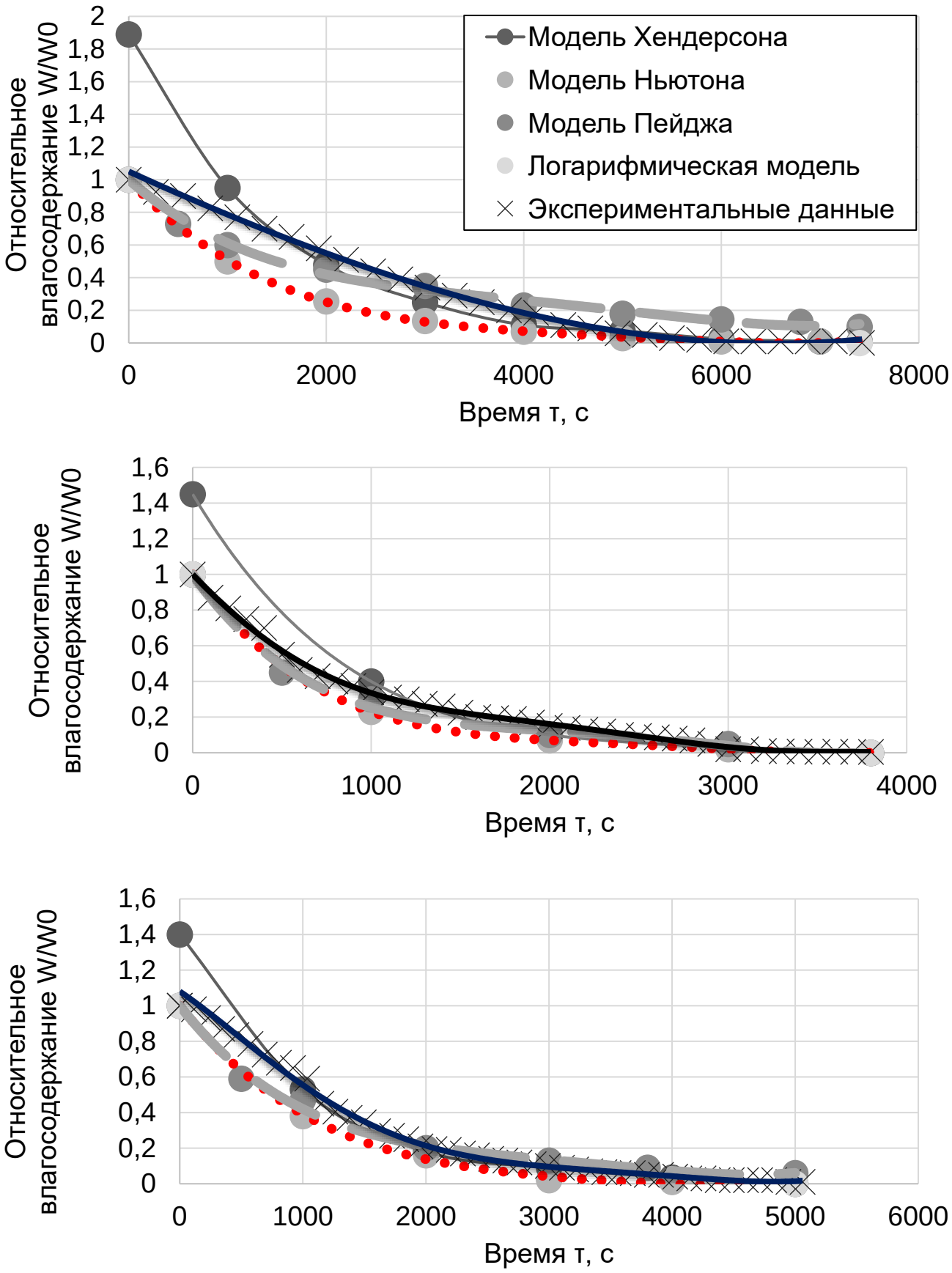


Рисунок 4.90. Сравнение различных моделей с экспериментальными данными

Таблица 4.25. Расчетные модели

Модель	Среднеквадратичное отклонение		
	Мощность, Вт		
	170	300	450
Ньютона	0,072	0,095	0,18
Хендерсона	0,118	0,088	0,234
Пейджа	0,061	0,083	0,115
Логарифмическая	0,033	0,027	0,017

В таблице 4.26 приведены значения коэффициентов логарифмической модели для различных значений мощности излучателей. Процедура интерполяций позволяет использовать эти данные для определения времени процесса сушки слайсов моркови в ленточной ИК сушилке до заданной влажности в диапазоне мощностей излучателей от 170 до 450 Вт.

Таблица 4.26. Значения коэффициентов логарифмической модели

Коэффициент	Значения коэффициентов		
	Мощность, Вт		
	170	300	450
a	1,037	1,135	1,298
k	$0{,}99\cdot10^{-3}$	$0{,}66\cdot10^{-3}$	$0{,}26\cdot10^{-3}$
c	-0,024	-0,052	-0,24

4.4.1. Коэффициент диффузии

Ключевым показателем, характеризующим скорость сушки во втором периоде, является эффективный коэффициент диффузии [126, 251, 336]. Значения *Deff* в сушилке лежат в пределах от 10^{-8} до 10^{-10} м^2/с для фруктов и овощей (таблица 4.27).

Таблица 4.27. Значения коэффициентов логарифмической модели

Коэффициент	Значения коэффициентов		
	Мощность, Вт		
	450	300	170
Средний эффективный коэффициент диффузии $Deff \cdot 10^{10}$, м^2/с	8,14	5,28	3,03
Энергия активации Ea, кВт/кг	21,2	14,5	11,3
$D_O \cdot 10^8$, м^2/с	1,29	1,06	0,08

Значения $Deff$ при различных условиях сушки слайсов моркови, полученные по уравнению Аррениуса

$$Deff = D_O \cdot e^{-\frac{E_a \cdot m}{P}} \quad (4.34)$$

где m – масса образца (кг),

P – мощность излучения (Вт),

D_O – числовой коэффициент (м^2/с),

и расчетные значения показаны в таблице 4.27. Средние значения эффективных коэффициентов диффузии лежат в диапазоне $3 \cdot 10^{-10}$ – $8{,}14 \cdot 10^{-10}$ м^2/с, что согласуется с данными, согласно которым, для моркови $Deff = 2.01 \times 10^{-10}$–$12.10 \times 10^{-10}$ [181].

Значения $Deff$ увеличивались с увеличением мощности излучения ввиду более высоких температур образца. Текущие значения $Deff$ в процессе сушки для различной мощности излучения могут быть рассчитаны по уравнению (4.34), используя полученные значения энергии активации.

Характер кинетики процесса сушки моркови в рассмотренной ленточной сушилке имеет принципиальные отличия от кинетики процесса сушки в неподвижном слое. В связи с конструктивными особенностями сушилки

наблюдается экстремальный характер влияния скорости ленты на скорость сушки. Если вначале, с увеличением скорости ленты происходит увеличение скорости сушки, то после достижения значения скорости ленты 10 мм/с, наблюдается обратная зависимость. Кривые сушки имеют зону возрастающей скорости сушки, завязанную с прогревом материала, и с увеличением скорости ленты, максимум на кривой скорости сушки смещается в сторону меньших влагосодержащий. Такой характер зависимостей делает неприменимыми имеющиеся зависимости для расчета процесса сушки моркови при постоянной скорости сушки. Из рассмотренных наиболее употребляемых моделей описания процесса наилучшая корреляция с экспериментальными данными наблюдалась у логарифмической модели, которую предлагается использовать для расчета продолжительности времени сушки при заданных параметрах мощности излучателей. Полученные значения эффективных коэффициентов диффузии согласуются с данными других исследователей. Целесообразно получить аналогичные данные для определения рациональных параметров процесса сушки схожего плодовоовощного сырья.

4.5. Исследование процесса выпаривания в условиях СВЧ поля в вакууме

4.5.1. Кинетика выпаривания продуктов в условиях СВЧ поля

В ходе исследования кинетики процесса выпаривания при воздействии СВЧ энергии изучены влияния мощности электромагнитного поля и давления в реакционном объеме на паропроизводительность аппарата. На основе полученных результатов проводились расчеты значений масс и текущих концентраций сухих веществ в продуктах. Расчет массы сухих веществ в объеме проводился по формуле (4.35):

$$M_C = \frac{M_H \cdot X_C}{100\%} \tag{4.35}$$

где M_C – масса сухих веществ, г;

M_H – начальная масса продукта, г;

X_C – концентрация сухих веществ, %.

Расчет текущей концентрации сухих веществ в продукте проводился по формуле (4.36):

$$X_T = \frac{M_C \cdot 100\%}{M_T} \tag{4.36}$$

где X_T – текущая концентрация сухих веществ в продукте, %;

M_T – текущая масса продукта, г (определялась из массового баланса как разница M_H и массы конденсата, измеренной с помощью весов).

Исследование влияния мощности электромагнитного поля на паропроизводительность

Эксперименты по определению влияния мощности СВЧ поля на паропроизводительность аппарата проводились на примере яблочного сока. Начальный объем был одинаковым и составлял 1 литр. Диапазон экспериментальных данных указан в таблице 4.28.

Таблица 4.28. Диапазон экспериментальных данных при исследовании процесса выпаривания яблочного сока при разных мощностях СВЧ поля

Объект	Раство-ритель	Давление, МПа	Темпе-ратура, °С	Мощность, Вт	Концентрация, %	
					начальная	конечная
Сок яблочный	Вода	0,01	35–65	200–900	11,6	85,8

В результате исследований было установлено, что скорость увеличения массы конденсата четко коррелируется с уровнем подводимой мощности (рисунок 4.91). При этом, исходя из полученной зависимости, можно утверждать, что скорость выделения пара на протяжении основного времени эксперимента постоянная.

Важным параметром процесса выпаривания пищевых систем является температура, которая является одним из ключевых факторов, влияющих на качество готового продукта. В ходе экспериментов были получены зависимости температур пара на выходе от уровня подводимой мощности (рисунок 4.92).

Уровень температур (рисунок 4.92) свидетельствует о возможности реализовать процесс выпаривания при высоком качестве концентрата, при сохранении пищевого потенциала сырья.

На основе полученных значений изменения массы конденсата, используя уравнения материального баланса, проведены расчеты изменения концентрации сухих веществ яблочного сока (рисунок 4.93) и паропроизводительности (рисунок 4.94).

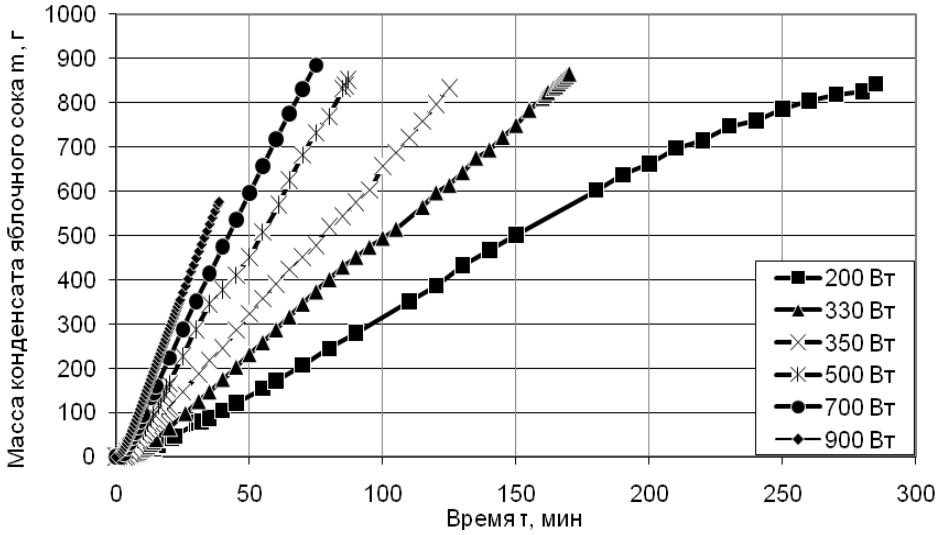


Рисунок 4.91. Влияние мощности электромагнитного поля на изменение массы конденсата во времени

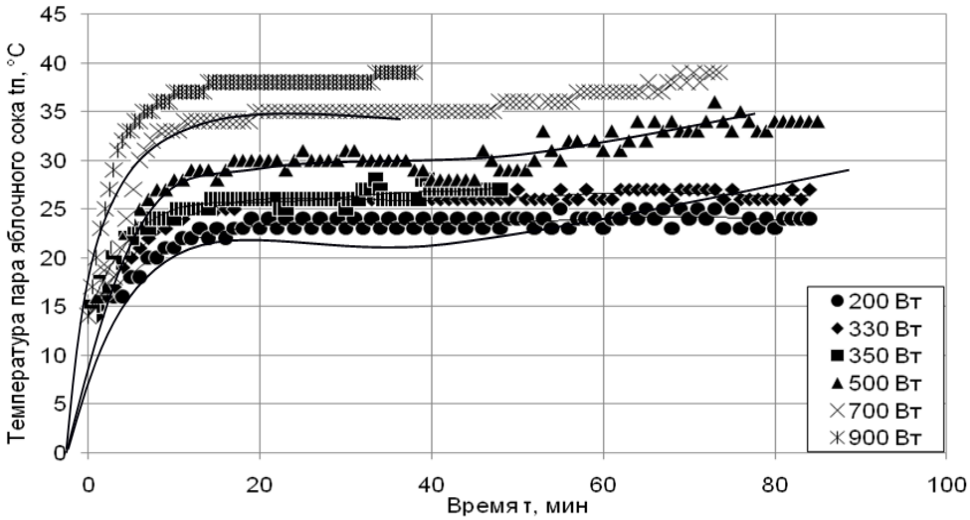


Рисунок 4.92. Влияние мощности электромагнитного поля на изменение температуры пара на выходе во времени

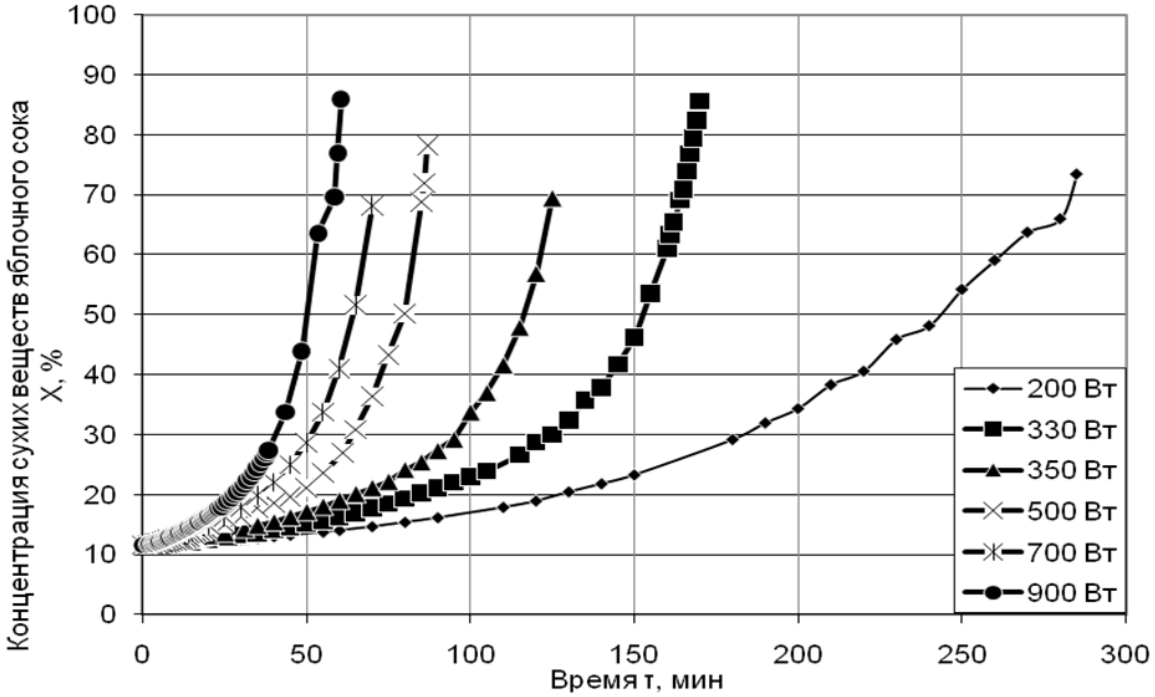


Рисунок 4.93. Влияние мощности электромагнитного поля на изменение концентрации сухих веществ во времени

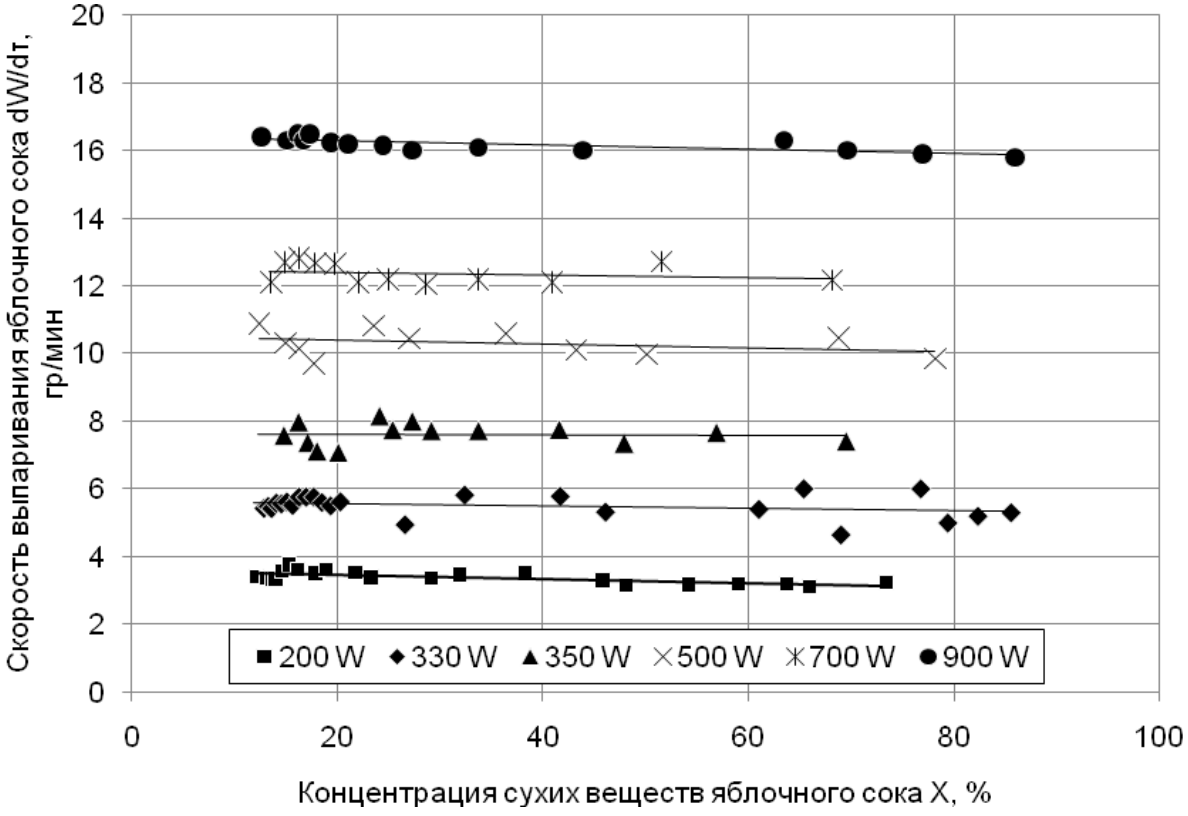


Рисунок 4.94. Влияние мощности электромагнитного поля на скорость выпаривания яблочного сока

Исходя из полученных зависимостей, установлено, что на протяжении всего эксперимента скорость парообразования остается неизменной (рисунок 4.94). Это обусловлено объемным подводом энергии, который обеспечивается посредством воздействия электромагнитного поля. При этом энергия подводится селективно к молекулам воды в продукте.

Интересные результаты получены при оценке влияния концентрации продукта на величину парапроизводительности (рисунок 4.94). Видно, что во всем диапазоне концентраций, вплоть до 90 %, скорость выпаривания оставалась, практически, не зависимой от температуры.

Таким образом, подтверждается гипотеза о возможности перехода от классической теплопередачи (ГУ III рода) к адресной доставке энергии (ГУ II рода). Температура пара на выходе на протяжении основного времени процесса также была постоянной и не превышала 40 °С (рисунок 4.92). Этот факт свидетельствует о достаточно высоком качестве готового продукта и о его высокой пищевой ценности.

Исследование влияния давления на паропроизводительность

Эксперименты по исследованию влияния давления на паропроизводительность проводились при постоянной мощности электромагнитного поля и одинаковом объеме продукта. Диапазон экспериментальных данных указан в таблице 4.29.

Таблица 4.29. Диапазон экспериментальных данных при исследовании процесса выпаривания яблочного сока при разных значениях давления

Объект	Растворитель	Давление, МПа	Температура, °С	Мощность, Вт	Концентрация, %	
					начальная	конечная
Сок яблочный	Вода	0,01–0,02	35–45	200	11,6	85,8

В результате получены аналогичные зависимости, что и при исследовании влияния мощности электромагнитного поля (рисунок 4.96–4.99).

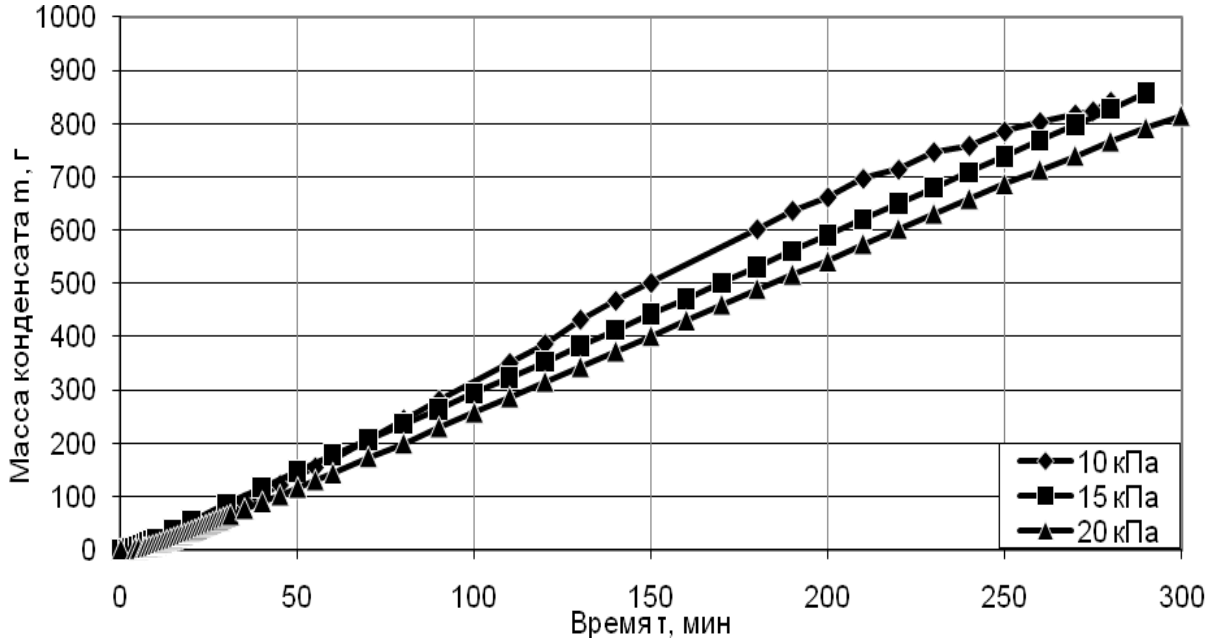


Рисунок 4.95. Влияние давления на изменение массы конденсата во времени

С ростом давления уменьшается скорость увеличения массы конденсата (рисунок 4.95). Это говорит о том, что для получения готового продукта с необходимой концентрацией сухих веществ, длительность процесса по времени должна быть увеличена, либо следует увеличивать мощность подводимой энергии для обеспечения большей скорости образования конденсата. Оба эти варианта требуют больших энергетических и, как следствие, финансовых затрат.

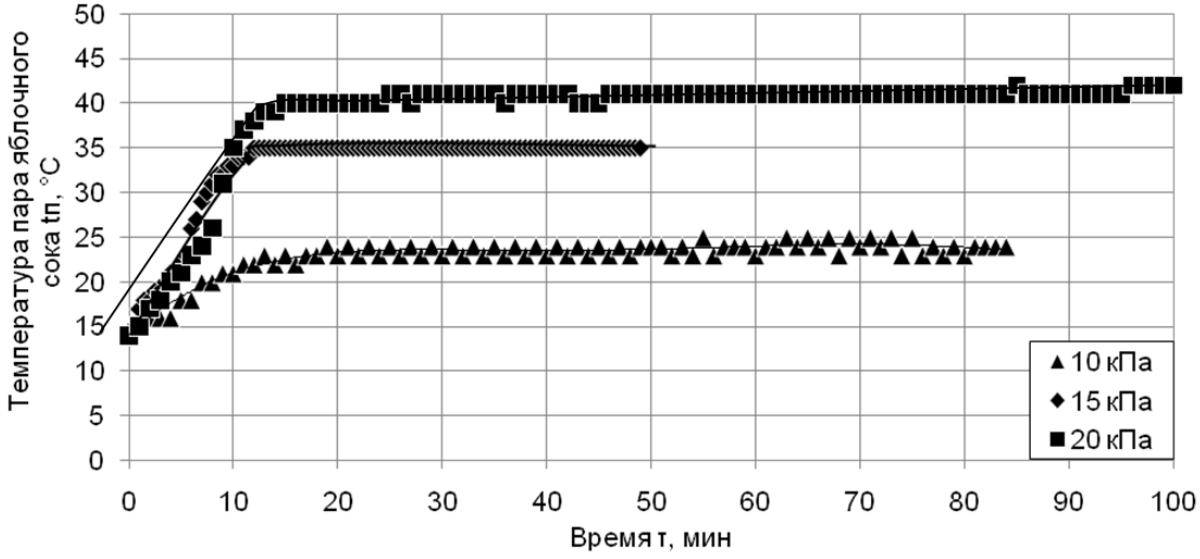


Рисунок 4.96. Влияние давления на изменение температуры пара на выходе во времени

То же самое происходит и с температурой. Для того чтобы обеспечить процесс выпаривания при более высоком давлении, следует нагреть продукт до большей температуры (рисунок 4.96). Это обусловлено тем, что с ростом давления растет и температура кипения яблочного сока. Данный факт влечет за собой негативные последствия в виде уменьшения пищевой ценности готового продукта из-за длительной обработки сырья при высоком тепловом режиме. Аналогичные выводы можно сделать и по поводу изменения концентрации продукта (рисунок 4.97).

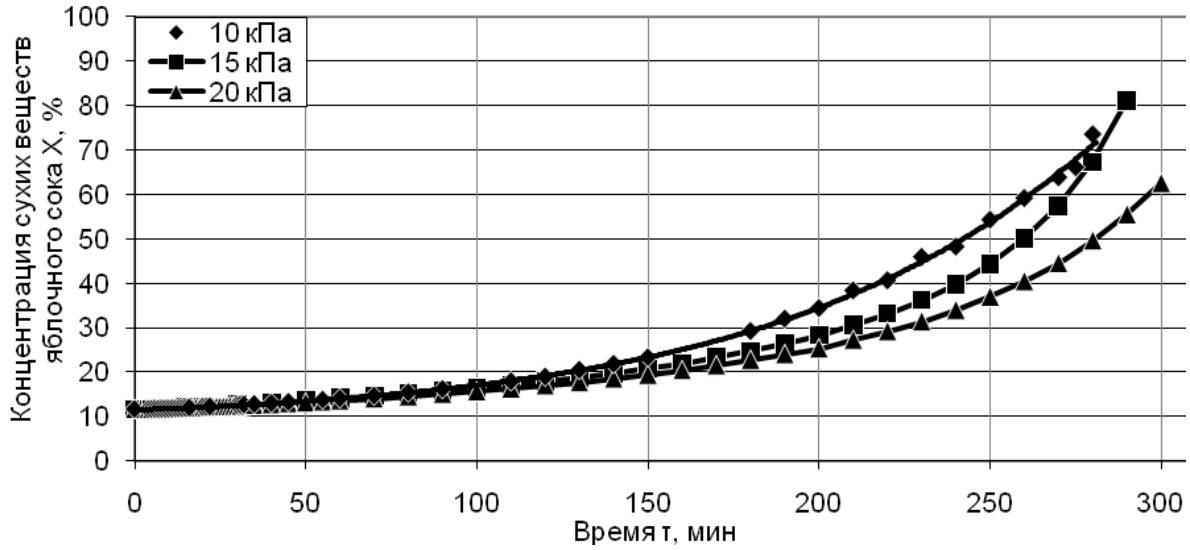


Рисунок 4.97. Влияние давления на изменение концентрации сухих веществ во времени

Скорость выпаривания напрямую зависит от значения давления в аппарате и не зависит от значения концентрации (рисунок 4.98). Рост давления в аппарате приводит к уменьшению скорости выпаривания.

Результаты исследований показали, что в процессе выпаривания следует обеспечивать наиболее низкое давление в реакционном объеме, которое обуславливает низкую температуру кипения. Соответственно, это позволит провести процесс при минимальных затратах времени и энергии. Также, одним из основных преимуществ протекания процесса при таких условиях является получение готового продукта с высокой концентрацией сухих веществ и высокой пищевой ценностью, что, по сути, является одной из главных задач процесса выпаривания.

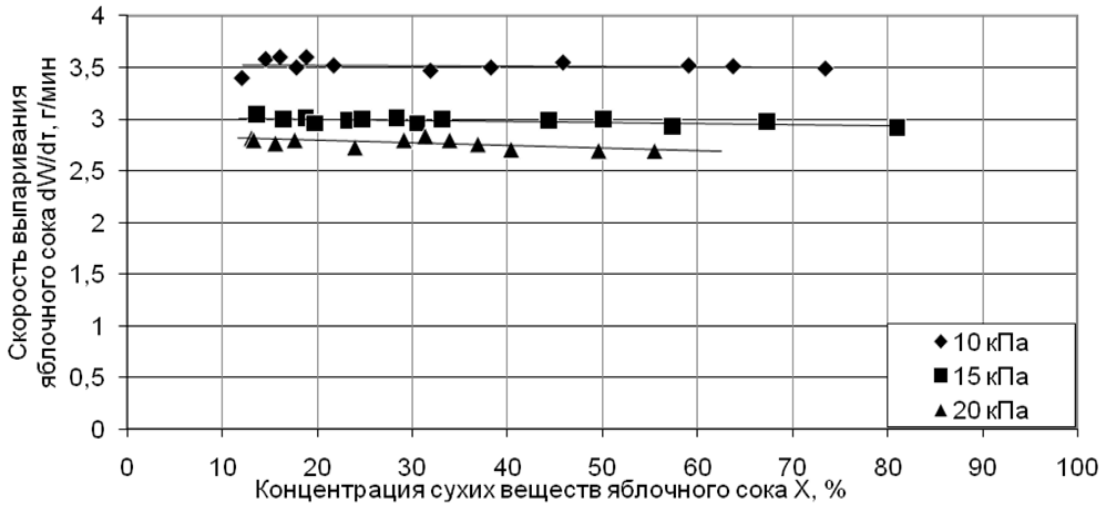


Рисунок 4.98. Влияние давления на скорость выпаривания яблочного сока

Исследование влияния типа продукта на паропроизводительность

Эксперименты проводились при постоянной мощности электромагнитного поля и при постоянном давлении. Диапазон экспериментальных данных отображен в таблице 4.30.

Таблица 4.30. Диапазон экспериментальных данных при исследовании процесса выпаривания

Объект	Раство-ритель	Давление, МПа	Темпе-ратура, °С	Мощность, Вт	Концентрация, %	
					начальная	конечная
Сок яблочный	Вода	0,01	35–40	200	11,6	85,8
Сок гранатовый	Вода	0,01	35–40	200	8	77
Сок эхинацеи	Вода	0,01	35–40	200	13,5	36,3
Сок свекольный	Вода	0,01	35–40	200	12,2	81,3
Молоко	Вода	0,01	35–40	200	12	29
Паста томатная	Вода	0,01	35–40	200	16	54,8
Древесина дуба	Вода	0,01	35–40	200	63	82,6
Песок	Вода	0,01	35–40	200	74,1	97,8
Вино	Этанол (10 %)	0,01	35–40	200	5,8	62,3

Продолжение таблицы 4.30.

Объект	Раство-ритель	Давление, МПа	Темпе-ратура, °С	Мощность, Вт	Концентрация, %	
					начальная	конечная
Экстракт корня мискантуса	Этанол (42 %)	0,01	35–40	200	11,3	74,2
Экстракт масла кофе	Этанол	0,01	35–40	200	6	77,5
Кофейный шлам	Этанол	0,01	35–40	200	56	78,6
Экстракт масла виноградных косточек	Ацетон	0,01	35–40	200	8,6	56,4

Результатом опытов являются зависимости (рисунок 4.99–4.1022).

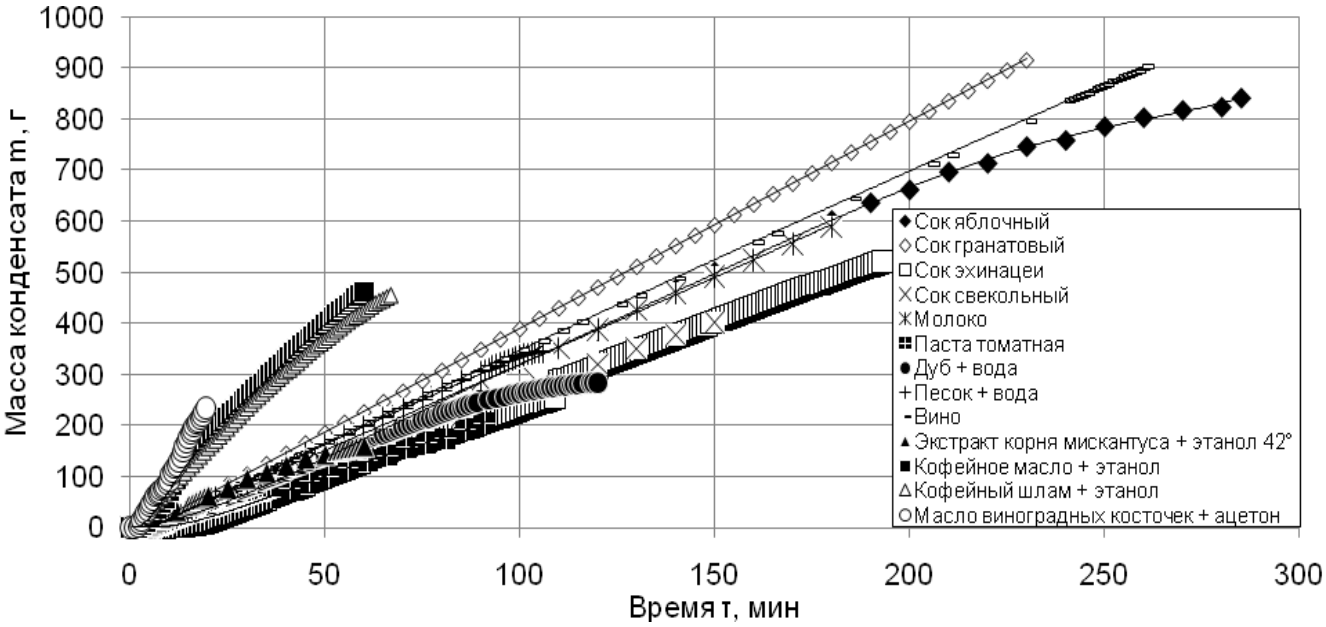


Рисунок 4.99. Влияние типа продукта на изменение массы конденсата во времени

На протяжении процесса выпаривания прослеживается постоянная, но различная для каждой системы скорость извлечения влаги, что обуславливается разной теплотой парообразования (рисунок 4.99). Температуры при этом не превышали 32 °С (рисунок 4.100).

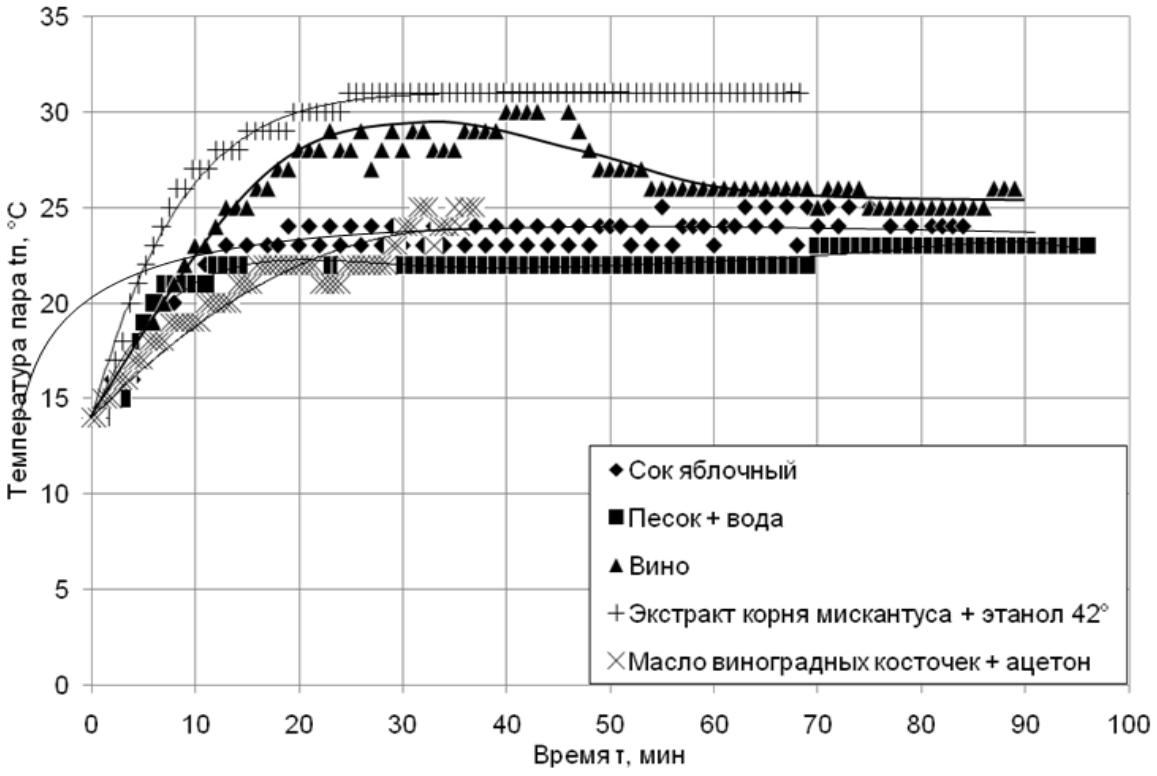


Рисунок 4.100. Влияние типа продукта на изменение температуры пара на выходе во времени

Низкие значения температур пара для различных систем (рисунок 4.100) подтверждают безопасность процесса выпаривания в вопросе сохранения пищевой ценности готового продукта. На основе материальных балансов определена степень концентрирования для разных систем (рисунок 4.101).

Характер стремительного роста концентрации раствора на последних этапах выпаривания объясняется тем, что паропроизводиельность аппарата остается практически постоянной (рисунок 4.101), а влаги в объеме раствора становится все меньше и меньше. Этот этап выпаривания требует четкой регулировки мощности магнетрона. При избыточном поступлении энергии в объем продукта может произойти его порча.

Существенная разность скоростей выпаривания (рисунок 4.102) объясняется типом растворителя. Это подтверждает справедливость предложенной классификации объектов исследования именно по типу растворителя. Результаты опытов показали, что скорость влагоизвлечения в спиртосодержащих системах в 2–

2,5 раза выше, чем в водорастворимых. В свою очередь, ацетоносодержащие растворы отличаются еще большей скоростью, которая в 5 раз превышает скорость влагоизвлечения водорастворимых систем. Помимо того, давление в системе не превышало 10 кПа, что позволило обеспечить процесс выпаривания при минимальной подводимой мощности электромагнитного поля и, соответственно, при относительно низкой температуре 40 °C. В результате были получены опытные образцы готового продукта, обладающего достаточно высоким качеством в сравнении с результатами классических выпарных аппаратов. Конечная концентрация сухих веществ доходит до 80–85 °brix, что на 20–25 % выше, чем в традиционных установках.

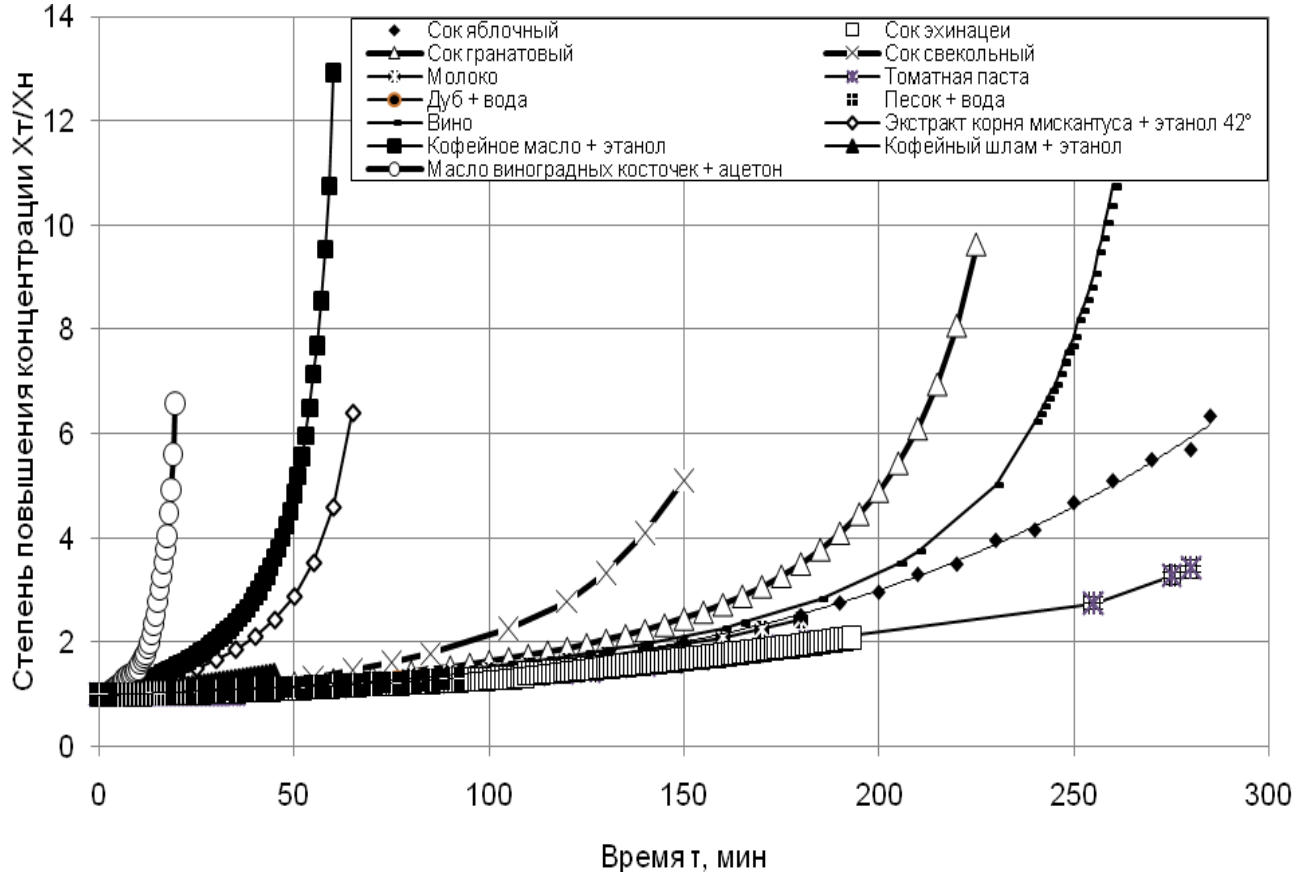


Рисунок 4.101. Изменение концентрации сухих веществ во времени в зависимости от типа продукта

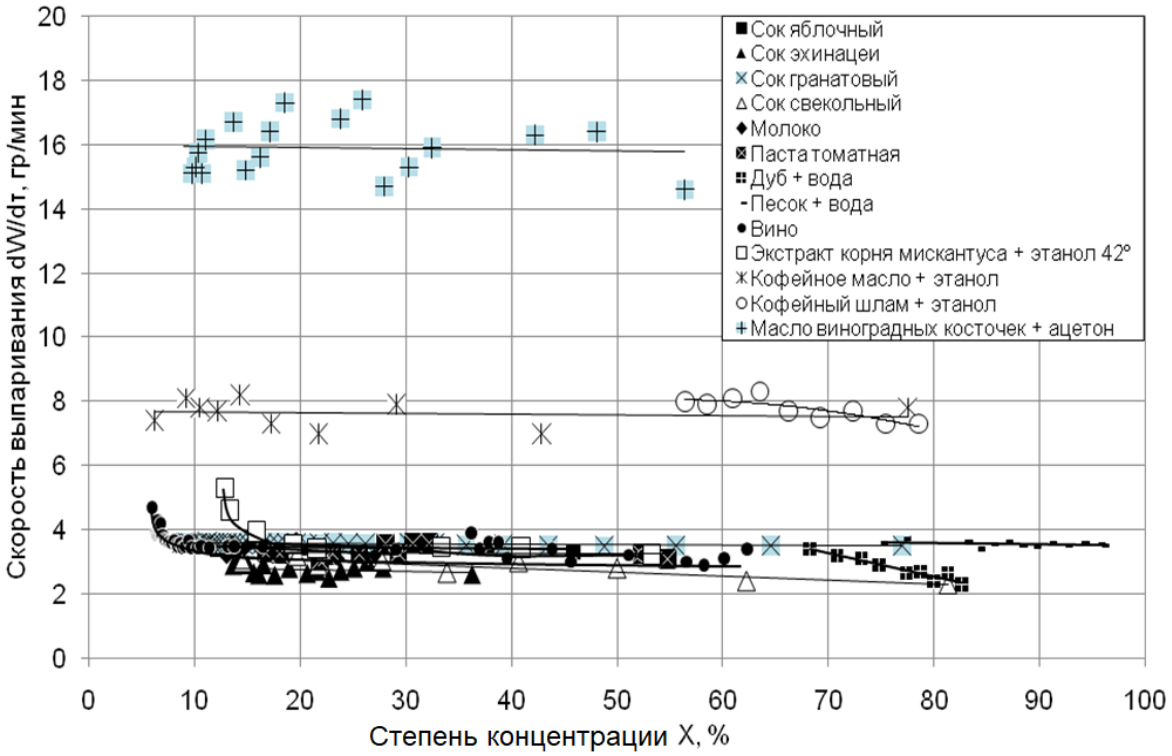


Рисунок 4.102. Зависимость скорости выпаривания от концентрации сухих веществ для различных систем

4.5.2. Обобщение результатов исследований

Обобщение проводилось методом теории подобия. Для каждого опыта определялось число энергетического действия:

$$Bu = \frac{N_T}{W_T \cdot r_T} \tag{4.37}$$

где Bu – число энергетического действия;

N_T – текущее значение мощности СВЧ поля, Вт;

W_T – текущее значение скорости влагоизвлечения, кг/с;

r_T – текущее значение скрытой теплоты парообразования, Дж/кг.

Рассчитывался параметрический комплекс безразмерного давления:

$$P = \frac{P_T}{P_Б} \tag{4.38}$$

где P_T – текущее значение давления, кПа;

$P_Б$ – базовое значение давления ($P_Б$ = 5 кПа);

и симплекс скрытых теплот фазового перехода:

$$R = \frac{r_T}{r_Б} \tag{4.39}$$

где r_T – текущее значение скрытой теплоты парообразования, Дж/кг;

$r_Б$ – базовое значение теплоты парообразования ($r_{ацетона}$ = 525 кДж/кг).

Результаты обработки всего массива опытных точек приведены в таблице 4.31.

Таблица 4.31. Сводка расчетных данных по выпариванию в СВЧ поле

№	Продукт	$t_{пара}$, °С	P, МПа	N_i, Вт	W_T, г/мин	$W \cdot 10^3$	Bu	P	R
1	Яблочный сок	24	0,01	200	3,4	0,057	1,47	2	4,57
2		24	0,01	200	3,36	0,056	1,49	2	4,57
3		24	0,01	200	3,34	0,056	1,50	2	4,57
4		25	0,01	200	3,34	0,056	1,50	2	4,57
5		23	0,01	200	3,58	0,060	1,40	2	4,57
6		25	0,01	200	3,75	0,063	1,33	2	4,57
7		24	0,01	200	3,6	0,060	1,39	2	4,57
8		25	0,01	200	3,5	0,058	1,43	2	4,57
9		24	0,01	200	3,6	0,060	1,39	2	4,57
10		25	0,01	200	3,52	0,059	1,42	2	4,57
11		23	0,01	200	3,38	0,056	1,48	2	4,57
12		25	0,01	200	3,37	0,056	1,49	2	4,57
13		23	0,01	200	3,47	0,058	1,44	2	4,57
14		24	0,01	200	3,5	0,058	1,43	2	4,57
15		23	0,01	200	3,3	0,055	1,52	2	4,57
16		24	0,01	200	3,16	0,053	1,58	2	4,57
17		23	0,01	200	3,18	0,053	1,58	2	4,57
18		24	0,01	200	3,2	0,053	1,56	2	4,57
19		24	0,01	200	3,2	0,053	1,56	2	4,57
20		24	0,01	200	3,1	0,052	1,61	2	4,57
21		24	0,01	200	3,24	0,054	1,55	2	4,57
22		26	0,01	330	5,43	0,090	1,52	2	4,57

Продолжение таблицы 4.31.

№	Продукт	$t_{пара}$, °С	P, МПа	N_i, Вт	W_T, г/мин	$W \cdot 10^3$	Bu	P	R
23	Яблочный сок	26	0,01	330	5,49	0,091	1,51	2	4,57
24		26	0,01	330	5,43	0,090	1,52	2	4,57
25		26	0,01	330	5,58	0,093	1,48	2	4,57
26		26	0,01	330	5,56	0,093	1,49	2	4,57
27		27	0,01	330	5,62	0,094	1,47	2	4,57
28		26	0,01	330	5,52	0,092	1,50	2	4,57
29		27	0,01	330	5,76	0,096	1,43	2	4,57
30		27	0,01	330	5,76	0,096	1,43	2	4,57
31		27	0,01	330	5,76	0,096	1,43	2	4,57
32		27	0,01	330	5,6	0,093	1,47	2	4,57
33		27	0,01	330	5,5	0,092	1,50	2	4,57
34		26	0,01	330	5,62	0,094	1,47	2	4,57
35		27	0,01	330	4,95	0,083	1,67	2	4,57
36		26	0,01	330	5,82	0,097	1,42	2	4,57
37		26	0,01	330	5,78	0,096	1,43	2	4,57
38		26	0,01	330	5,32	0,089	1,55	2	4,57
39		26	0,01	330	5,4	0,090	1,53	2	4,57
40		26	0,01	330	6	0,100	1,38	2	4,57
41		26	0,01	330	4,65	0,077	1,78	2	4,57
42		27	0,01	330	6	0,100	1,38	2	4,57
43		26	0,01	330	5	0,083	1,65	2	4,57
44		27	0,01	330	5,2	0,087	1,59	2	4,57
45		27	0,01	330	5,3	0,088	1,56	2	4,57
46		26	0,01	350	7,58	0,126	1,16	2	4,57
47		26	0,01	350	7,98	0,133	1,10	2	4,57
48		26	0,01	350	7,36	0,123	1,19	2	4,57
49		26	0,01	350	7,10	0,118	1,23	2	4,57
50		26	0,01	350	7,06	0,118	1,24	2	4,57
51		28	0,01	350	8,15	0,136	1,07	2	4,57
52		28	0,01	350	7,74	0,129	1,13	2	4,57
53		27	0,01	350	8,00	0,133	1,09	2	4,57

Продолжение таблицы 4.31.

№	Продукт	$t_{пара}$, °С	P, МПа	N_i, Вт	W_T, г/мин	$W \cdot 10^3$	Bu	P	R
54		27	0,01	350	7,71	0,129	1,14	2	4,57
55		27	0,01	350	7,71	0,129	1,14	2	4,57
56		27	0,01	350	7,76	0,129	1,13	2	4,57
57		27	0,01	350	7,34	0,122	1,19	2	4,57
58		27	0,01	350	7,66	0,128	1,14	2	4,57
59		27	0,01	350	7,40	0,123	1,18	2	4,57
60		33	0,01	500	10,89	0,181	1,15	2	4,57
61		33	0,01	500	10,32	0,172	1,21	2	4,57
62		34	0,01	500	10,15	0,169	1,23	2	4,57
63		36	0,01	500	9,7	0,162	1,29	2	4,57
64		34	0,01	500	10,83	0,180	1,16	2	4,57
65		33	0,01	500	10,45	0,174	1,20	2	4,57
66		35	0,01	500	10,59	0,177	1,18	2	4,57
67		34	0,01	500	10,1	0,168	1,24	2	4,57
68		33	0,01	500	9,97	0,166	1,25	2	4,57
69		33	0,01	500	10,47	0,174	1,20	2	4,57
70		34	0,01	500	9,85	0,164	1,27	2	4,57
71		37	0,01	700	12,1	0,202	1,45	2	4,57
72		37	0,01	700	12,7	0,212	1,38	2	4,57
73		37	0,01	700	12,82	0,214	1,37	2	4,57
74		37	0,01	700	12,68	0,211	1,38	2	4,57
75		37	0,01	700	12,66	0,211	1,38	2	4,57
76		37	0,01	700	12,1	0,202	1,45	2	4,57
77		37	0,01	700	12,2	0,203	1,44	2	4,57
78		38	0,01	700	12,04	0,201	1,46	2	4,57
79		37	0,01	700	12,2	0,203	1,44	2	4,57
80		37	0,01	700	12,1	0,202	1,45	2	4,57
81		38	0,01	700	12,72	0,212	1,38	2	4,57
82		38	0,01	700	12,18	0,203	1,44	2	4,57
83		35	0,01	900	16,4	0,273	1,37	2	4,57

Продолжение таблицы 4.31.

№	Продукт	$t_{пара}$, °С	P, МПа	N_i, Вт	W_T, г/мин	$W \cdot 10^3$	Bu	P	R
84	Яблочный сок	36	0,01	900	16,3	0,272	1,38	2	4,57
85		36	0,01	900	16,5	0,275	1,37	2	4,57
86		36	0,01	900	16,3	0,272	1,38	2	4,57
87		36	0,01	900	16,5	0,275	1,37	2	4,57
88		37	0,01	900	16,25	0,271	1,39	2	4,57
89		37	0,01	900	16,21	0,270	1,39	2	4,57
90		37	0,01	900	16,15	0,269	1,40	2	4,57
91		37	0,01	900	16	0,267	1,41	2	4,57
92		37	0,01	900	16,1	0,268	1,40	2	4,57
93		37	0,01	900	16	0,267	1,41	2	4,57
94		37	0,01	900	16,3	0,272	1,38	2	4,57
95		37	0,01	900	16	0,267	1,41	2	4,57
96		38	0,01	900	15,9	0,265	1,42	2	4,57
97		38	0,01	900	15,8	0,263	1,43	2	4,57
98		29	0,015	200	3,1	0,052	1,61	3	4,57
99		30	0,015	200	3,05	0,051	1,64	3	4,57
100		31	0,015	200	3,08	0,051	1,63	3	4,57
101		32	0,015	200	2,98	0,050	1,68	3	4,57
102		32	0,015	200	3	0,050	1,67	3	4,57
103		33	0,015	200	2,93	0,049	1,71	3	4,57
104		33	0,015	200	2,98	0,050	1,68	3	4,57
105		34	0,015	200	3,01	0,050	1,66	3	4,57
106		34	0,015	200	2,96	0,049	1,69	3	4,57
107		34	0,015	200	2,95	0,049	1,70	3	4,57
108		35	0,015	200	2,92	0,049	1,71	3	4,57
109		35	0,015	200	2,99	0,050	1,67	3	4,57
110		35	0,015	200	3	0,050	1,67	3	4,57
111		35	0,015	200	2,94	0,049	1,70	3	4,57
112		35	0,015	200	3,01	0,050	1,66	3	4,57
113		35	0,015	200	2,96	0,049	1,69	3	4,57

Продолжение таблицы 4.31.

№	Продукт	$t_{пара}$, °С	P, МПа	N_i, Вт	W_T, г/мин	$W \cdot 10^3$	Bu	P	R
114	Яблочный сок	35	0,015	200	3	0,050	1,67	3	4,57
115		35	0,015	200	2,93	0,049	1,71	3	4,57
116		35	0,015	200	2,92	0,049	1,71	3	4,57
117		35	0,015	200	2,99	0,050	1,67	3	4,57
118		35	0,015	200	3	0,050	1,67	3	4,57
119		35	0,015	200	2,93	0,049	1,71	3	4,57
120		35	0,015	200	2,98	0,050	1,68	3	4,57
121		35	0,015	200	2,92	0,049	1,71	3	4,57
122		39	0,02	200	2,82	0,047	1,77	4	4,57
123		40	0,02	200	2,8	0,047	1,79	4	4,57
124		40	0,02	200	2,77	0,046	1,81	4	4,57
125		40	0,02	200	2,87	0,048	1,74	4	4,57
126		40	0,02	200	2,9	0,048	1,73	4	4,57
127		40	0,02	200	2,8	0,047	1,79	4	4,57
128		40	0,02	200	2,87	0,048	1,74	4	4,57
129		40	0,02	200	2,73	0,045	1,83	4	4,57
130		40	0,02	200	2,8	0,047	1,79	4	4,57
131		40	0,02	200	2,84	0,047	1,76	4	4,57
132		40	0,02	200	2,8	0,047	1,79	4	4,57
133		41	0,02	200	2,76	0,046	1,81	4	4,57
134		41	0,02	200	2,71	0,045	1,85	4	4,57
135		40	0,02	200	2,7	0,045	1,85	4	4,57
136		41	0,02	200	2,7	0,045	1,86	4	4,57
137	Сок эхинацеи	24	0,01	200	2,88	0,048	1,74	2	4,57
138		24	0,01	200	2,98	0,050	1,68	2	4,57
139		25	0,01	200	2,9	0,048	1,73	2	4,57
140		23	0,01	200	2,65	0,044	1,89	2	4,57
141		24	0,01	200	2,59	0,043	1,93	2	4,57
142		25	0,01	200	2,9	0,048	1,73	2	4,57
143		24	0,01	200	2,58	0,043	1,94	2	4,57

Продолжение таблицы 4.31.

№	Продукт	$t_{пара}$, °С	P, МПа	N_i, Вт	W_T, г/мин	$W \cdot 10^3$	Bu	P	R
144	Сок эхинацеи	24	0,01	200	2,79	0,047	1,79	2	4,57
145		25	0,01	200	2,63	0,044	1,90	2	4,57
146		24	0,01	200	2,7	0,045	1,85	2	4,57
147		24	0,01	200	2,48	0,041	2,02	2	4,57
148		25	0,01	200	2,7	0,045	1,85	2	4,57
149		24	0,01	200	2,8	0,047	1,79	2	4,57
150		25	0,01	200	3	0,050	1,67	2	4,57
151		24	0,01	200	2,8	0,047	1,79	2	4,57
152		25	0,01	200	2,6	0,043	1,93	2	4,57
153	Гранатовый сок	30	0,01	200	3,56	0,059	1,41	2	4,57
154		31	0,01	200	3,58	0,060	1,40	2	4,57
155		32	0,01	200	3,59	0,060	1,40	2	4,57
156		31	0,01	200	3,57	0,059	1,40	2	4,57
157		30	0,01	200	3,54	0,059	1,41	2	4,57
158		33	0,01	200	3,57	0,059	1,40	2	4,57
159		32	0,01	200	3,58	0,060	1,40	2	4,57
160		33	0,01	200	3,57	0,060	1,40	2	4,57
161		33	0,01	200	3,56	0,059	1,41	2	4,57
162		32	0,01	200	3,57	0,060	1,40	2	4,57
163		34	0,01	200	3,59	0,060	1,40	2	4,57
164		35	0,01	200	3,57	0,059	1,40	2	4,57
165		34	0,01	200	3,52	0,059	1,42	2	4,57
166		35	0,01	200	3,52	0,059	1,42	2	4,57
167		36	0,01	200	3,5	0,058	1,43	2	4,57
168		35	0,01	200	3,49	0,058	1,44	2	4,57
169		34	0,01	200	3,5	0,058	1,43	2	4,57
170		35	0,01	200	3,51	0,058	1,43	2	4,57
171		35	0,01	200	3,50	0,058	1,43	2	4,57
172		35	0,01	200	3,48	0,058	1,44	2	4,57

Продолжение таблицы 4.31.

№	Продукт	$t_{пара}$, °С	P, МПа	N_i, Вт	W_T, г/мин	$W \cdot 10^3$	Bu	P	R
173	Свекольный сок	26	0,01	200	3	0,050	1,67	2	4,57
174		27	0,01	200	3,2	0,053	1,56	2	4,57
175		26	0,01	200	2,9	0,048	1,73	2	4,57
176		27	0,01	200	3,05	0,051	1,64	2	4,57
177		28	0,01	200	3	0,050	1,67	2	4,57
178		27	0,01	200	2,8	0,047	1,79	2	4,57
179	Томатная паста	30	0,01	200	3,27	0,055	1,53	2	4,57
180		31	0,01	200	3,25	0,054	1,54	2	4,57
181		30	0,01	200	3,05	0,051	1,64	2	4,57
182		32	0,01	200	3,2	0,053	1,56	2	4,57
183		33	0,01	200	3,25	0,054	1,54	2	4,57
184		32	0,01	200	3,23	0,054	1,55	2	4,57
185		33	0,01	200	3,56	0,059	1,41	2	4,57
186		33	0,01	200	3,26	0,054	1,54	2	4,57
187		34	0,01	200	3,6	0,060	1,39	2	4,57
188		33	0,01	200	3,59	0,060	1,39	2	4,57
189		34	0,01	200	3,25	0,054	1,54	2	4,57
190		34	0,01	200	3,08	0,051	1,62	2	4,57
191	Молоко	24	0,01	200	3,17	0,053	1,58	2	4,57
192		25	0,01	200	3,6	0,060	1,39	2	4,57
193		23	0,01	200	3,5	0,058	1,43	2	4,57
194		25	0,01	200	3,4	0,057	1,47	2	4,57
195		23	0,01	200	3,6	0,060	1,39	2	4,57
196		24	0,01	200	3,6	0,060	1,39	2	4,57
197		23	0,01	200	3,5	0,058	1,43	2	4,57
198		24	0,01	200	3,3	0,055	1,52	2	4,57
199		23	0,01	200	3,7	0,062	1,35	2	4,57
200		24	0,01	200	3,3	0,055	1,52	2	4,57
201		24	0,01	200	3,1	0,052	1,61	2	4,57

Продолжение таблицы 4.31.

№	Продукт	$t_{пара}$, °С	P, МПа	N_i, Вт	W_T, г/мин	$W \cdot 10^3$	Bu	P	R
202	Молоко	25	0,01	200	3,3	0,055	1,52	2	4,57
203		24	0,01	200	3,2	0,053	1,56	2	4,57
204		25	0,01	200	3,3	0,055	1,52	2	4,57
205	Дуб + вода	32	0,01	200	3,4	0,057	1,47	2	4,57
206		31	0,01	200	3,2	0,053	1,56	2	4,57
207		32	0,01	200	3,1	0,052	1,61	2	4,57
208		33	0,01	200	2,9	0,048	1,73	2	4,57
209		33	0,01	200	2,65	0,044	1,89	2	4,57
210		34	0,01	200	2,7	0,045	1,85	2	4,57
211		33	0,01	200	2,4	0,040	2,09	2	4,57
212		34	0,01	200	2,65	0,044	1,89	2	4,57
213		34	0,01	200	2,3	0,038	2,18	2	4,57
214	Песок + вода	22	0,01	200	3,6	0,060	1,39	2	4,57
215		22	0,01	200	3,7	0,062	1,35	2	4,57
216		22	0,01	200	3,62	0,060	1,38	2	4,57
217	Песок + вода	22	0,01	200	3,4	0,057	1,47	2	4,57
218		22	0,01	200	3,56	0,059	1,41	2	4,57
219		22	0,01	200	3,64	0,061	1,38	2	4,57
220		22	0,01	200	3,52	0,059	1,42	2	4,57
221		22	0,01	200	3,46	0,058	1,45	2	4,57
222		23	0,01	200	3,6	0,060	1,39	2	4,57
223		23	0,01	200	3,52	0,059	1,42	2	4,57
224		23	0,01	200	3,58	0,060	1,40	2	4,57
225		23	0,01	200	3,56	0,059	1,41	2	4,57
226		23	0,01	200	3,5	0,058	1,43	2	4,57
227	Вино (10 % этанола)	23	0,01	200	3,84	0,064	1,39	2	4,27
228		23	0,01	200	3,72	0,062	1,44	2	4,27
229		24	0,01	200	3,68	0,061	1,45	2	4,27
230		25	0,01	200	3,64	0,061	1,47	2	4,27
231		25	0,01	200	3,62	0,060	1,48	2	4,27
232		25	0,01	200	3,58	0,060	1,50	2	4,27

Продолжение таблицы 4.31.

№	Продукт	$t_{пара}$, °С	P, МПа	N_i, Вт	W_T, г/мин	$W \cdot 10^3$	Bu	P	R
233	Вино (10 % этанола)	26	0,01	200	3,68	0,061	1,45	2	4,27
234		26	0,01	200	3,52	0,059	1,52	2	4,27
235		27	0,01	200	3,48	0,058	1,54	2	4,27
236		27	0,01	200	3,56	0,059	1,50	2	4,27
237		28	0,01	200	3,44	0,057	1,56	2	4,27
238		28	0,01	200	3,48	0,058	1,54	2	4,27
239		28	0,01	200	3,68	0,061	1,45	2	4,27
240		29	0,01	200	3,44	0,057	1,56	2	4,27
241		28	0,01	200	3,45	0,058	1,55	2	4,27
242		28	0,01	200	3,5	0,058	1,53	2	4,27
243		29	0,01	200	3,45	0,058	1,55	2	4,27
244		27	0,01	200	3,475	0,058	1,54	2	4,27
245		28	0,01	200	3,48	0,058	1,54	2	4,27
246		29	0,01	200	3,46	0,058	1,55	2	4,27
247		28	0,01	200	3,38	0,056	1,58	2	4,27
248	Экстракт корня мискантуса (42 % этанола)	29	0,01	200	5,3	0,088	1,30	2	3,32
249		29	0,01	200	4,6	0,077	1,50	2	3,32
250		29	0,01	200	3,94	0,066	1,75	2	3,32
251		30	0,01	200	3,54	0,059	1,94	2	3,32
252		30	0,01	200	3,42	0,057	2,01	2	3,32
253		30	0,01	200	3,46	0,058	1,99	2	3,32
254		31	0,01	200	3,44	0,057	2,00	2	3,32
255		31	0,01	200	3,24	0,054	2,13	2	3,32
256	Экстракт кофейного масла (96 % этанола)	–	0,01	200	7,42	0,124	1,93	2	1,6
257		–	0,01	200	8,1	0,135	1,76	2	1,6
258		–	0,01	200	7,8	0,130	1,83	2	1,6
259		–	0,01	200	7,7	0,128	1,86	2	1,6
260		–	0,01	200	8,2	0,137	1,74	2	1,6
261		–	0,01	200	7,3	0,122	1,96	2	1,6

Продолжение таблицы 4.31.

№	Продукт	$t_{пара}$, °С	P, МПа	N_i, Вт	W_T, г/мин	$W \cdot 10^3$	Bu	P	R
262	Экстракт кофейного масла (96 % этанола)	–	0,01	200	7	0,117	2,04	2	1,6
263		–	0,01	200	7,9	0,132	1,81	2	1,6
264		–	0,01	200	7	0,117	2,04	2	1,6
265		–	0,01	200	7,8	0,130	1,83	2	1,6
266	Кофейный шлам + 96 % этанол	–	0,01	200	8	0,133	1,79	2	1,6
267		–	0,01	200	7,9	0,132	1,81	2	1,6
268		–	0,01	200	8,1	0,135	1,76	2	1,6
269		–	0,01	200	8,3	0,138	1,72	2	1,6
270		–	0,01	200	7,7	0,128	1,86	2	1,6
271		–	0,01	200	7,5	0,125	1,90	2	1,6
272		–	0,01	200	7,7	0,128	1,86	2	1,6
273		–	0,01	200	7,3	0,122	1,96	2	1,6
274		–	0,01	200	7,3	0,122	1,96	2	1,6
275	Экстракт масла виног косточек (Ацетон)	22	0,01	200	15,1	0,252	1,51	2	1
276		22	0,01	200	15,3	0,255	1,49	2	1
277		21	0,01	200	15,75	0,263	1,45	2	1
278		21	0,01	200	15,1	0,252	1,51	2	1
279	Экстракт масла виноградных косточек (Ацетон)	22	0,01	200	16,15	0,269	1,42	2	1
280		22	0,01	200	16,7	0,278	1,37	2	1
281		22	0,01	200	15,2	0,253	1,50	2	1
282		22	0,01	200	15,6	0,260	1,47	2	1
283		22	0,01	200	16,4	0,273	1,39	2	1
284		22	0,01	200	17,3	0,288	1,32	2	1
285		22	0,01	200	16,8	0,280	1,36	2	1
286		22	0,01	200	17,4	0,290	1,31	2	1
287		23	0,01	200	14,7	0,245	1,55	2	1
288		23	0,01	200	15,3	0,255	1,49	2	1
289		24	0,01	200	15,9	0,265	1,44	2	1
290		24	0,01	200	16,3	0,272	1,40	2	1
291		24	0,01	200	16,4	0,273	1,39	2	1
292		25	0,01	200	14,6	0,243	1,57	2	1

В результате обработки всей базы экспериментальных точек получено критериальное уравнение (4.40):

$$Bu = 1{,}32 \cdot P^{0{,}35} \cdot R^{-0{,}2} \qquad (4.40)$$

Адекватность полученного соотношения (4.40) проведена сравнением расчетных и экспериментальных значений чисел Bu для другой пищевой системы. Проведена серия опытов на системе «сахар – вода». Эта система не критична к уровню температур. Поэтому опыты проведены в широком диапазоне давлений (таблица 4.32).

Таблица 4.32. Диапазон экспериментальных данных при исследовании процесса выпаривания сахарного раствора при разных мощностях СВЧ поля

Объект	Раство-ритель	Давление, МПа	Темпе-ратура, °С	Мощность, Вт	Концентрация, %	
					начальная	конечная
Сахарный раствор	Вода	0,01–0,11	35–120	200–900	10	96

На основе полученных результатов были построены следующие зависимости (рисунок 4.103–4.107).

По мере повышения мощности магнетрона и давления внутри камеры растет и скорость конденсации (рисунок 4.103).

Полученные значения температур (рисунок 4.104) указывают на то, что эксперимент был проведен вплоть до критических режимов процесса выпаривания, что особо важно для проверки адекватности полученной модели.

Для достижения поставленной цели в ходе эксперимента мощность СВЧ поля повышалась до максимального значения, а давление вплоть до 0,11 МПа. Для сахарного раствора такие режимы не оказывают никакого негативного воздействия и технологически целесообразны. Есть целый ряд других пищевых систем, которые допускают обработку при повышенных температурах (рисунок 4.104).

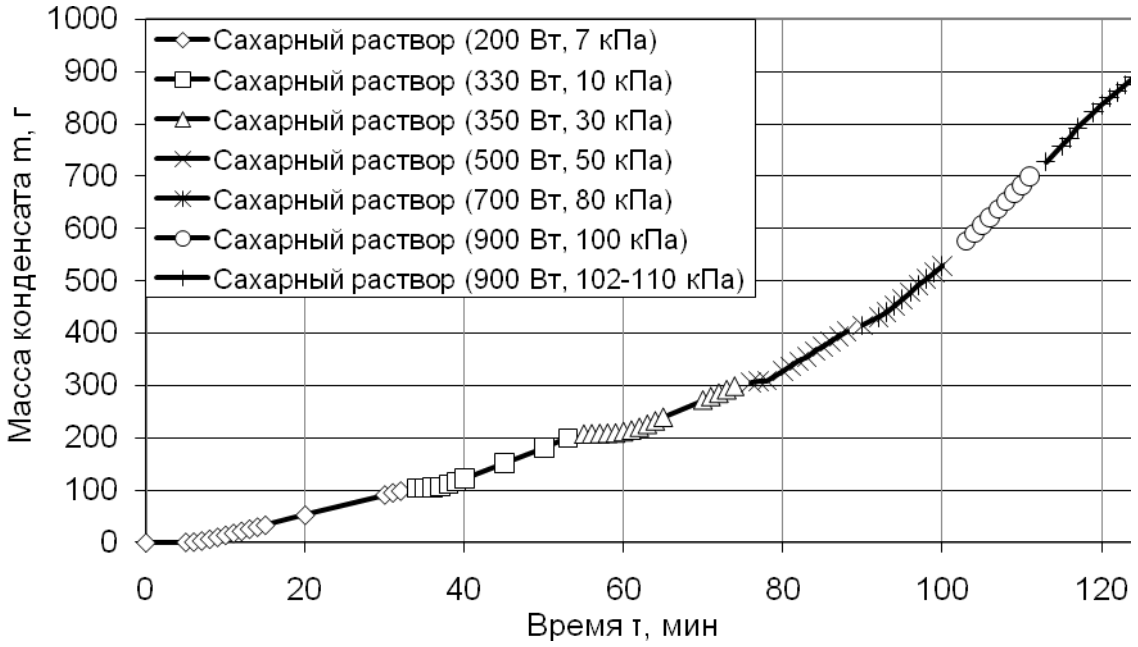


Рисунок 4.103. Влияние давления и мощности СВЧ поля на изменение массы конденсата во времени

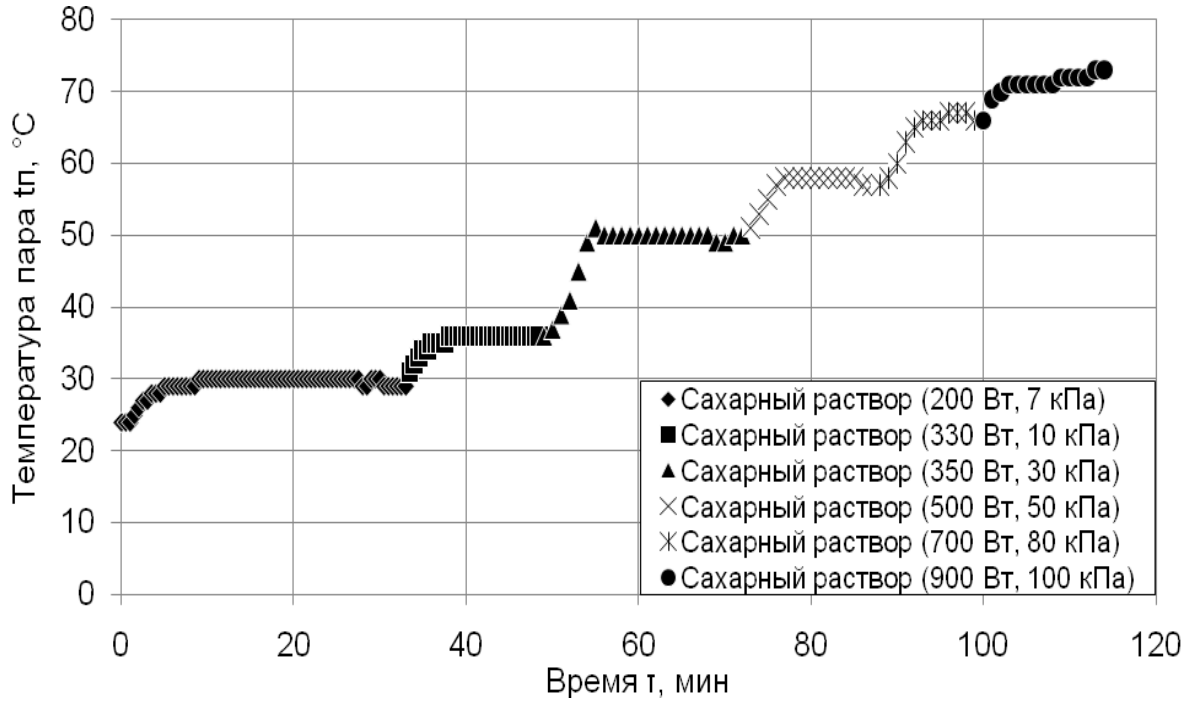


Рисунок 4.104. Влияние давления и мощности СВЧ поля на изменение температуры пара на выходе во времени

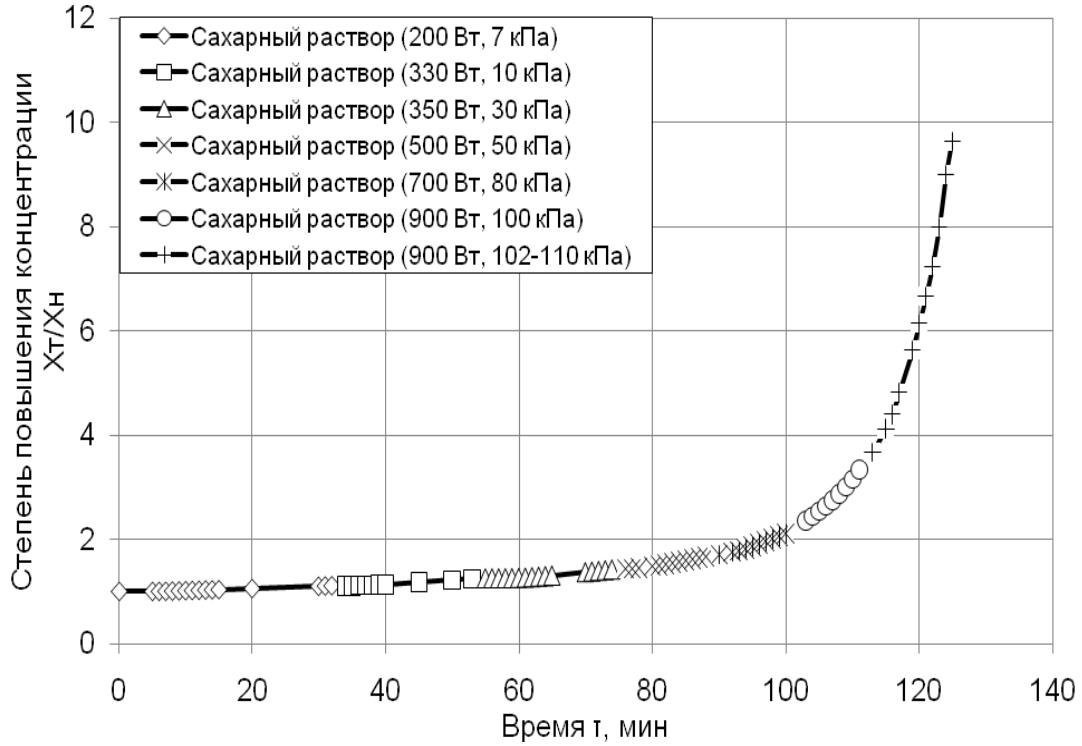


Рисунок 4.105. Влияние давления и мощности СВЧ поля на изменение концентрации сухих веществ во времени

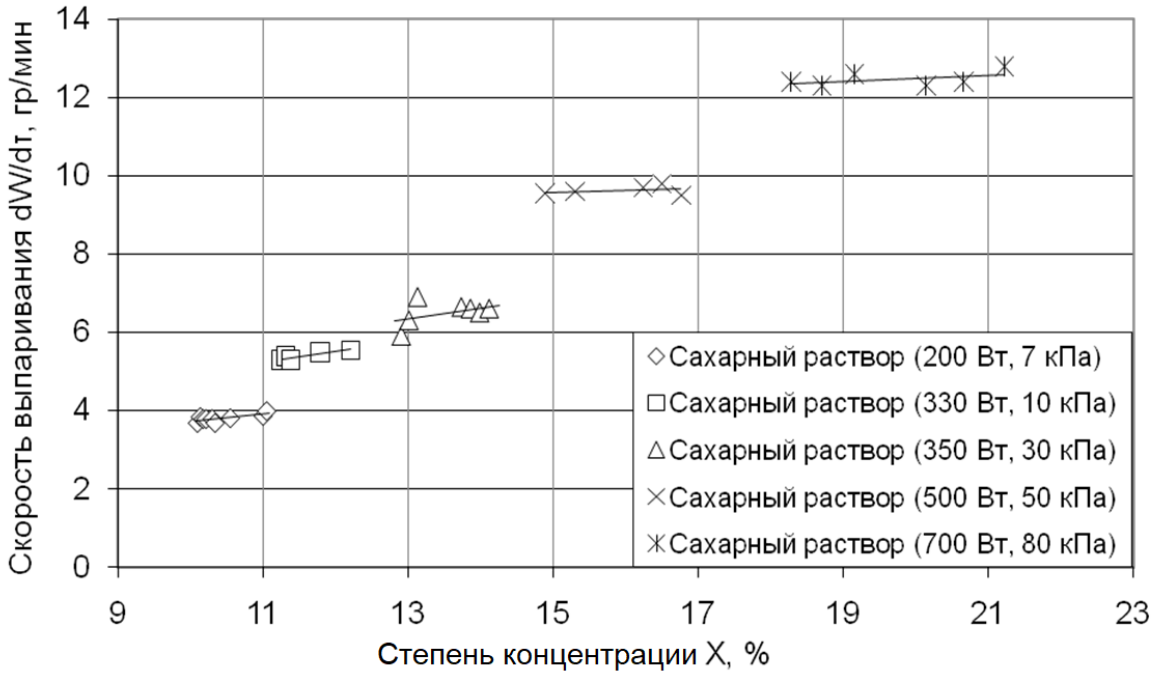


Рисунок 4.106. Влияние давления и мощности СВЧ поля на скорость выпаривания сахарного раствора

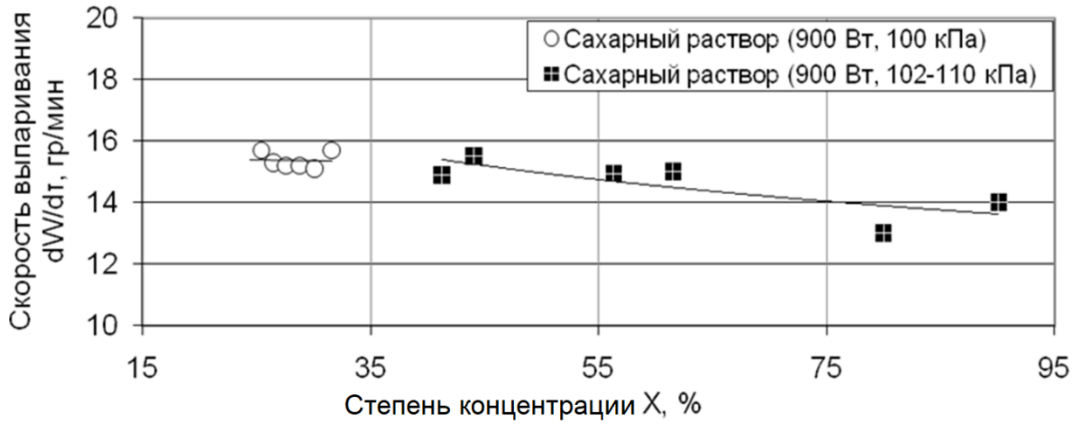


Рисунок 4.107. Влияние давления и мощности СВЧ поля на скорость выпаривания сахарного раствора

Полученная база экспериментальных данных (рисунок 4.106, 4.107) обработана методами теории подобия. Процедура обработки аналогична той, что использована выше, и включала этапы:

– расчет для каждой точки значений чисел энергетического действия Bu;

– расчет для каждой точки значений параметрического комплекса R;

– расчет для каждой точки значений $Bu/R^{-0,2}$.

Построение зависимости $Bu/R^{-0,2} = f(P)$ для сахарного раствора (рисунок 4.108).

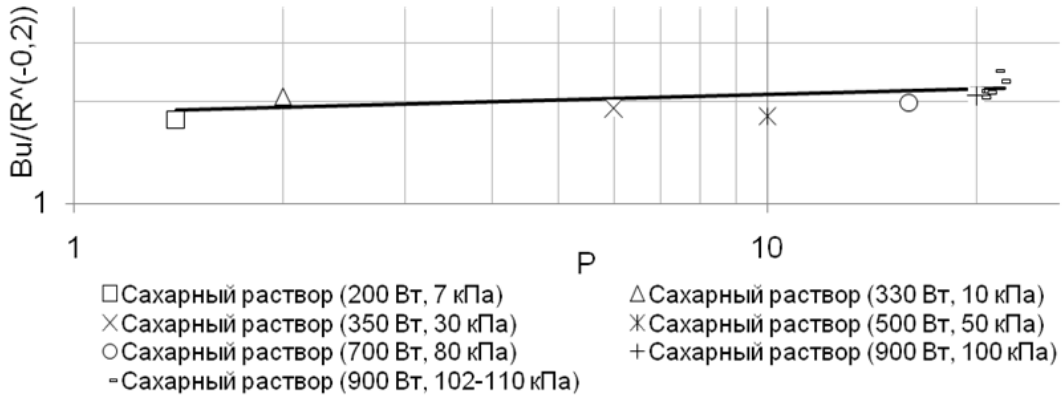


Рисунок 4.108. Зависимость $Bu/R^{-0,2} = f(P)$ для сахарного раствора

По данным (рисунок 4.108) найдена константа при безразмерном давлении в критериальном уравнении. Ее значение равно 0,07. По этому значению выполнена корректировка обобщенной модели:

$$Bu = 1,73 \cdot P^{0,07} \cdot R^{-0,2} \qquad (4.41)$$

Влияние давления по (4.41) оказалось меньше, чем по (4.40).

Однако диапазон изменения P в (4.40) значительно больше. Поэтому, модель (4.40) рекомендуется для практического применения как более универсальная. Для оценки погрешности расчета по модели (4.40) построена зависимость для всех исследованных выше пищевых систем и модельных растворов (рисунок 4.109).

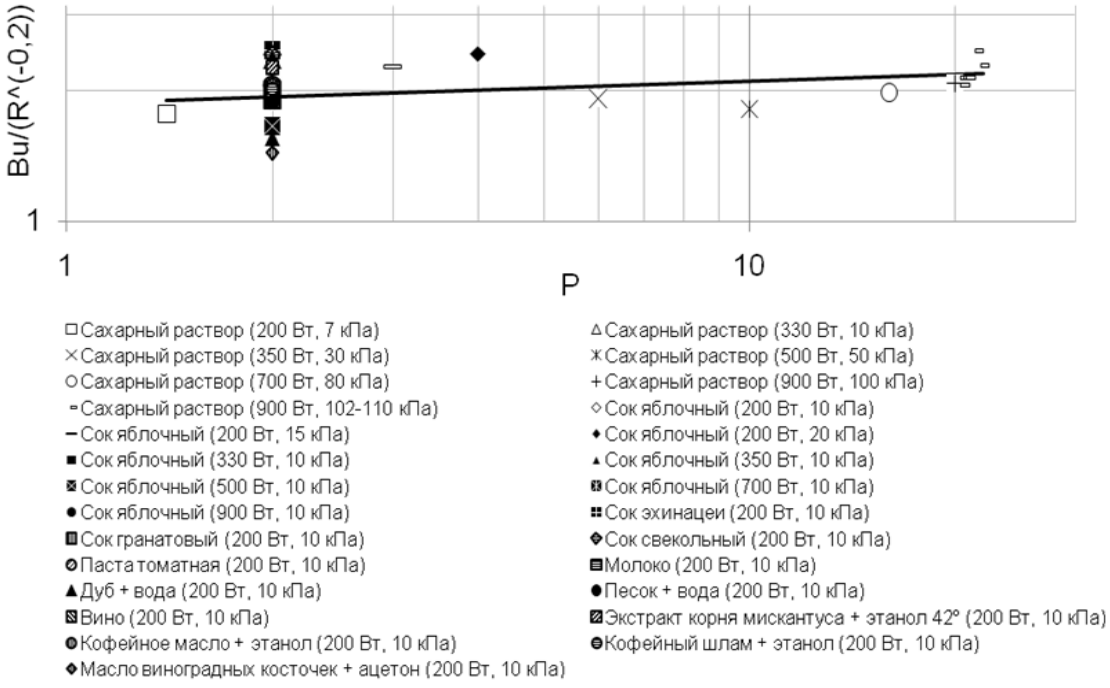


Рисунок 4.109. Зависимость $Bu/R^{-0,2} = f(P)$ для всех исследованных растворов

Модель (4.41) проверена на адекватность (рисунок 4.110).

По результатам экспериментов можно сделать два важных вывода:

1. В результате обобщения результатов экспериментального моделирования получена модель в критериальной форме, которая позволяет рассчитать микроволновую вакуум-выпарную установку периодического действия для растворов, содержащих полярные молекулы. Модель в диапазоне безразмерного

давления $2 \le P \le 22$, и при уровне безразмерной теплоты фазового перехода $1 \le R \le 4{,}56$ обеспечивает точность с максимальным отклонением в ±8 %.

2. Полученный опыт позволяет перейти к разработке микроволновой вакуум-выпарной установки непрерывного действия. Технически необходимо решить вопросы непрерывного поступления раствора в аппарат и его выгрузки.

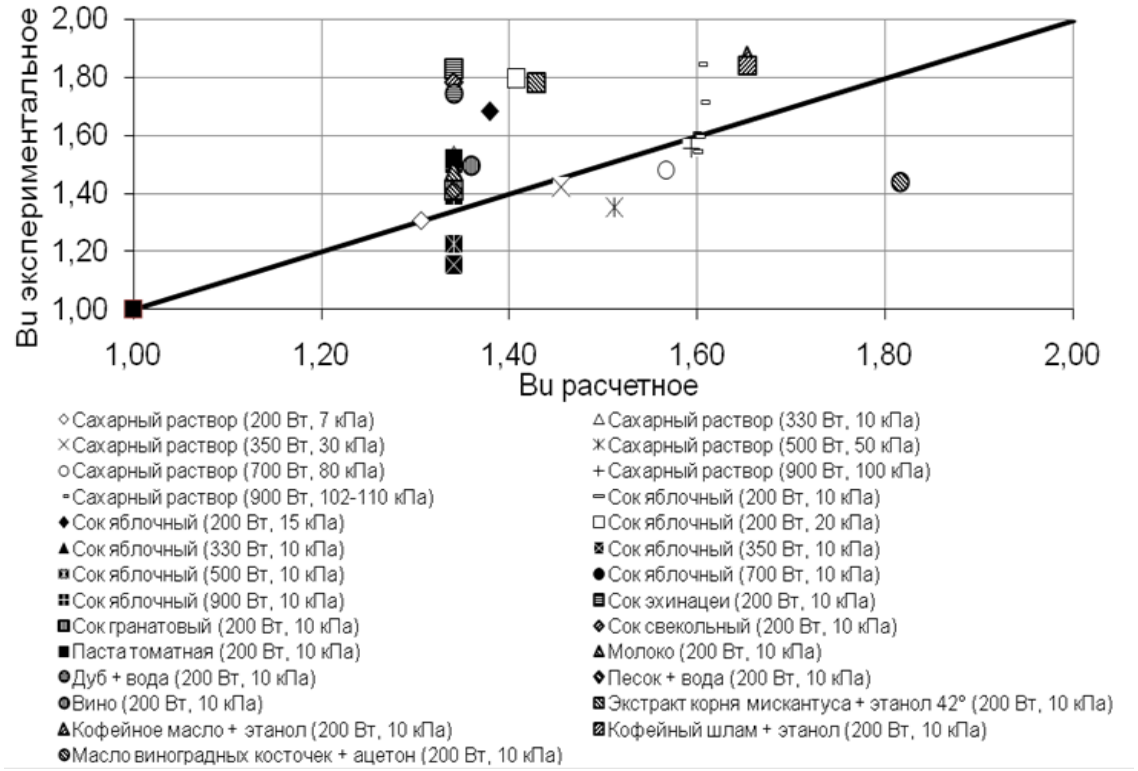


Рисунок 4.110. Сравнительная зависимость экспериментального числа энергетического действия $\left(Bu\right)$ с расчетом по (4.41)

4.6. Стендовые исследования СВЧ модуля вакуум-выпарной установки

4.6.1. Результаты стендовых исследований статики СВЧ вакуум-выпарного модуля

Основными задачами статических стендовых испытаний модуля являлись:

– проверка герметичности экспериментального стенда для возможности проведения опытов в условиях вакуума;

– определение тепловых потерь вакуум-выпарного модуля в окружающую среду;

– определение рационального уровня загрузки вакуум-выпарного модуля сырьем.

Для проверки герметичности системы использованы вакуум-насос и вакуумметр образцовый. С помощью вакуум-насоса было обеспечено разряжение в системе стенда до 10 кПа. По истечению суток показание вакуумметра оставалось практически неизменным, что свидетельствовало о надежности элементов системы и соединительных узлов.

Тепловая изоляция корпуса вакуум-выпарного модуля выполнена из слоя пенопласта толщиной 40 мм и теплоотражающего экрана из пенофола толщиной 3 мм. Температуры на поверхности теплоизоляции измерялись пирометром излучения. Опыты проводились при температуре окружающей среды, равной 19,5 °С. В ходе исследований модуль был заполнен водой, после чего включался магнетрон на полную мощность. Первая серия опытов проводилась в условиях вакуума в модуле, при температуре кипения 40 °С. В установившемся режиме определены (рисунок 4.111) участки поверхности, где температура $\left(t_{к1}\right)$ отличалась в пределах 2 °С. Вторая серия опытов соответствовала работе модуля при атмосферном давлении и температуре кипения 100 °С. Результаты измерений температур $\left(t_{к2}\right)$ приведены на (рисунок 4.111). Видно, что максимальные температуры у верхнего фланца модуля, а минимальные – у нижнего.

На основе полученных результатов для каждого участка поверхности, площадь которого F и разность температур $\left(t_{к1}-19{,}5\right)$ °С рассчитаны коэффициенты теплоотдачи $\left(\alpha\right)$ и тепловые потери:

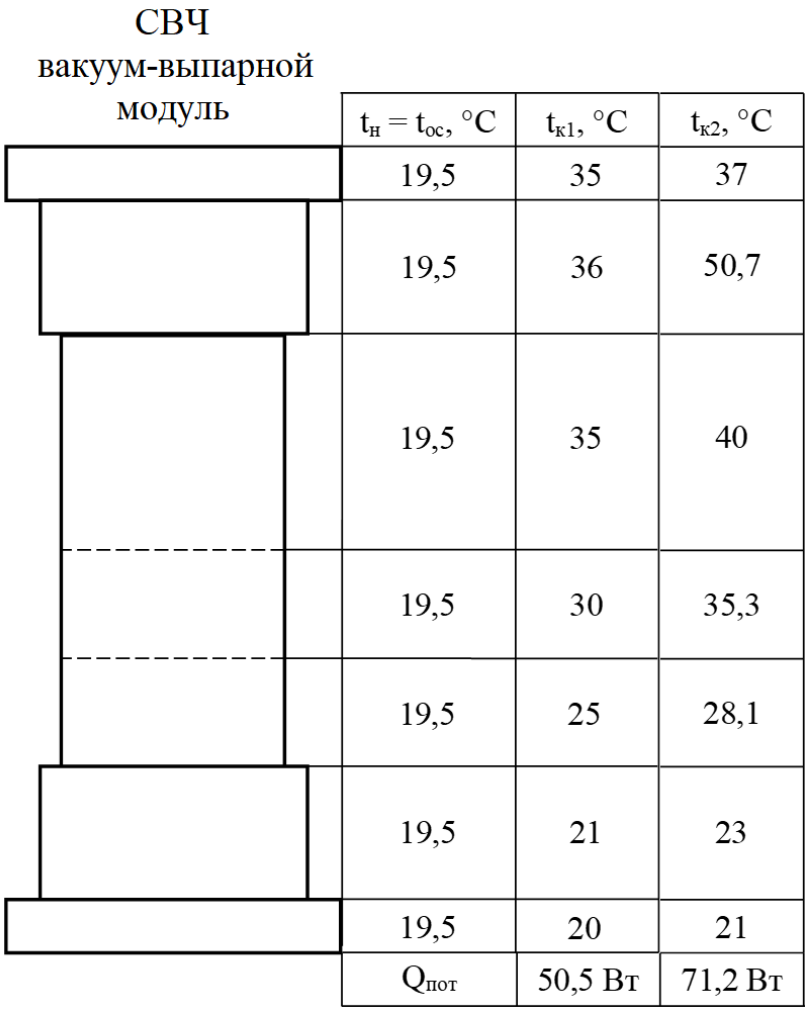
$$Q=\alpha\cdot F\cdot\Delta t \tag{4.42}$$

$$\alpha=9{,}7+0{,}07\cdot\Delta t \tag{4.43}$$

В результате определены значения локальных стоков теплоты от отдельных участков корпуса. Суммарные тепловые потери от корпуса вакуум-выпарного

модуля в окружающую среду при температурах продукта 40 °С и 100 °С составляют, соответственно, 50,5 Вт и 71,2 Вт.

Важным фактором эффективного использования энергии и надежной эксплуатации аппарата является уровень загрузки рабочего объема камеры раствором. Превышение нормального значения этого уровня при активном кипении жидкости может привести к забросу компонентов сырья в паропровод (что снизит качество гидролата). Снижение уровня жидкости в камере (особенно ниже уровня входного окна магнетрона) приведет к понижению КПД системы преобразования электромагнитной энергии.



$t_н = t_{ос}$, °С	$t_{к1}$, °С	$t_{к2}$, °С
19,5	35	37
19,5	36	50,7
19,5	35	40
19,5	30	35,3
19,5	25	28,1
19,5	21	23
19,5	20	21
$Q_{пот}$	50,5 Вт	71,2 Вт

Рисунок 4.111. Схема полей температур СВЧ вакуум-выпарного модуля

Установлено, что значение рационального уровня загрузки вакуум-выпарного модуля сырьем составляет 2,2 л (при общей емкости внутреннего объема камеры 2,4 л).

4.6.2. Результаты экспериментальных исследований СВЧ вакуум-выпарного модуля

Экспериментальные исследования 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. На этом объекте опыты можно проводить в широком диапазоне температур, поскольку длительная термическая нагрузка не является критичной для данного типа сырья. Третья серия – это исследования влияния типа продукта на паропроизводительность при постоянных максимальных значениях уровня подводимой мощности и вакуума. Классификация жидких гомогенных систем проводилась по типу растворителя на водо- и спиртосодержащие. В качестве водосодержащих были использованы: водный экстракт кофе и яблочный сок. К спиртосодержащим отнесены вино белое и водо–спиртовой экстракт дуба (42 % этанола).

Исследование влияния уровня подводимой мощности электромагнитного поля на паропроизводительность модуля

Начальный объем сахарного раствора составлял 2,2 литра. Диапазон экспериментальных данных указан в таблице 4.33.

Таблица 4.33. Диапазон экспериментальных данных при исследовании процесса выпаривания сахарного раствора при разных мощностях СВЧ поля

Объект	Раство-ритель	Давление, МПа	Темпе-ратура, °С	Мощность, Вт	Концентрация, %	
					начальная	конечная
Сахарный раствор	Вода	0,01	45–55	265–600	15	20

В результате проведенных опытов получены частные зависимости, приведенные на рисунках 4.112–4.115.

Характер роста массы конденсата выражается постоянной скоростью на протяжении всего процесса (рисунок 4.112). Данная особенность обусловлена

типом подводимой энергии, которая равномерно распределяется по всему объему продукта при ГУ II рода.

В опытах измерялась температура пара на выходе из СВЧ модуля (рисунок 4.113).

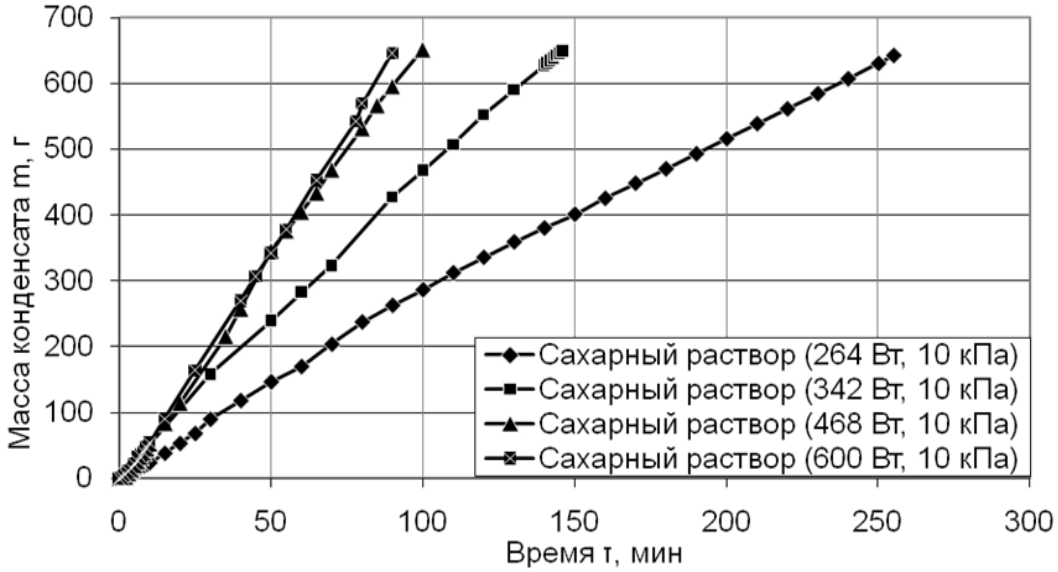


Рисунок 4.112. Влияние мощности электромагнитного поля на изменение массы конденсата во времени

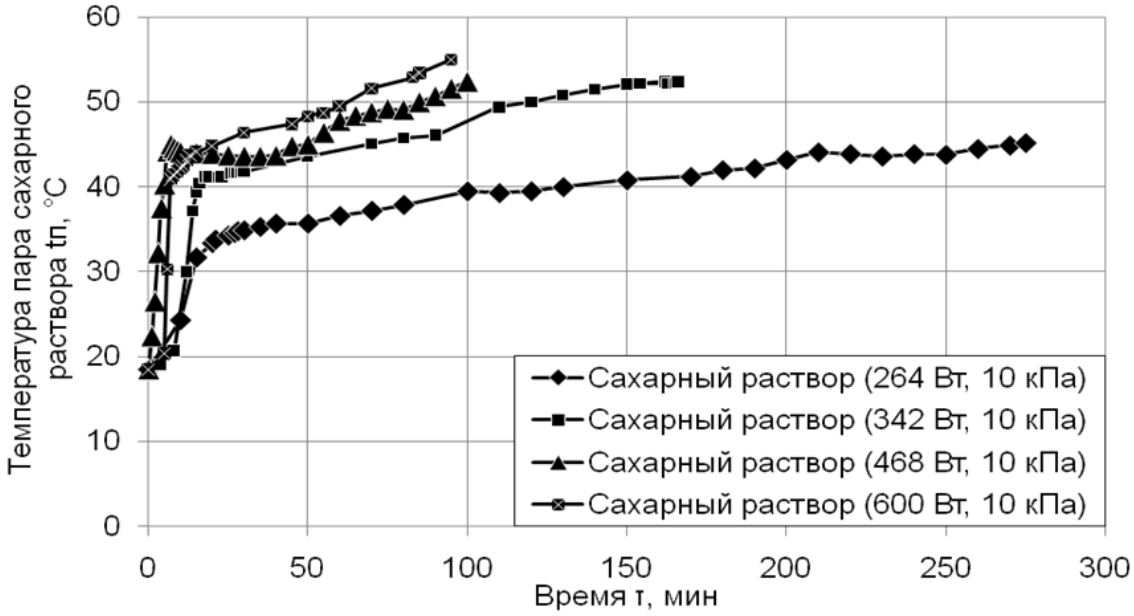


Рисунок 4.113. Влияние мощности электромагнитного поля на изменение температуры пара на выходе во времени

Полученные термограммы (рисунок 4.113) дают основание гарантировать возможность сохранения термолабильных компонентов в готовом продукте, что значительно повышает его ценность в сравнении с результатами традиционных технологий.

Исходя из полученных значений изменения массы конденсата, посредством уравнений материального баланса, были рассчитаны кинетические характеристики процесса выпаривания: изменения концентрации сухих веществ сахарного раствора (рисунок 4.114) и линии скорости выпаривания (рисунок 4.115).

Изменения паропроизводительности модуля четко коррелируются с уровнем подводимой мощности. Постоянные скорости объясняются особенностями объемного подвода энергии при использовании электромагнитного поля.

Следующая серия опытов направлена на изучения влияния уровня давления на кинетику выпаривания сахарного раствора.

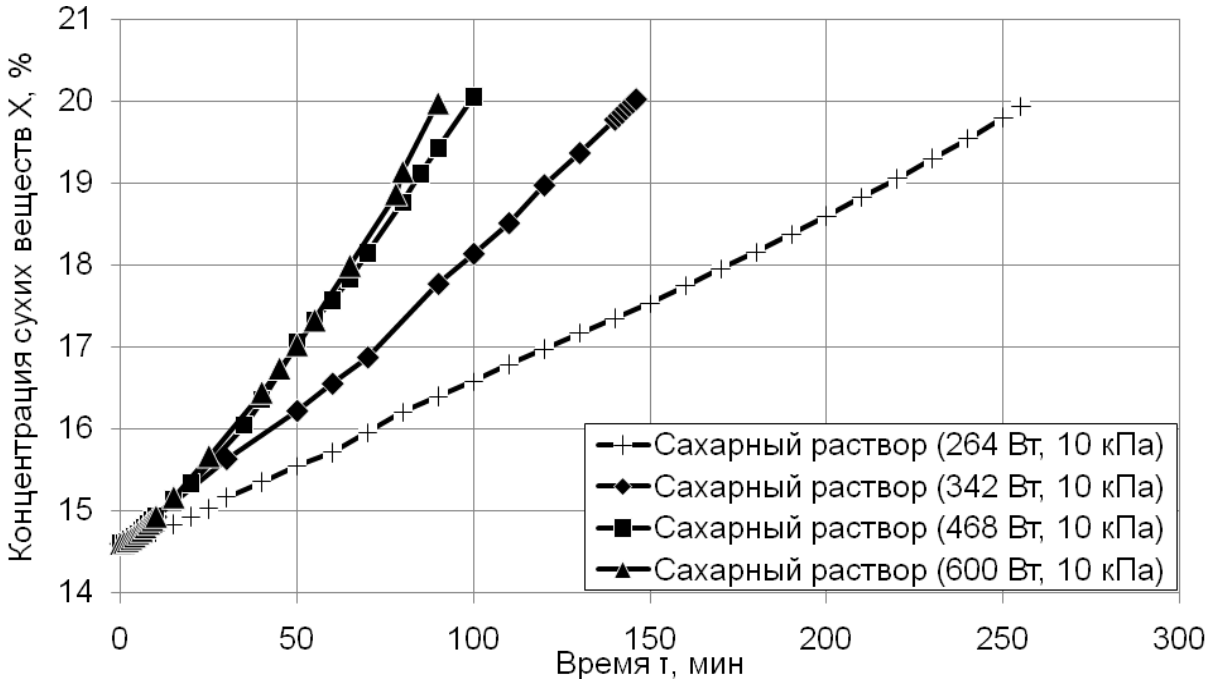


Рисунок 4.114. Влияние мощности электромагнитного поля на изменение концентрации сухих веществ во времени

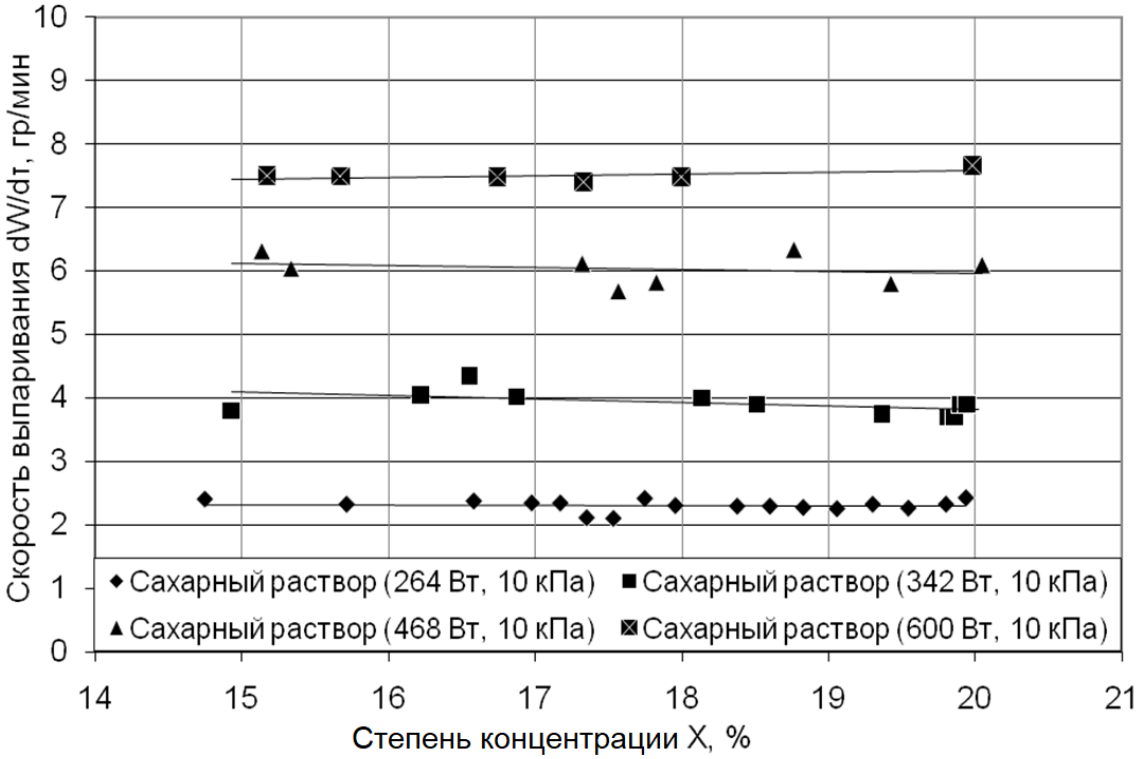


Рисунок 4.115. Влияние мощности электромагнитного поля на скорость выпаривания сахарного раствора

Исследование влияния величины давления на паропроизводительность модуля

При проведении опытов мощность подводимой энергии оставалась постоянной. Инструментом управления уровнем давления в системе являлся режим работы конденсатора – дистиллятора. Последовательное повышение давления в системе достигалось путем снижения мощности конденсатора – уменьшением расхода охлаждающей воды и повышением ее температуры. Диапазон экспериментальных данных при проведении второй серии экспериментальных исследований приведен в таблице 4.34.

Таблица 4.34. Диапазон экспериментальных данных при исследовании процесса выпаривания при разных давлениях

Объект	Раство-ритель	Давление, МПа	Темпе-ратура, °С	Мощность, Вт	Концентрация, %	
					начальная	конечная
Сахарный раствор	Вода	0,01–0,08	4–90	600	15	30

Полученные экспериментальные данные обработаны в виде зависимостей, приведенных ниже (рисунок 4.116–4.118).

Видно (рисунок 4.116), что с повышением давления в незначительной степени растет скорость увеличения массы конденсата.

Увеличение паропроизводительности с ростом давления объясняется снижением теплоты парообразования.

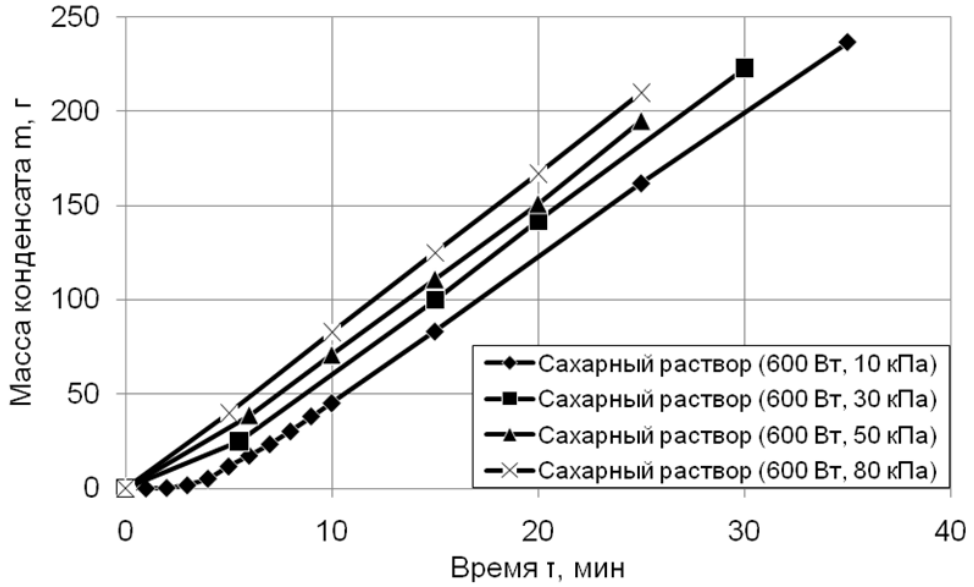


Рисунок 4.116. Влияние давления на изменение массы конденсата во времени

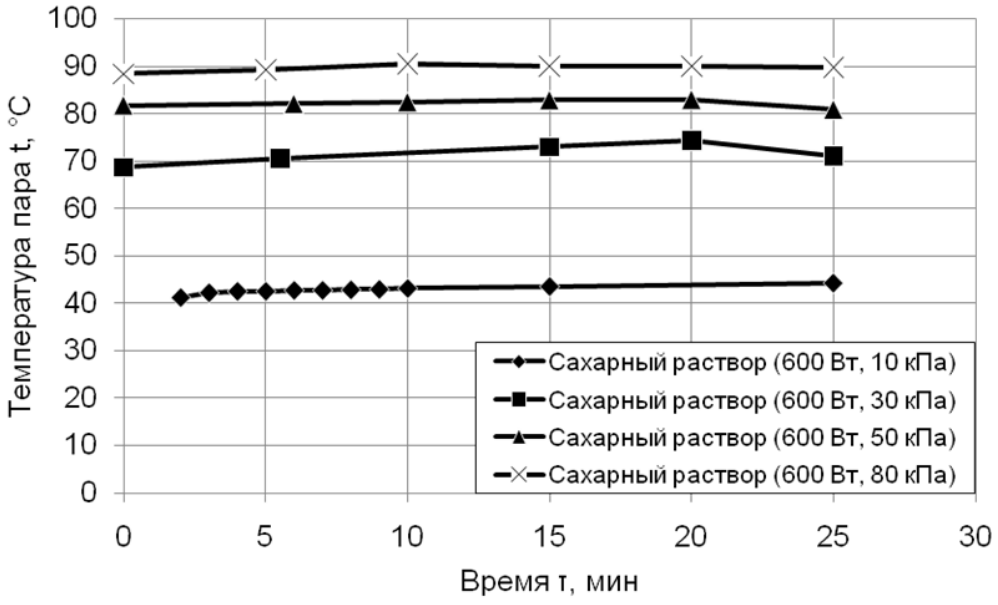


Рисунок 4.117. Влияние давления на изменение температуры пара на выходе во времени

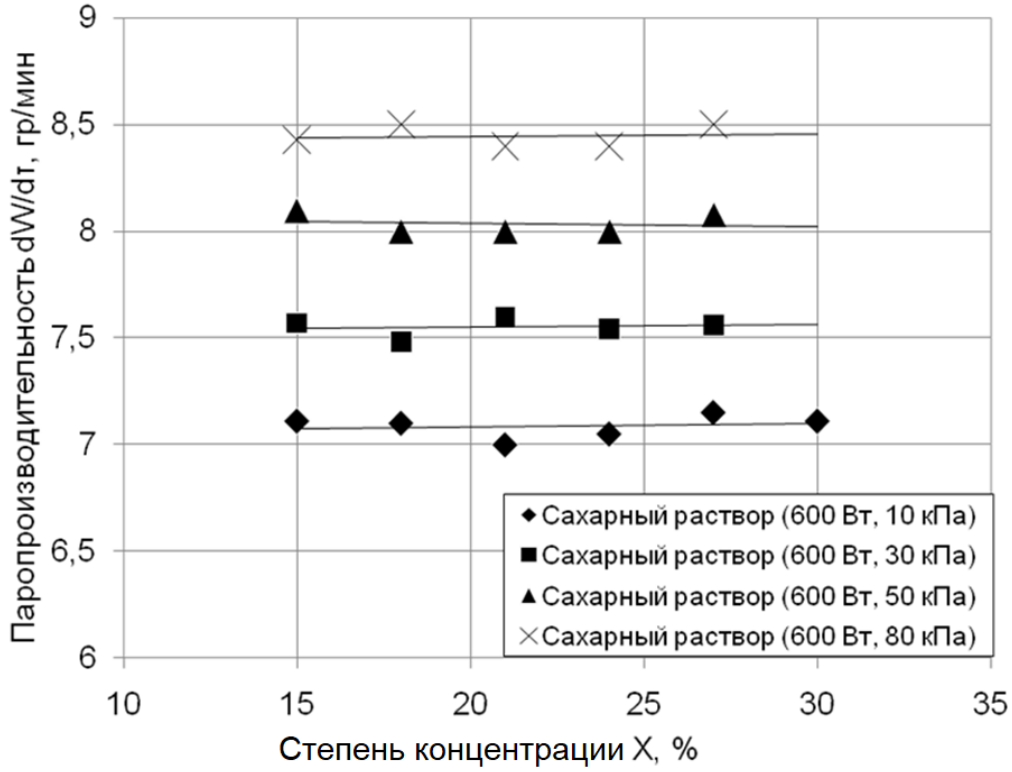


Рисунок 4.118. Влияние давления на паропроизводительность

Увеличение паропроизводительности с ростом давления объясняется снижением теплоты парообразования.

Исследование влияния воздуха в объеме аппарата на паропроизводительность модуля

В традиционных вакуум-выпарных аппаратах проблему наличия воздуха в системе решают за счет постоянно работающего вакуум-насоса. Несмотря на затраты электроэнергии, этот процесс считают оправданным, поскольку эффективность процесса переноса влаги в условиях парогазовой смеси существенно снижается.

Теоретические основы процесса парообразования в парогазовую среду практически не разработаны, и ограничиваются отдельными прикладными задачами. Например, испарительные охладители работают на основе материального баланса:

$$\alpha\left(t_{ПГ}-t_{М}\right)=r\beta_{P}\left(P_{ПП}-P_{ПО}\right) \qquad (4.44)$$

В соотношении (4.22): α и β – коэффициенты, соответственно, теплоотдачи и массоотдачи; t – температура; r – удельная теплота парообразования; P – парциальное давление; индексы: $ПГ$ – парогазовый; M – минимальная; $ПП$ – пар на поверхности; $ПО$ – смеси.

Известна модель массоотдачи в паровоздушную среду из пористой пластины:

$$Nu_D = 2 \cdot 10^{-4} \, \mathrm{Re}^{0,8} \, \pi_D^{-0,5} \varepsilon_{ПО}^{-0,5} \tag{4.45}$$

В соотношении (4.45): Nu_D – число Нуссельта диффузионное; Re – число Рейнольдса; π_D и $\varepsilon_{ПО}$ – параметрические комплексы:

$$\varepsilon_{ПО} = 1 - \varepsilon_{ГО} \tag{4.46}$$

Начальное содержание воздуха в паре:

$$\varepsilon_{ГО} = \frac{P_{ГО}}{P} \tag{4.47}$$

Параметрический комплекс:

$$\pi_D = \frac{P_{ПС} - P_{ПО}}{P} \tag{4.48}$$

Модель (4.45) справедлива в диапазоне $\mathrm{Re} = 1,3 \cdot 10^5 - 1,65 \cdot 10^6$; $\varepsilon_{ПО} = 0,00365 - 0,0168$. Температура паровоздушного потока изменялась от 12 до 120 °С.

Рассмотренные модели не применимы к разработанному модулю, но принципиальные положения по влиянию воздуха у них общие и могут быть полезны для анализа.

Техническая идея модуля определяет экономическую целесообразность минимизации поверхности и объема модуля. В таких условиях следует провести анализ влияния воздуха в объеме аппарата. Воздух может собираться из-за дегазации раствора (это растворенный в растворе воздух) и в результате натекания через неплотности конструкции. Первая причина менее существенна, и устраняется путем кратковременного включения вакуум-насоса. Вторая причина приводит к противоречивым результатам (таблица 4.35).

Таблица 4.35. Влияние процесса натекания воздуха на параметры пищевой системы

Фактор	Реакция пищевой системы	Паропроизводительность
Рост давления в аппарате	Повышение температуры фазового перехода и уменьшение удельной теплоты парообразования	Повышение паропроизводительности
Рост температуры	Повышение потерь теплоты в окружающую среду; снижение качества термолабильного продукта	Снижение паропроизводительности
Рост температуры	Повышение доли конденсации водяных паров на конструктивных узлах выпарного аппарата	Снижение паропроизводительности
Наличие воздуха в паровом объеме	Понижение движущей силы процесса	Снижение паропроизводительности
Блокировка воздухом части поверхности конденсации	Снижение эффективности процесса конденсации	Снижение паропроизводительности

Рассмотренные процессы (таблица 4.35) приведут к изменению ситуации в объеме модуля. На новом уровне динамическое равновесие установится из условий теплового и материального баланса. Рассмотрим теплофизическую схему системы. Элементами системы являются: излучатель 1 мощностью N и КПД η; раствор 2; узлы выпарной камеры 3; воздух 4; конденсатор 5 с поверхностью F; окружающая среда 6 (рисунок 4.119).

За счет электромагнитной энергии N из раствора образуется поток пара $G_Г$, который поступает в верхнюю зону выпарной камеры. За счет контакта с более холодными узлами камеры часть пара конденсируется. Конденсат G_O возвращается в раствор. Чем выше температурный напор с окружающей средой, тем выше G_O. Таким образом, из выпарной камеры выходит поток G_B, который равен разности $G_Г - G_O$. Далее этот поток поступает в парогазовый объем конденсатора. Здесь протекает массообменный перенос пара к поверхности конденсации. Математическая модель этих процессов имеет вид:

$$\frac{N\eta - Qc}{r\rho} = \beta_P F\left(P_{ПО} - P_{ПП}\right) \qquad (4.49)$$

В соотношении (4.49): N – мощность излучателя; η – его КПД; β – коэффициент массоотдачи; ρ – плотность пара; r – удельная теплота парообразования; F – площадь поверхности конденсации; P – парциальное давление; индексы: $ПП$ – пар на поверхности конденсатора; $ПО$ – пар на поверхности смеси.

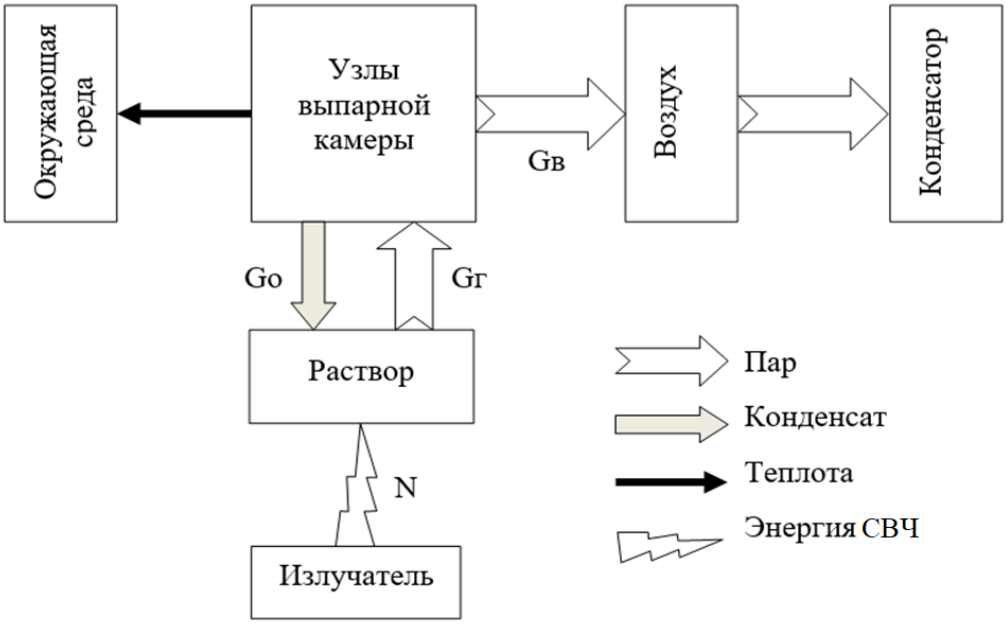


Рисунок 4.119. Схема массовых и энергетических потоков в аппарате

В таком виде решение задачи возможно на основе экспериментального моделирования.

Опыты проводились на экспериментальном образце модуля.

Методика экспериментов состояла в следующем:

1. Опыты проводились при постоянной мощности излучателя.

2. Давление от минимального значения (10 кПа) до максимального (120 кПа) повышалось путем подачи в объем модуля воздуха.

3. Объем раствора в модуле соответственно снижался.

На основе полученных результатов построены частные зависимости (рисунок 4.120–4.122).

При увеличении уровня давления в системе четко прослеживается снижение скорости роста массы конденсата (рисунок 4.120). Это приводит к значительному

увеличению длительности процесса и затратам энергии. Результаты свидетельствуют об отрицательном влиянии воздуха в объеме модуля.

Таблица 4.36 – Диапазон экспериментальных данных при исследовании процесса выпаривания сахарного раствора при разных давлениях в парогазовом объеме

Объект	Раство-ритель	Давление, МПа	Темпе-ратура, °С	Мощность, Вт	Концентрация, %	
					начальная	конечная
Сахарный раствор	Вода	0,01–0,12	50–100	600	15	20

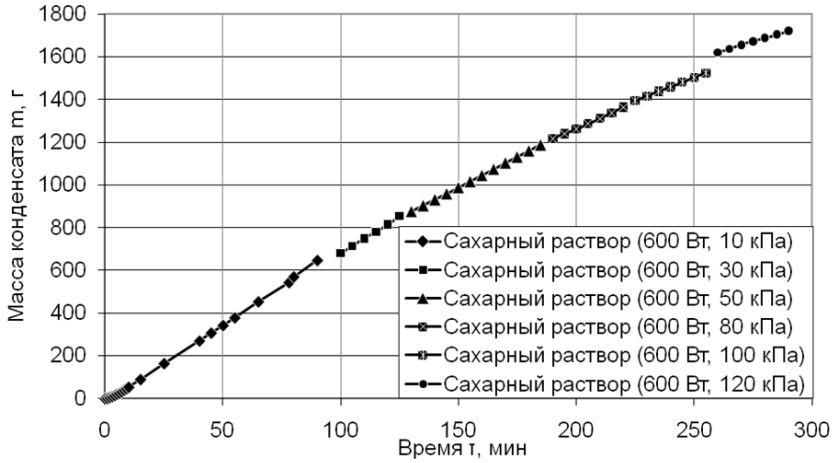


Рисунок 4.120. Влияние давления на изменение массы конденсата во времени

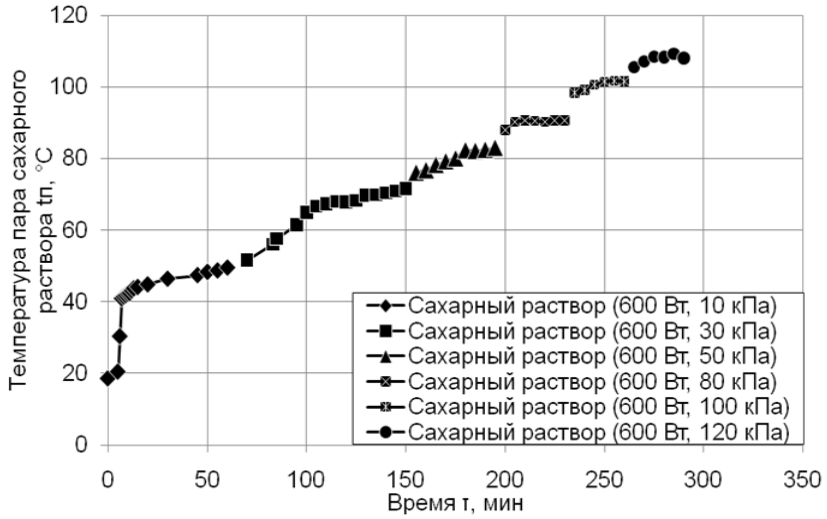


Рисунок 4.121. Влияние воздуха на изменение температуры пара на выходе во времени

Соответственно, наблюдался существенный рост температуры с увеличением давления, обусловленным натеканием воздуха (рисунок 4.121). Подобные изменения являются крайне негативными для целого ряда пищевых продуктов, содержащих термолабильные целевые компоненты.

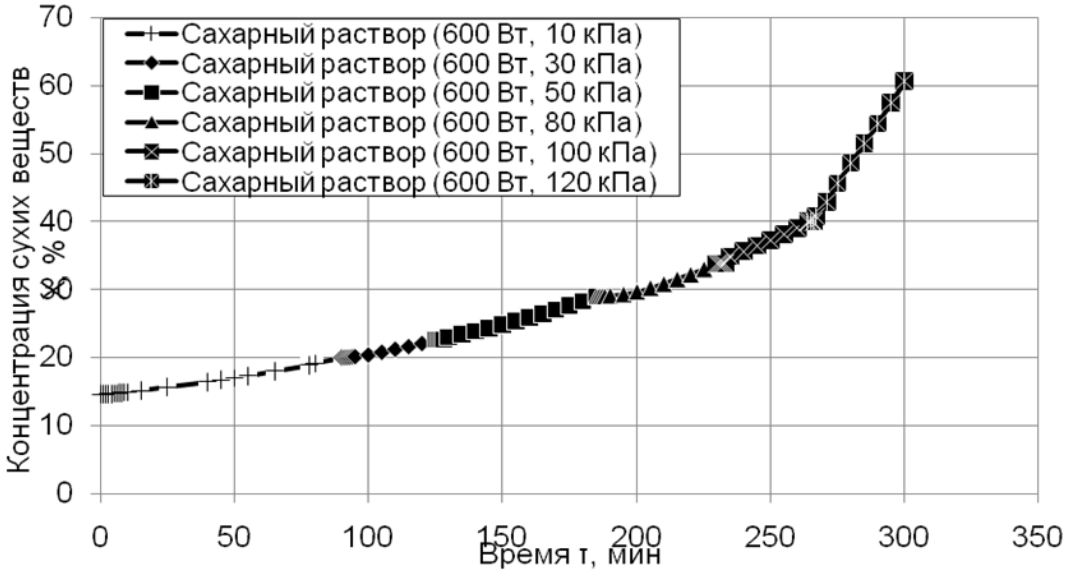


Рисунок 4.122. Влияние воздуха на изменение концентрации сухих веществ во времени

Нелинейный характер роста концентрации (рисунок 4.122) обусловлен постоянным увеличением соотношения массы сухих веществ к массе оставшейся влаги в продукте, при условии, что скорость удаления влаги постоянная.

Проведем анализ полученных результатов. Видно, что с повышением давления и концентрации раствора паропроизводительность модуля существенно снижается (рисунок 4.123). Вместе с тем, повышение давления с 0,01 МПа до 0,12 МПа приводит к снижению теплоты парообразования на 7 % (с 2392,6 кДж/кг до 2244,4 кДж/кг). Соответственно, ожидается повышение паропроизводительности, что должно учитываться числом энергетического действия. Некоторое снижение паропроизводительности наблюдается при повышении концентрации раствора (рисунок 4.123). Но оно ограничивается 2–4 % (рисунок 4.123). К снижению паропроизводительности при росте в аппарате давления приводит фактор температуры. С повышением давления растет

температура и повышается уровень потерь энергии в окружающую среду от корпуса аппарата. Данные стендовых испытаний модуля (рисунок 4.121) показывают, что влияние этого фактора растет с повышением уровня температур в аппарате.

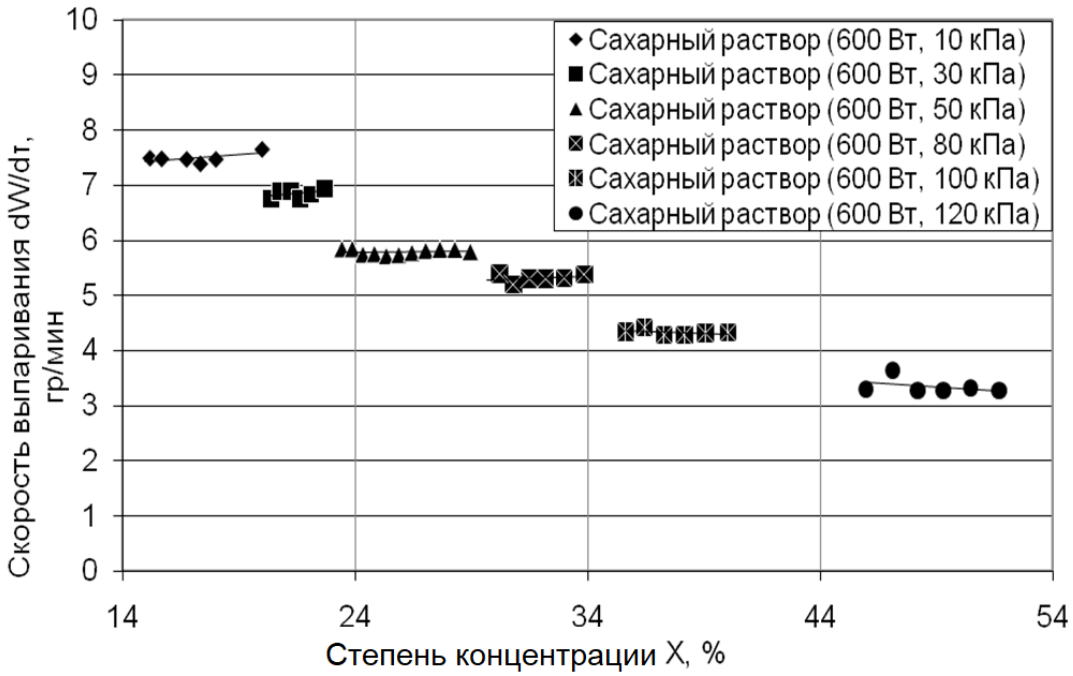


Рисунок 4.123. Влияние воздуха на скорость выпаривания сахарного раствора

Есть еще один фактор, который способен снизить величину паропроизводительности. Эксперимент проводился при условии снижения уровня заполнения аппарата раствором. Поскольку форма аппарата не отвечала параметрам резонаторной камеры, то входной поток электромагнитной энергии должен иметь возможность эффективно поглощаться раствором. Принципиально нет необходимости установить влияние этого фактора. Здесь нет научно-технических противоречий. В регламент эксплуатации аппарата следует ввести ограничения, что уровень раствора в аппарате должен минимум на 30 мм превышать уровень окна ввода электромагнитной энергии.

В отличие от традиционных технологий выпаривания с кондуктивным энергоподводом, при котором пузыри пара образуются на перегретых поверхностях, при микроволновом подводе энергии зародышами парообразования являются пузыри газов, которые имеются в жидкости. Как указано, радиус газовых

пузырей в воде находится в пределах от $6 \cdot 10^{-10}$ м до $3 \cdot 10^{-5}$ м [374], и усреднённый радиус газового пузыря в воде приблизительно равен $2 \cdot 10^{-7}$ м [77]. Минимальная температура перегрева жидкости, при которой паровые пузыри не лопаются, определяется по формуле:

$$\Delta T_{\min} > \frac{4T'' \cdot \sigma}{r \cdot \rho_{vap} \cdot R_p} \tag{4.50}$$

где T'' – температура насыщенного пара,

r – удельная теплота парообразования,

R_p – радиус газового пузыря.

Для таких значений размеров газовых пузырей минимальная температура перегрева составляет 9,3 К, однако при снижении давления происходит рост диаметров газовых пузырей, вследствие чего температуры перегрева при экспериментальных исследованиях находились в пределах 5 К, что соответствует радиусу пузыря $5{,}6 \cdot 10^{-5}$ м.

Скорость роста парового пузыря может быть определена с использованием числа Якоба [374]:

$$Ja = \frac{c_p \cdot \Delta T \cdot \rho_{lic}}{r \cdot \rho_{vap}} \tag{4.51}$$

$$\frac{dR_p}{d\tau} = \beta_1 \cdot \frac{a}{R_p} \cdot Ja^2 \tag{4.52}$$

где Ja – число Якоба,

c_p – изобарная теплоёмкость жидкости,

a – коэффициент температуропроводности,

τ – время,

β_1 – коэффициент учета дополнительных факторов, как форма пузыря, динамические эффекты.

После интегрирования уравнение 4.52 имеет вид:

$$R_p(\tau) = \sqrt{R_{p0}^2 + \beta_1 \cdot a \cdot Ja^2 \cdot \tau} \tag{4.53}$$

где R_{p0} – начальный радиус парового пузыря.

Скорость всплытия парового пузыря зависит от его размеров и режима всплытия и для ламинарного режима определяется по формуле Стокса а для турбулентного используется зависимость Лященко между числами Архимеда и Рейнольдса (приложение В).

Использование зависимости Тодеса $\mathrm{Re} = \frac{\mathrm{Ar}}{18 + 0.575\sqrt{\mathrm{Ar}}}$ позволяет описать скорость всплытия пузырей единой формулой:

$$w_p(\tau) = \frac{4 \cdot \left[\sqrt{\left(R_{p0}\right)^2 + \beta_1 \cdot a \cdot Ja^2 \cdot \tau}\right]^2 \cdot g \cdot \left(p_{lic} - p_{vap}\right)}{\left[18 \cdot \mu_{lic} + 0{,}575 \cdot \sqrt{\left[8 \cdot \left[\sqrt{\left(R_{p0}\right)^2 + \beta_1 \cdot a \cdot Ja^2 \cdot \tau}\right]^3 \cdot g \cdot p_{lic}\right] \cdot \left(p_{lic} - p_{vap}\right)}\right]} \quad (4.54)$$

где μ_{lic} – вязкость жидкости.

Зависимость скорости всплытия парового пузыря от высоты над точкой зарождения приведена на рис. 4.124.

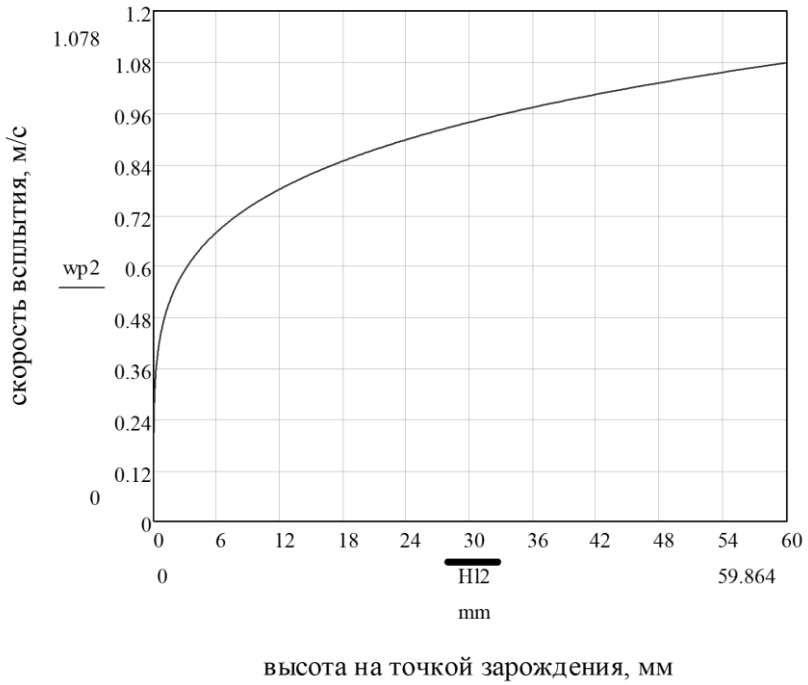


Рисунок 4.124. Зависимость скорости всплытия парового пузыря от высоты над точкой зарождения

Паропроизводительность одного пузыря определяется как:

$$G_{1p} = \frac{4 \cdot \pi \cdot R_p^3 \cdot \rho_{vap}}{3 \cdot \tau} \tag{4.55}$$

и её зависимость от высоты всплытия представлена на рис. 4.125.

Основной вывод этой серии экспериментов – натекание воздуха в объем модуля следует избегать, например, периодической кратковременной его откачкой вакуум-насосом.

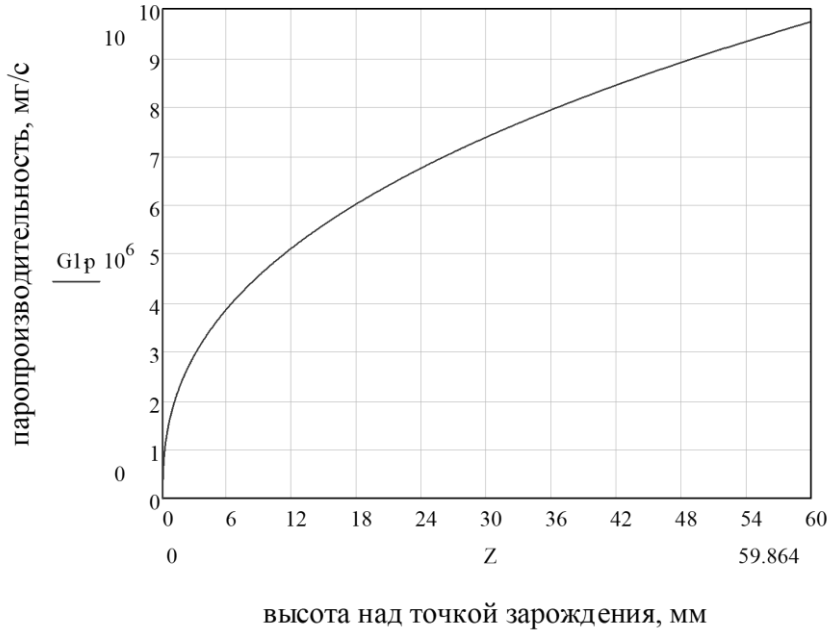


Рисунок 4.125. Зависимость паропроизводительности парового пузыря от высоты над точкой зарождения

Исследование влияния типа продукта на паропроизводительность модуля

В третьей серии опытов диапазон экспериментальных данных при проведении исследований отображен в таблице 4.37.

На основе полученных в ходе исследований данных построены частные зависимости влияния вида продукта на ключевые параметры процесса (рисунок 4.126–4.129).

Таким образом, в результате комплексных стендовых исследований установлены статические и кинетические характеристики экспериментального

образца модуля микроволнового вакуум-выпарного аппарата. Следующий этап роботы испытания модуля – отработка режимов его эксплуатации.

Таблица 4.37. Диапазон экспериментальных данных при исследовании выпаривания

Объект	Раство-ритель	Давление, МПа	Темпе-ратура, °С	Мощность, Вт	Концентрация, %	
					начальная	конечная
Сахарный раствор	Вода	0,01	45 –55	264	15	20
Сок яблочный	Вода	0,01	45 –55	264	13,4	20,1
Водный экстракт кофе	Вода	0,01	45 –55	264	15	19,2
Вино белое	Этанол (10 %)	0,01	40 –50	264	5,8	8,7
Водо-спиртовый экстракт дуба	Этанол (42 %)	0,01	45 –50	264	14,6	22,7

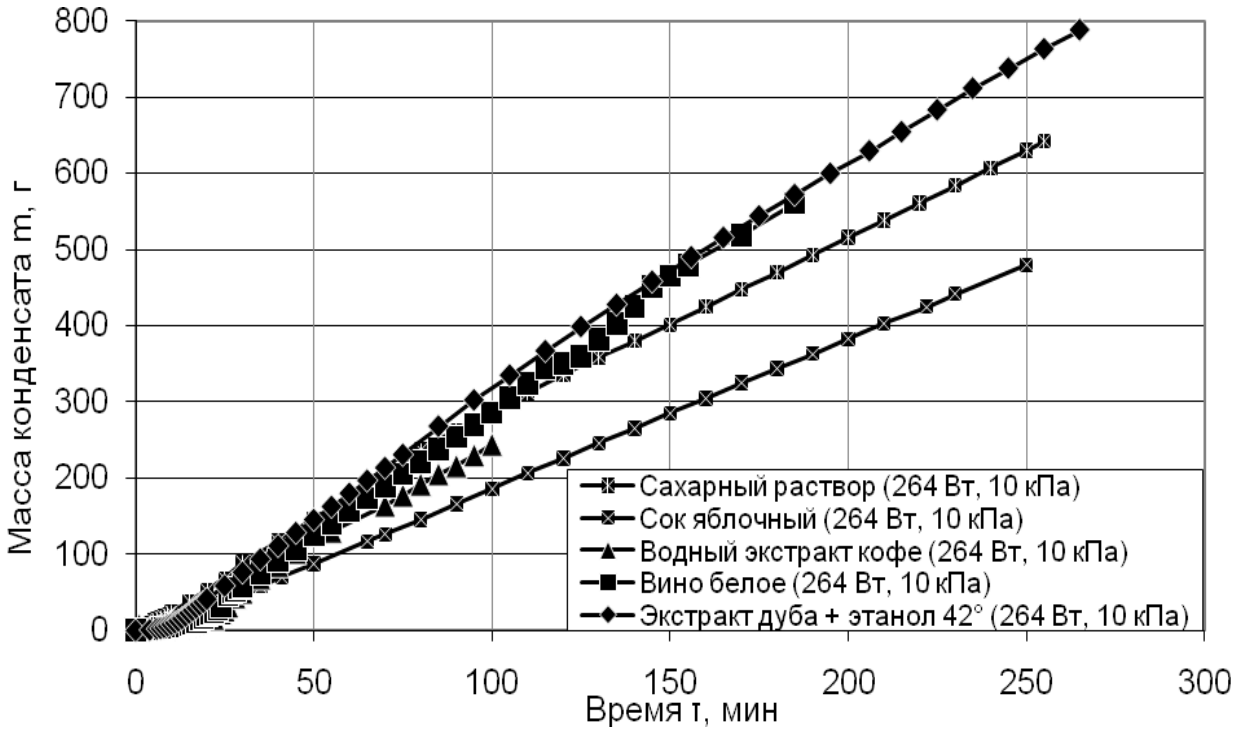


Рисунок 4.126. Изменение массы конденсата во времени в зависимости от вида продукта

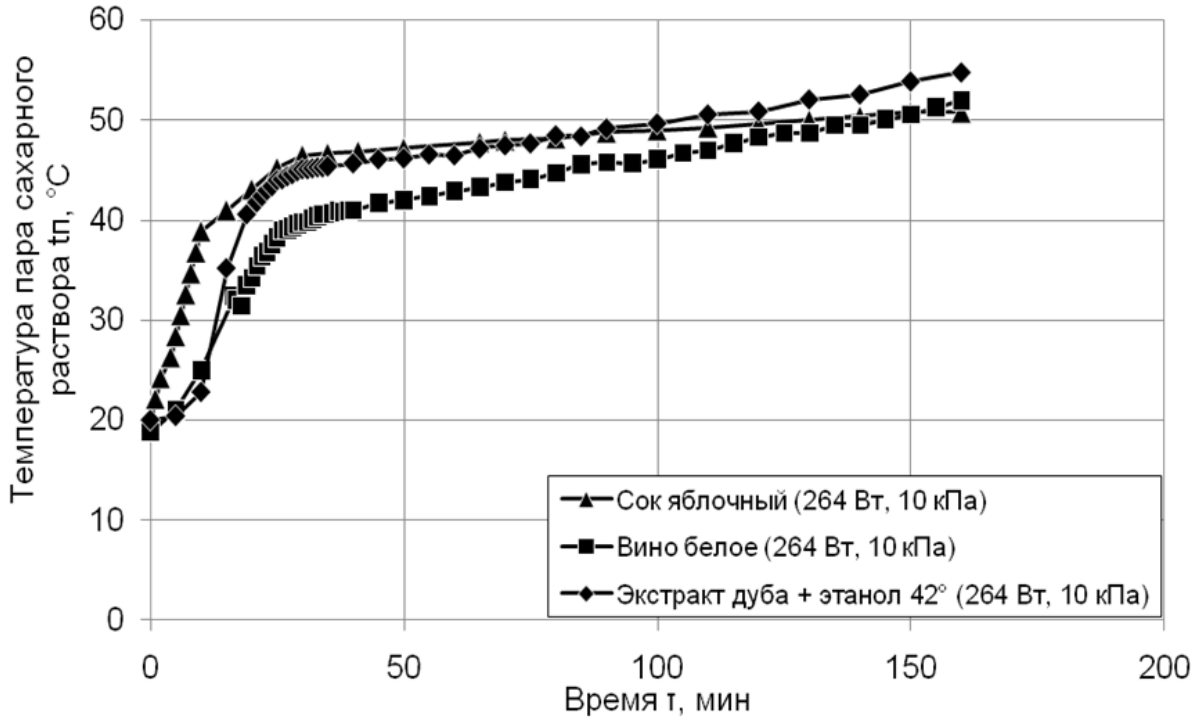


Рисунок 4.127. Изменение температуры пара на выходе во времени в зависимости от типа продукта.

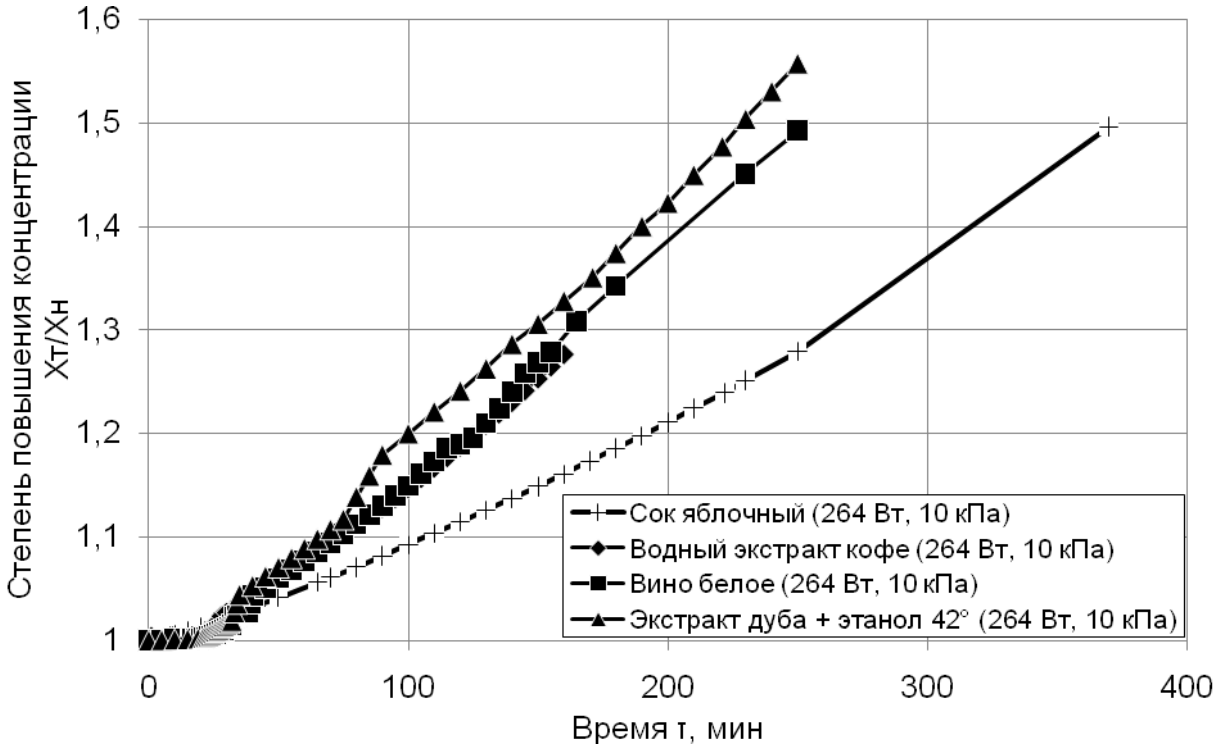


Рисунок 4.128. Изменение степени концентрации сухих веществ во времени в зависимости от типа продукта

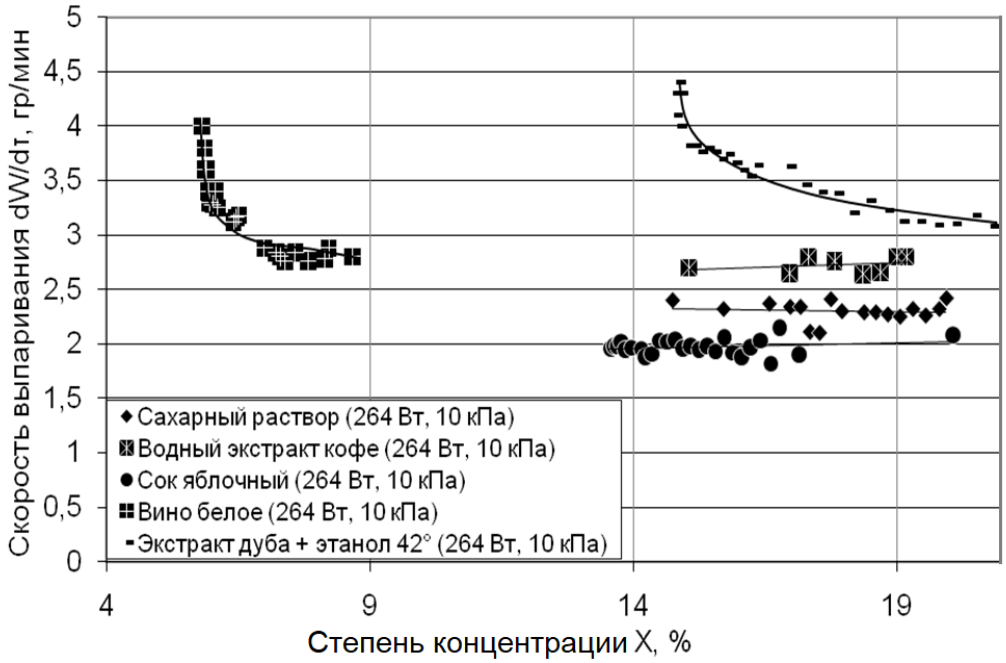


Рисунок 4.129. Изменение скорости выпаривания во времени в зависимости от типа продукта

4.6.3. Испытание модуля в режиме полунепрерывной работы

В процессе испытаний составлены циклограммы полунепрерывной работы микроволнового модуля (рисунок 4.130–4.132).

Приведенные зависимости (рисунок 4.130–4.132) необходимы для организации эксплуатации аппарата в условиях производства.

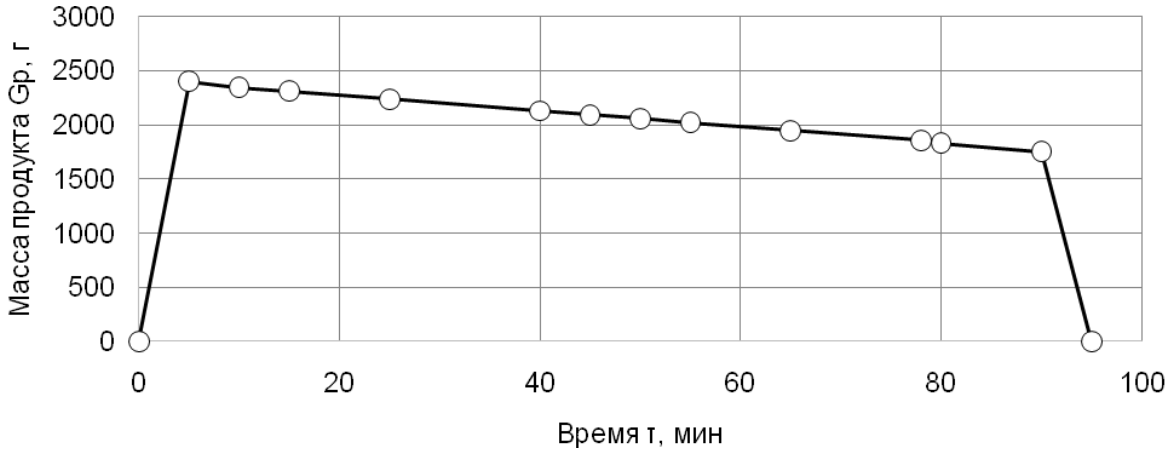


Рисунок 4.130. Изменение массы продукта в течение полного цикла процесса выпаривания

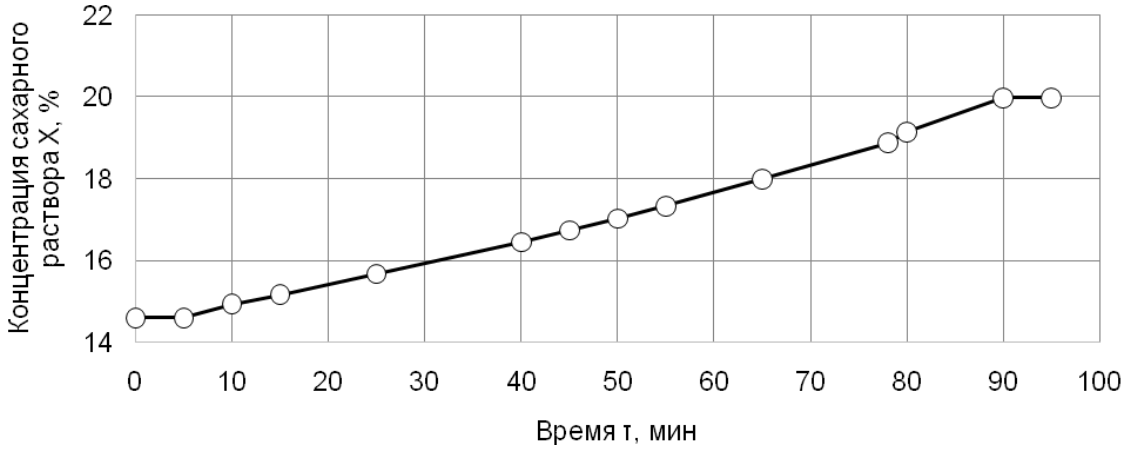


Рисунок 4.131. Изменение концентрации в течение полного цикла процесса выпаривания

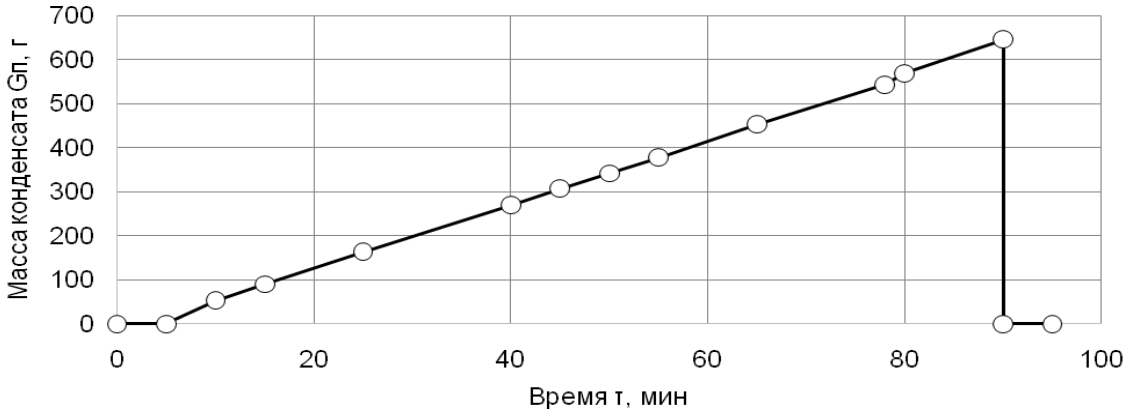


Рисунок 4.132. Изменение массы конденсата в течение полного цикла процесса выпаривания.

4.6.4. Испытание модуля в режиме непрерывной работы

Непрерывный режим работы эффективен для условий тоннажного производства. Испытания проводились при максимальном уровне подводимой мощности (600 Вт) и минимальном давлении (10 кПа). Начальная концентрация сахарного раствора, непрерывно подаваемого в модуль, составляла 30 °brix. В течение всего процесса поддерживался постоянный уровень продукта 2,2 л.

Инструментом для решения этой задачи является четкое согласование материальных потоков: поступление сырья равно сумме потоков готового продукта и конденсата.

Допускается циклическое поступление сырья и отвод концентрата при условии непрерывного отвода и конденсации паров растворителя. Оптимизация управления этими процессами является самостоятельной задачей, как в теоретическом аспекте, так и при технической реализации системы такого регулирования. Представленные зависимости (рисунок 4.133–4.134) получены при ручном регулировании расходов.

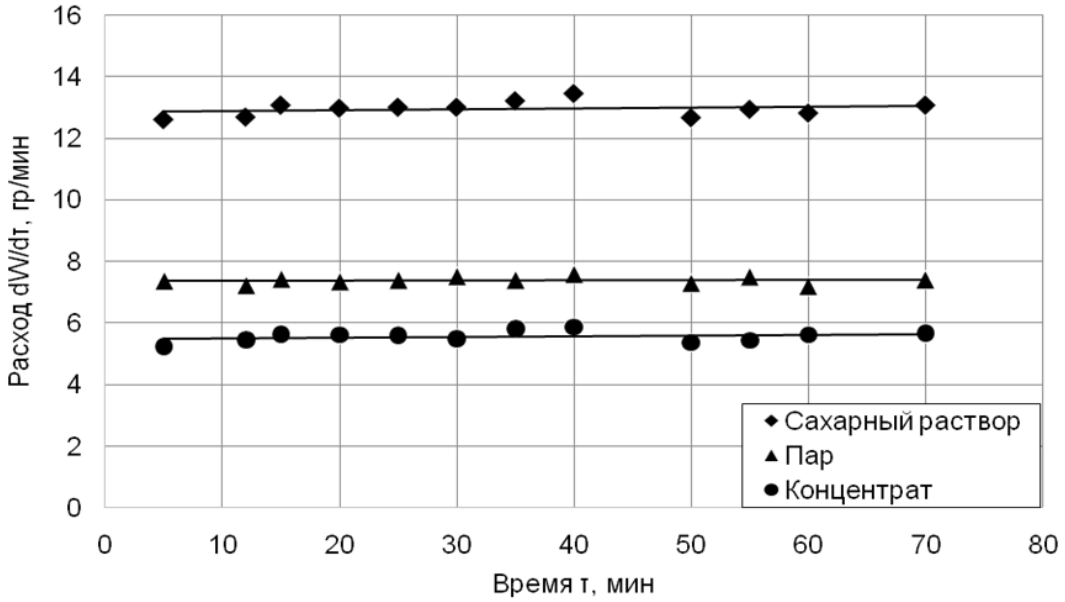


Рисунок 4.133. Расход сырьевых потоков при непрерывном режиме работы модуля

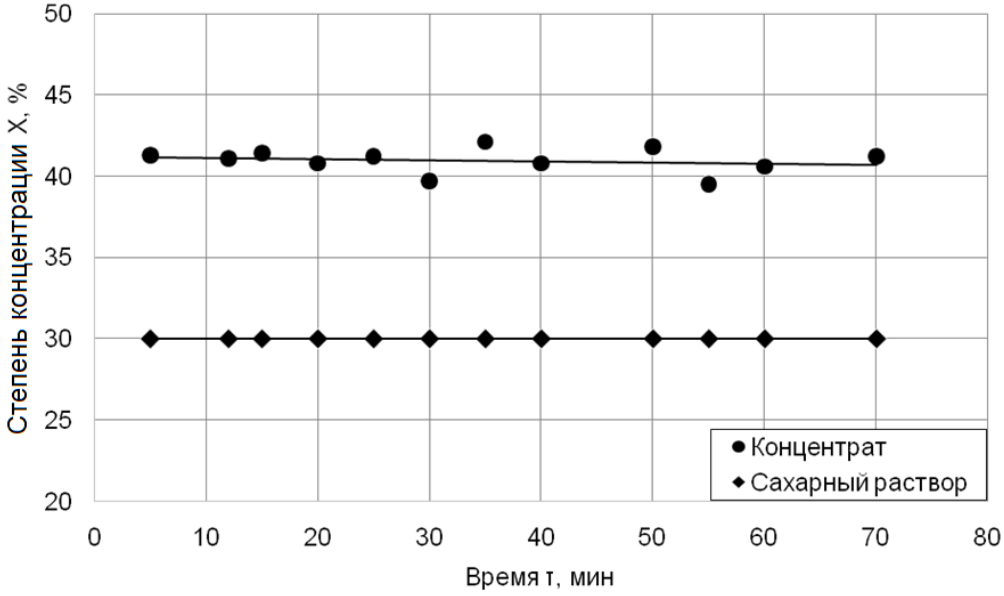


Рисунок 4.134. Концентрация продукта на входе и на выходе модуля в режиме непрерывной работы

Главный вывод по результатам испытаний – это подтверждение практической работоспособности разработанного экспериментального образца модуля, возможность стабильного повышения концентрации продукта в одной ступени на 10 °brix. Приведенные зависимости (рисунок 4.133–4.134) являются базой для организации работы модуля в условиях производства.

4.6.5. Обобщение результатов исследований

Результаты стендовых испытаний показали, что закономерности процесса выпаривания в модуле соответствуют модели (4.17). Однако использование этой модели в ряде случаев окажется проблематичной. Вопрос в определении КПД системы трансформации электромагнитной энергии в теплоту. Величина этого параметра зависит как от конструктивных характеристик (размеры волновода, выпарной камеры), так и от режимных параметров организации процесса. Ставить исследования для получения расчетной модели этого КПД нет смысла, поскольку этот параметр индивидуален для каждого модуля. Представляется целесообразной следующая схема решения проблемы. На предприятии проводится во время отладки тарировка паропроизводительности при стабильной мощности (лучше минимальной) для обрабатываемого продукта. Результаты тарировки (базовое значение числа энергетического действия $Bu_Б$) используются в разработанной методике расчета паропроизводительности для разных типов растворов и для разных мощностей электромагнитных генераторов.

При разработке методики использован метод теории подобия. Для каждого эксперимента определялся параметрический комплекс безразмерной паропроизводительности W, полученной при делении базового числа энергетического действия $Bu_Б$ на текущее $Bu_Т$. Такой прием позволяет избавиться от проблемного КПД модуля:

$$W = \frac{Bu_Б}{Bu_Т} = \frac{\left(\frac{N_Б}{W_Б \cdot r_Б}\right)}{\left(\frac{N_Т}{W_Т \cdot r_Т}\right)} = \frac{N_Б}{W_Б \cdot r_Б} \cdot \frac{W_Т \cdot r_Т}{N_Т} = \frac{W_Т}{W_Б} \quad (4.56)$$

где $N_Б$, $N_Т$ – базовое и текущее значение мощности СВЧ поля, Вт;

$W_Б$, $W_Т$ – базовое и текущее значение скорости влагоизвлечения, кг/с;

$r_Б$, $r_Т$ – базовое и текущее значение теплоты парообразования, Дж/кг.

Рассчитывались:

– параметрический комплекс безразмерной мощности:

$$N = \frac{N_Т}{N_Б} \quad (4.57)$$

где, $N_Б$ – базовое значение мощности ($N_Б$ = 264 Вт);

– параметрический комплекс безразмерного давления:

$$P = \frac{P_Т}{P_Б} \quad (4.58)$$

где $P_Т$ – текущее значение давления, кПа;

$P_Б$ – базовое значение давления ($P_Б$ = 5 кПа);

– симплекс теплот фазового перехода:

$$R = \frac{r_Т}{r_Б} \quad (4.59)$$

где $r_Б$ – базовое значение скрытой теплоты парообразования $\left(r_{ацетона} = 525 \text{ кДж/кг}\right)$.

Результаты обработки всего массива точек приведены в таблице 4.38.

В результате обработки приведенной базы данных было получено критериальное уравнение (4.60):

$$W = 1,29 \cdot N^{1,43} \cdot P^{0,08} \cdot R^{-0,2} \quad (4.60)$$

Таблица 4.38. Сводка расчетных данных по выпариванию в СВЧ модуле

№	Продукт	$t_{пара}$, °С	P, МПа	N_i, Вт	W_T, гр/мин	$W_Э$	N	P	R
1	Сахарный раствор	41	0,01	264	2,4	1,04	1	2	4,57
2		41	0,01	264	2,32	1,01	1	2	4,57
3		42	0,01	264	2,37	1,03	1	2	4,57
4		41	0,01	264	2,34	1,02	1	2	4,57
5		42	0,01	264	2,34	1,02	1	2	4,57
6		42	0,01	264	2,11	0,92	1	2	4,57
7		41	0,01	264	2,1	0,91	1	2	4,57
8		42	0,01	264	2,41	1,05	1	2	4,57
9		42	0,01	264	2,3	1	1	2	4,57
10		42 / –	0,01	264	2,3	1	1	2	4,57
11		43	0,01	264	2,3	1	1	2	4,57
12		42	0,01	264	2,27	0,99	1	2	4,57
13		43	0,01	264	2,25	0,98	1	2	4,57
14		43	0,01	264	2,32	1,01	1	2	4,57
15		44	0,01	264	2,26	0,98	1	2	4,57
16		43	0,01	264	2,32	1,01	1	2	4,57
17		43	0,01	264	2,42	1,05	1	2	4,57
18		47	0,01	342	3,8	1,65	1,3	2	4,57
19		47	0,01	342	4,05	1,76	1,3	2	4,57
20		48	0,01	342	4,35	1,89	1,3	2	4,57
21		47	0,01	342	4,02	1,75	1,3	2	4,57
22		48	0,01	342	4	1,74	1,3	2	4,57
23		48	0,01	342	3,9	1,7	1,3	2	4,57
24		48	0,01	342	3,75	1,63	1,3	2	4,57
25		47	0,01	342	3,7	1,61	1,3	2	4,57
26		47	0,01	342	3,7	1,61	1,3	2	4,57
27		48	0,01	342	3,9	1,7	1,3	2	4,57
28		48	0,01	342	3,9	1,7	1,3	2	4,57
29		50	0,01	468	6,32	2,75	1,77	2	4,57
30		51	0,01	468	6,04	2,63	1,77	2	4,57
31		50	0,01	468	6,12	2,66	1,77	2	4,57

Продолжение таблицы 4.38.

№	Продукт	$t_{пара}$, °С	P, МПа	N_i, Вт	W_T, гр/мин	$W_Э$	N	P	R
32	Сахарный раствор	50	0,01	468	5,68	2,47	1,77	2	4,57
33		51	0,01	468	5,82	2,53	1,77	2	4,57
34		50	0,01	468	6,34	2,76	1,77	2	4,57
35		51	0,01	468	5,8	2,52	1,77	2	4,57
36		51	0,01	468	6,1	2,65	1,77	2	4,57
37		53	0,01	600	7,5	3,26	2,27	2	4,57
38		54	0,01	600	7,49	3,26	2,27	2	4,57
39		53	0,01	600	7,48	3,25	2,27	2	4,57
40		54	0,01	600	7,4	3,22	2,27	2	4,57
41		54	0,01	600	7,48	3,25	2,27	2	4,57
42		55	0,01	600	7,66	3,33	2,27	2	4,57
43		70	0,03	264	8,07	3,51	1	6	4,45
44		70	0,03	264	7,98	3,47	1	6	4,45
45		71	0,03	264	8,1	3,52	1	6	4,45
46		70	0,03	264	8,04	3,5	1	6	4,45
47		71	0,03	264	8,06	3,5	1	6	4,45
48		80	0,05	264	8,6	3,74	1	10	4,39
49		80	0,05	264	8,5	3,7	1	10	4,39
50		81	0,05	264	8,5	3,7	1	10	4,39
51		81	0,05	264	8,5	3,7	1	10	4,39
52		81	0,05	264	8,58	3,73	1	10	4,39
53		88	0,08	264	8,93	3,88	1	16	4,33
54		89	0,08	264	9	3,91	1	16	4,33
55		88	0,08	264	8,9	3,87	1	16	4,33
56		88	0,08	264	8,9	3,87	1	16	4,33
57		89	0,08	264	9	3,91	1	16	4,33
58	Водный экстракт кофе	49	0,01	264	2,7	1,17	1	2	4,57
59		49	0,01	264	2,65	1,15	1	2	4,57
60		50	0,01	264	2,8	1,22	1	2	4,57
61		49	0,01	264	2,76	1,2	1	2	4,57
62		49	0,01	264	2,64	1,15	1	2	4,57
63		50	0,01	264	2,66	1,16	1	2	4,57

Продолжение таблицы 4.38.

№	Продукт	$t_{пара}$, °С	P, МПа	N_i, Вт	W_T, гр/мин	$W_Э$	N	P	R
64	Водн. экст-ракт кофе	50	0,01	264	2,8	1,22	1	2	4,57
65		51	0,01	264	2,8	1,22	1	2	4,57
66	Сок яблочный	44	0,01	264	1,96	0,85	1	2	4,57
67		44	0,01	264	1,98	0,86	1	2	4,57
68		44	0,01	264	1,98	0,86	1	2	4,57
69		45	0,01	264	2,02	0,88	1	2	4,57
70		44	0,01	264	1,95	0,85	1	2	4,57
71		44	0,01	264	1,97	0,85	1	2	4,57
72		45	0,01	264	1,95	0,85	1	2	4,57
73		44	0,01	264	1,88	0,82	1	2	4,57
74		45	0,01	264	1,91	0,83	1	2	4,57
75		45	0,01	264	2,03	0,88	1	2	4,57
76		45	0,01	264	2,02	0,88	1	2	4,57
77		46	0,01	264	2,04	0,89	1	2	4,57
78		45	0,01	264	1,96	0,85	1	2	4,57
79		46	0,01	264	1,98	0,86	1	2	4,57
80		46	0,01	264	1,95	0,85	1	2	4,57
81		46	0,01	264	1,98	0,86	1	2	4,57
82		46	0,01	264	1,93	0,84	1	2	4,57
83		46	0,01	264	2,06	0,9	1	2	4,57
84		47	0,01	264	1,92	0,83	1	2	4,57
85		46	0,01	264	1,88	0,82	1	2	4,57
86		46	0,01	264	1,97	0,86	1	2	4,57
87		47	0,01	264	2,03	0,88	1	2	4,57
88		46	0,01	264	1,82	0,79	1	2	4,57
89		47	0,01	264	2,15	0,93	1	2	4,57
90		47	0,01	264	1,9	0,83	1	2	4,57
91		47	0,01	264	2,08	0,91	1	2	4,57
92	Вино белое (10 % этанола)	40	0,01	264	4	1,74	1	2	4,26
93		40	0,01	264	3,8	1,65	1	2	4,26
94		41	0,01	264	3,6	1,6	1	2	4,26
95		40	0,01	264	3,6	1,56	1	2	4,26
96		41	0,01	264	3,6	1,56	1	2	4,26

Продолжение таблицы 4.38

№	Продукт	$t_{пара}$, °С	P, МПа	N_i, Вт	W_T, гр/мин	$W_Э$	N	P	R
97	Вино белое (10 % этанола)	41	0,01	264	3,4	1,48	1	2	4,26
98		42	0,01	264	3,3	1,43	1	2	4,26
99		41	0,01	264	3,3	1,43	1	2	4,26
100		42	0,01	264	3,3	1,43	1	2	4,26
101		42	0,01	264	3,28	1,43	1	2	4,26
102		43	0,01	264	3,4	1,48	1	2	4,26
103		43	0,01	264	3,25	1,41	1	2	4,26
104		43	0,01	264	3,12	1,36	1	2	4,26
105		44	0,01	264	3,16	1,37	1	2	4,26
106		44	0,01	264	3,18	1,38	1	2	4,26
107		45	0,01	264	2,88	1,25	1	2	4,26
108		45	0,01	264	2,84	1,23	1	2	4,26
109		45	0,01	264	2,8	1,22	1	2	4,26
110		46	0,01	264	2,76	1,2	1	2	4,26
111		46	0,01	264	2,84	1,23	1	2	4,26
113		46	0,01	264	2,78	1,21	1	2	4,26
114		48	0,01	264	2,88	1,25	1	2	4,26
115		48	0,01	264	2,8	1,22	1	2	4,26
116	Экстракт дуба (42 % этанола)	42	0,01	264	4,3	1,87	1	2	3,32
117		42	0,01	264	4,1	1,78	1	2	3,32
118		42	0,01	264	4,4	,91	1	2	3,32
119		43	0,01	264	4	1,74	1	2	3,32
120	Экстракт дуба (42 % этанола)	43	0,01	264	4,3	1,87	1	2	3,32
121		43	0,01	264	3,82	1,66	1	2	3,32
122		43	0,01	264	3,82	1,66	1	2	3,32
123		44	0,01	264	3,76	1,63	1	2	3,32
124		43	0,01	264	3,8	1,65	1	2	3,32
125		44	0,01	264	3,76	1,63	1	2	3,32
126		44	0,01	264	3,7	1,61	1	2	3,32
127		44	0,01	264	3,74	1,63	1	2	3,32
128		45	0,01	264	3,66	1,6	1	2	3,32
129		45	0,01	264	3,6	1,56	1	2	3,32
130		44	0,01	264	3,54	1,54	1	2	3,32

Продолжение таблицы 4.38.

№	Продукт	$t_{пара}$, °С	P, МПа	N_i, Вт	W_T, гр/мин	$W_Э$	N	P	R
131	Экстракт дуба (42 % этанола)	45	0,01	264	3,64	1,58	1	2	3,32
132		45	0,01	264	3,63	1,58	1	2	3,32
133		45	0,01	264	3,46	1,5	1	2	3,32
134		46	0,01	264	3,39	1,47	1	2	3,32
135		46	0,01	264	3,38	1,47	1	2	3,32
136		46	0,01	264	3,2	1,39	1	2	3,32
137		46	0,01	264	3,32	1,44	1	2	3,32
138		47	0,01	264	3,23	1,4	1	2	3,32
139		46	0,01	264	3,12	1,36	1	2	3,32
140		47	0,01	264	3,12	1,36	1	2	3,32
141		48	0,01	264	3,09	1,34	1	2	3,32
142		48	0,01	264	3,1	1,35	1	2	3,32
143		49	0,01	264	3,18	1,38	1	2	3,32
144		49	0,01	264	3,08	1,34	1	2	3,32
145		50	0,01	264	3,19	1,39	1	2	3,32
146		50	0,01	264	3,13	1,36	1	2	3,32
147		50	0,01	264	3,12	1,36	1	2	3,32
148		51	0,01	264	3,04	1,32	1	2	3,32
149		51	0,01	264	3	1,3	1	2	3,32

Адекватность полученного соотношения (4.60) проверена сравнением расчетных и экспериментальных значений параметрического комплекса безразмерной паропроизводительности W модуля для всех пищевых систем (рисунок 4.135).

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

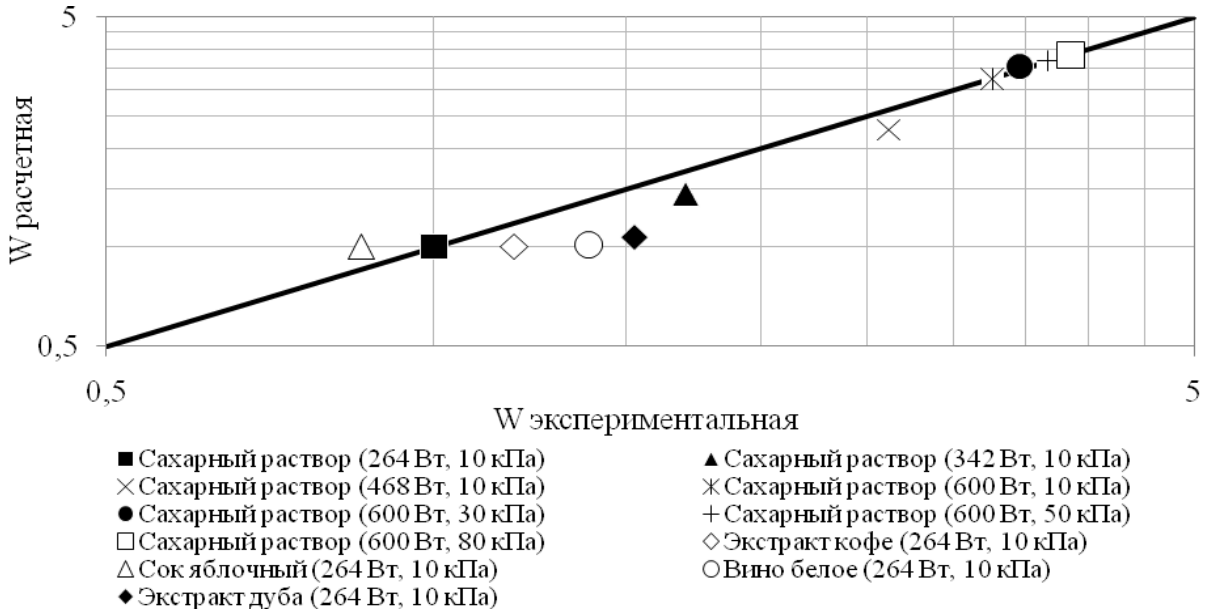


Рисунок 4.135. Сравнительная зависимость экспериментальной безразмерной паропроизводительности $\left(W_{Э}\right)$ с расчетной по (4.60).

ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 4

1. Определены влияния уровня мощности излучения, толщины слоя продукта, вида растительного сырья и формы на кинетику сушки в ИК и СВЧ поле. Результаты экспериментального моделирования обобщены в критериальной форме. Полученные модели могут быть использованы для расчета интенсивности сушки в ИК и СВЧ поле в неподвижном и подвижном слое.

2. Определено, что в СВЧ поле при одинаковом значении удельной мощности требуется в 2 раза меньше времени на процесс, который характеризуется в 2 раза большими значениями скорости сушки. И при сушке продуктов до 11 % требуется в 1,5–2 раза меньше затрат энергии на процесс, чем при сушке в ИК поле, и характеризуется более низкими значениями температур сушки.

3. Подтверждена гипотеза о возможности организации процесса выпаривания по инновационной технологии адресной доставки энергии. Техническая

реализация гипотезы заключается в использовании эффекта воздействия СВЧ поля на полярные молекулы растворителя в объеме продукта.

4. Показана технологическая целесообразность перехода от классической теплопередачи (ГУ III рода) к источникам объемного подвода энергии (ГУ II рода), которые не формируют традиционный пограничный слой. Данный инновационный метод позволил получить качественный готовый продукт с высокой концентрацией сухих веществ.

5. Экспериментально доказана возможность проведения процесса выпаривания в вакууме без постоянной работы вакуум-насоса. Стабильность давления в аппарате поддерживается четким согласованием балансов энергии микроволновых генераторов и системы охлаждения дистиллятора.

6. Определены влияния уровня мощности электромагнитного поля, величины давления, свойств растворителя и типа продукта на паропроизводительность аппарата. Результаты экспериментального моделирования обобщены в критериальной форме. Полученная модель может использоваться в инженерной методике проектирования и оптимизации СВЧ вакуум-выпарных установок периодического действия для широкого класса технологических задач.

7. Специфика действия электромагнитных источников энергии в замкнутом объеме аппарата вызывает стремительный рост концентрации раствора на последнем этапе концентрирования. Установлено, что принятые в установке генераторы позволяют просто и надежно поддерживать необходимый уровень доставки энергии в камеру выпаривания.

8. Разработанная технология выпаривания позволяет получать инновационный продукт высокой концентрации (до 85 °brix) при низкой температуре (до 40 °C). Продукт не имеет привкус варки, характерный при выпаривании традиционным методом. Это позволяет значительно увеличить срок годности и качество продукта. Существенно упрощаются задачи логистики. А это определяет коммерческую привлекательность применения инновационного метода выпаривания.

9. Практически подтверждена работоспособность разработанной микроволновой вакуум-выпарной установки модульного типа непрерывного действия. Конструкция модуля является достаточно надежной и герметичной.

10. Результаты стендовых исследований инновационного модуля подтвердили справедливость научно-технической идеи о перспективах объемного подвода энергии в процессе выпаривания.

11. Модульный принцип позволяет легко организовать различные схемы компоновки установки целесообразным числом элементов для получения продукта необходимой концентрации в нужном количестве.

12. Методами теории подобия получена модель, позволяющая проектировать и оптимизировать установку для получения высококачественных концентратов пищевых растворов.

13. Выполненные в разделе исследования дают возможность приступить к проектированию типоразмерного ряда СВЧ вакуум-выпарных установок для концентрирования пищевых растворов при температурах от 30 °С, и до концентрации 95 °brix.

РАЗДЕЛ 5.
АЛГОРИТМЫ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ И ОПТИМИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ АПРОБАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ

5.1. Методика конструктивного расчета ленточной СВЧ–ИК сушилки

При расчетах нового типоразмера ленточной сушилки на основе полученной информации на стадии научно-испытательных и опытно-технологических работ, формируются исходные данные, в которые входит производительность и тип ленточной сушилки, свойства высушиваемого сырья как объекта сушки (влажность, температура сырья, теплофизические характеристики) и требования к качеству готовой продукции (влажность, морфологические и структурные характеристики).

Целью конструктивного расчета сушилки является определение габаритных размеров сушилки и мощности установленных излучателей. Учитывая, что ширина установки регламентирована шириной установленных массообменных модулей, основным параметром, определяющим геометрию установки, является ее длина $L_{уст}$, которая может быть определена как:

$$L_{уст} = \omega_{Л} \cdot \tau_{суш} \tag{5.1}$$

где $\omega_{Л}$ – скорость ленты,

$\tau_{суш}$ – время сушки.

Скорость ленты может быть определена как:

$$\omega_{Л} = \frac{G_{п}}{\left(B \cdot h \cdot \rho_{н}\right)} \tag{5.2}$$

где $G_{п}$ – производительность установки,

B – ширина ленты,

h – высота слоя сыпучего материала на ленте,

$\rho_н$ – насыпная плотность сыпучего материала.

Ширина ленты однозначно определяется в зависимости от ширины массообменных модулей. Максимальная высота слоя сыпучего материала на ленте регламентирована условиями предотвращения выхода СВЧ поля за пределы установки, то есть конструкцией волноводов.

Время сушки определяется как отношение разности начального и конечного влагосодержания продукта к средней скорости сушки. Скорость сушки определяется формулой (5.3):

$$N_C = \beta \cdot S_{уд} \cdot \left(x_{гр} - x_{воз} \right) \cdot \frac{\rho_{воз}}{\rho_{пр}} \tag{5.3}$$

где $S_{уд}$ – удельная поверхность материала,

$\rho_{воз}$, $\rho_{пр}$ – плотность воздуха и продукта соответственно,

$x_{гр}$, $x_{воз}$ – влагосодержание влажного воздуха на границе раздела фаз и в объёме.

$$x_{гр} = 0,622 \cdot \frac{a_w \cdot P}{P - a_w \cdot P_S} \tag{5.4}$$

где P – давление воздуха в сушилке,

P_S – давление насыщенного водяного пара при температуре в камере,

a_w – коэффициент активности воды.

Коэффициент массоотдачи β определяется из уравнения (3.48) как:

$$\beta = Sh \cdot \frac{D}{L_K} \tag{5.5}$$

где L_K – размер камеры,

D – коэффициент диффузии водяного пара в воздух.

Коэффициенты уравнения (3.48) определяем из таблиц 4.11, 4.20 в зависимости от вида сушки и типа высушиваемого продукта. Для

комбинированного типа сушки коэффициент массоотдачи определяется по уравнению аддитивности как:

$$\beta = \beta_{ИК} + \beta_{СВЧ} \tag{5.6}$$

где $\beta_{ИК}$ – коэффициент массоотдачи, рассчитанный по уравнению (3.48) в условиях ИК излучения,

$\beta_{СВЧ}$ – коэффициент массоотдачи, рассчитанный по уравнению (3.48) в условиях СВЧ-излучения.

Числа подобия, входящие в уравнение (3.48), рассчитывают по формулам (4.5–4.8), причем для расчета числа Bu в числителе находится соответствующая составляющая общей мощности установки: мощность ИК излучателей для расчета $\beta_{ИК}$ и мощность СВЧ излучателей для расчета $\beta_{СВЧ}$.

В знаменателе в качестве удельной удаленной влаги $W_{уд}$ принят расход влаги, удаляемый при однопроцентном снижении влагосодержания продукта в первом модуле.

$$W_{уд} = G \cdot 0{,}01 \tag{5.7}$$

Алгоритм конструктивного расчета сушилки представлен на рисунке 5.1.

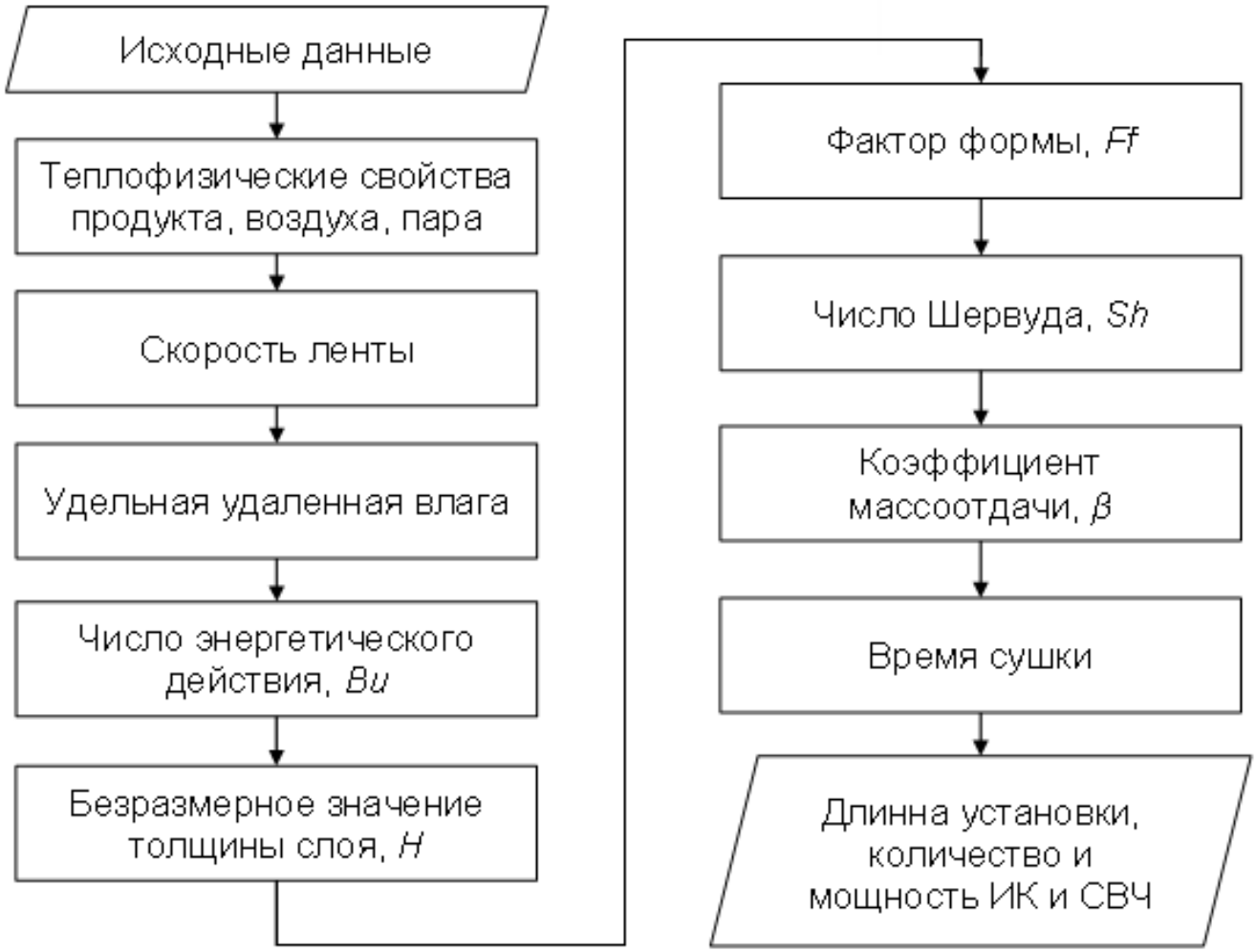


Рисунок 5.1. Алгоритм конструктивного расчета сушилки

Исходными данными для расчета являются:

1) технологические параметры – начальная и конечная влажность продукта $W_н$, $W_к$, производительность установки Gn, начальная температура продукта $t_{пн}$;

2) вид продукта и его свойства – высота слоя продукта, насыпная плотность продукта, удельная поверхность продукта;

3) регламентированные параметры установки – длина камеры L_K, ширина ленты транспортера B, заданная мощность установки и соотношение между мощностью СВЧ и ИК излучателей.

4) параметры окружающей среды – температура воздуха, относительная влажность воздуха.

На первом этапе расчета по параметрам продукта и окружающей среды определяются свойства продукта, такие как равновесное влагосодержание продукта и коэффициент активности воды. Далее определяется парциальное давление водяного пара в окружающем воздухе и теплофизические свойства водяного пара, такие как давление насыщенного водяного пара, удельная теплота парообразования и коэффициент диффузии водяного пара в воздухе.

На следующем этапе определяем скорость движения ленты транспортера по уравнению (5.2). Далее определяем удельную удаленную влагу $W_{уд}$ по формуле (5.7), и число Пекле и число энергетического действия по формулам, приведенным в таблице 3.13. Используя полученные значения чисел подобия в зависимости от типа высушиваемого продукта и способа подвода энергии рассчитывается число Шервуда для каждого типа энергоподвода и соответствующие значения коэффициентов массоотдачи. Обобщенный коэффициент массоотдачи определяется по уравнению аддитивности (5.6). По значению обобщенного коэффициента массоотдачи по уравнению (5.3) определяется скорость сушки в первом периоде, являющаяся максимальной скоростью сушки при данных условиях $N_{\max}$. Зная скорость сушки в первом периоде по уравнению (5.2) определяют время сушки $\tau_{суш}$, которое является временем нахождения продукта в установке.

По определённому значению времени нахождения продукта в установке по формуле (5.1) определяется длина установки $L_{уст}$. Далее определяется количество массообменных модулей как:

$$n = \frac{L_{уст}}{L_K + L_{доп}} \tag{5.8}$$

где $L_{доп}$ – расстояние между массообменными модулями.

На последнем этапе рассчитывается мощность ИК излучателей отдельного ИК модуля $N_{ИК}$ и мощность СВЧ излучателей отдельного СВЧ модуля $N_{СВЧ}$ по уравнениям:

$$N_{ИК} = 2 \cdot N_{уст} \cdot \frac{k_{ИК}}{n} \tag{5.9}$$

$$N_{СВЧ} = 2 \cdot N_{уст} \cdot \frac{(1 - k_{ИК})}{n} \tag{5.10}$$

где $k_{ИК}$ – отношение мощности ИК излучателей к суммарной мощности излучателей установки.

Для выяснения параметров существующей установки необходимо выполнить проверочный расчет, алгоритм которого приведен на рисунке 5.2.

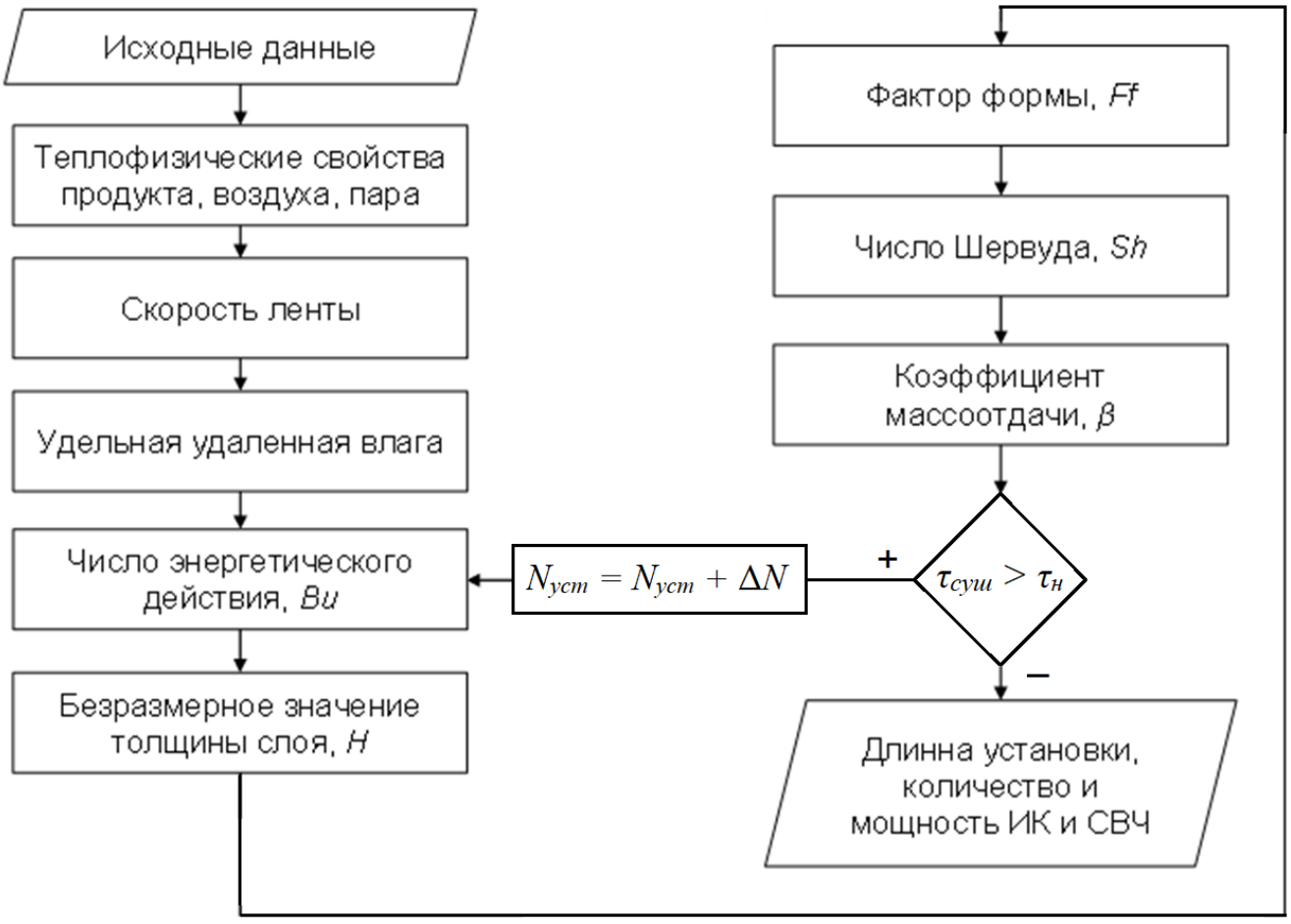


Рисунок 5.2. Алгоритм проверочного расчета сушилки

Целью проверочного расчета сушилки является определить соответствует ли время нахождения продукта в установке $\tau_н$ нужному времени сушки $\tau_{суш}$.

Входными данными для проверочного расчета являются:

1) технологические параметры – начальное и конечное влагосодержание продукта $W_н$, $W_к$, производительность установки Gn, начальная температура продукта $t_{пн}$;

2) вид продукта и его свойства – высота слоя продукта, насыпная плотность продукта, удельная поверхность продукта;

3) регламентированные параметры установки – длина камеры $L_К$, ширина ленты транспортера B, заданная мощность установки и количество массообменных модулей n.

4) параметры окружающей среды – температура воздуха, относительная влажность воздуха.

На первом этапе расчета по параметрам продукта и окружающей среды определяются свойства продукта, такие как равновесное влагосодержание продукта и коэффициент активности воды. Далее определяется парциальное давление водяного пара в окружающем воздухе и теплофизические свойства водяного пара, такие как давление насыщенного водяного пара, удельная теплота парообразования и коэффициент диффузии водяного пара в воздухе.

На следующем этапе определяем скорость движения ленты транспортера по уравнению (5.2) и длину установки как:

$$L_{уст} = \frac{L_К + L_{доп}}{n} \tag{5.11}$$

Время нахождения продукта в установке определяем как:

$$\tau_{суш} = \frac{L_{уст}}{\omega_Л} \tag{5.12}$$

Рассчитывается общая мощность ИК излучателей $N_{устИК}$ и общая мощность СВЧ излучателей $N_{устСВЧ}$ по уравнению:

$$N_{устИК} = \frac{N_{ИК} \cdot n}{2} \tag{5.13}$$

$$N_{устСВЧ} = \frac{N_{СВЧ} \cdot n}{2} \quad (5.14)$$

Далее определяем удельную удаленную влагу $W_{уд}$ по формуле (5.7), и число Пекле и число энергетического действия для каждого из видов энергоподвода по формулам, приведенным в таблице 3.13.

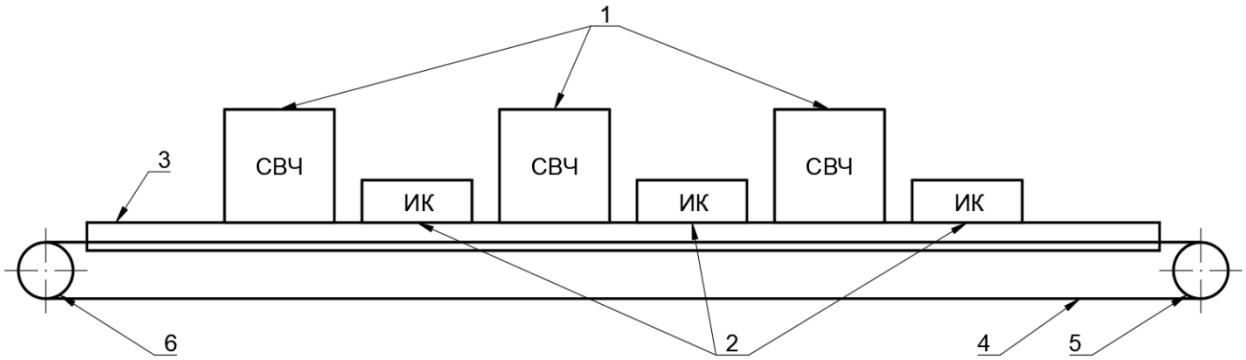
Используя полученные значения чисел сходства в зависимости от типа высушиваемого продукта и способа подвода энергии рассчитывается число Шервуда для каждого типа энергоподвода и соответствующие значения коэффициентов массоотдачи. Обобщенный коэффициент массоотдачи определяется по уравнению аддитивности (5.6). По значению обобщенного коэффициента массоотдачи по уравнению (5.3) определяется скорость сушки в первом периоде, являющаяся максимальной скоростью сушки при данных условиях $N_{\max}$. Зная скорость сушки в первом периоде по уравнению (5.12) определяют время сушки $\tau_{суш}$.

Если определенное время сушки не меньше времени нахождения продукта в установке, то увеличивают мощность излучателей на заранее заданную величину и повторяют расчеты времени сушки для новых значений мощности.

5.2. Разработка пилотной установки многозонной комбинированной ленточной СВЧ–ИК сушилки

С помощью разработанных методик была рассчитана и создана экспериментальная ленточная установка для обезвоживания растительного сырья электромагнитным полем СВЧ и ИК (рисунок 5.3), предназначенная для сушки растительного сырья. Установка представляет собой ленточный транспортер, на котором размещены СВЧ и ИК модули. СВЧ модуль (1) состоит из магнетрона, волновода, резонаторной камеры, вентилятора и высоковольтного трансформатора. Модуль решает задачи передачи энергии продукту и отвода водяных паров из внутреннего пространства сушилки. Модуль ИК обработки (2) содержит два

кварцевых ИК излучателя, расположенных на расстоянии 13 см от поверхности ленты транспортера. Скорость ленточного привода и грузоподъемность регулируются в широком диапазоне (0,001–0,035 м/с). Мощность излучателей имеет пошаговое управление в диапазоне 30–100 % от номинальной мощности магнетрона. Ленточная сушилка имеет последовательные зоны микроволнового и инфракрасного воздействия на продукт. Контроль мощности осуществляется посредством импульсной модуляции. Внешний вид устройства показан на рисунках 5.3 и 5.4. Сырой продукт на сушку поступает в установку через бункер загрузки, с которого поступает на ленточный конвейер, последовательно проходящий через три группы СВЧ и ИК модулей, где на продукт поочередно влияют микроволновое и инфракрасное излучение. Высушенный продукт выгружается в бункер выгрузки. Корпус установки покрыт тепловой изоляцией.



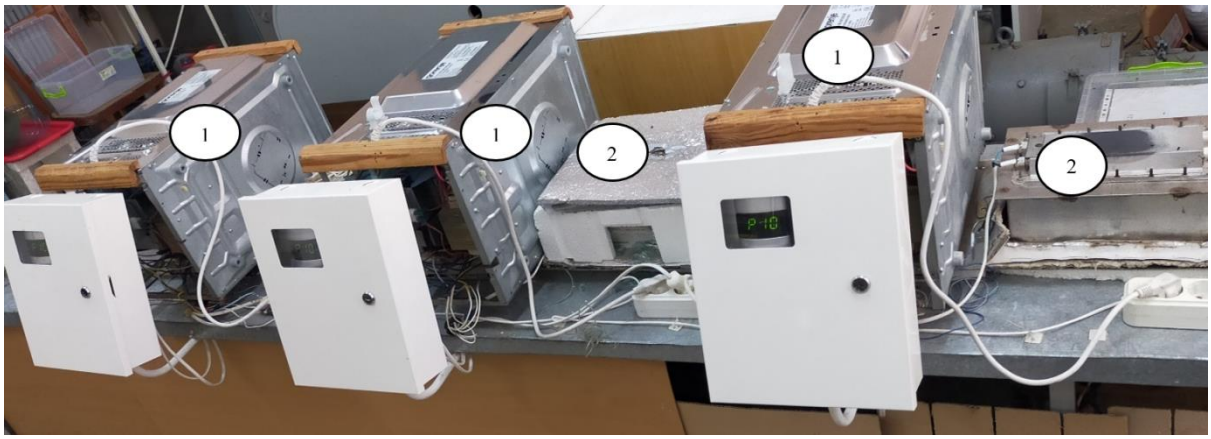


Рисунок 5.3. Экспериментальная опытно-промышленная ленточная сушилка.
1 – СВЧ модули, 2 – ИК модули, 3 – радионепрозрачный канал,
4 – лента, 5 – приводной барабан, 6 – натяжной барабан

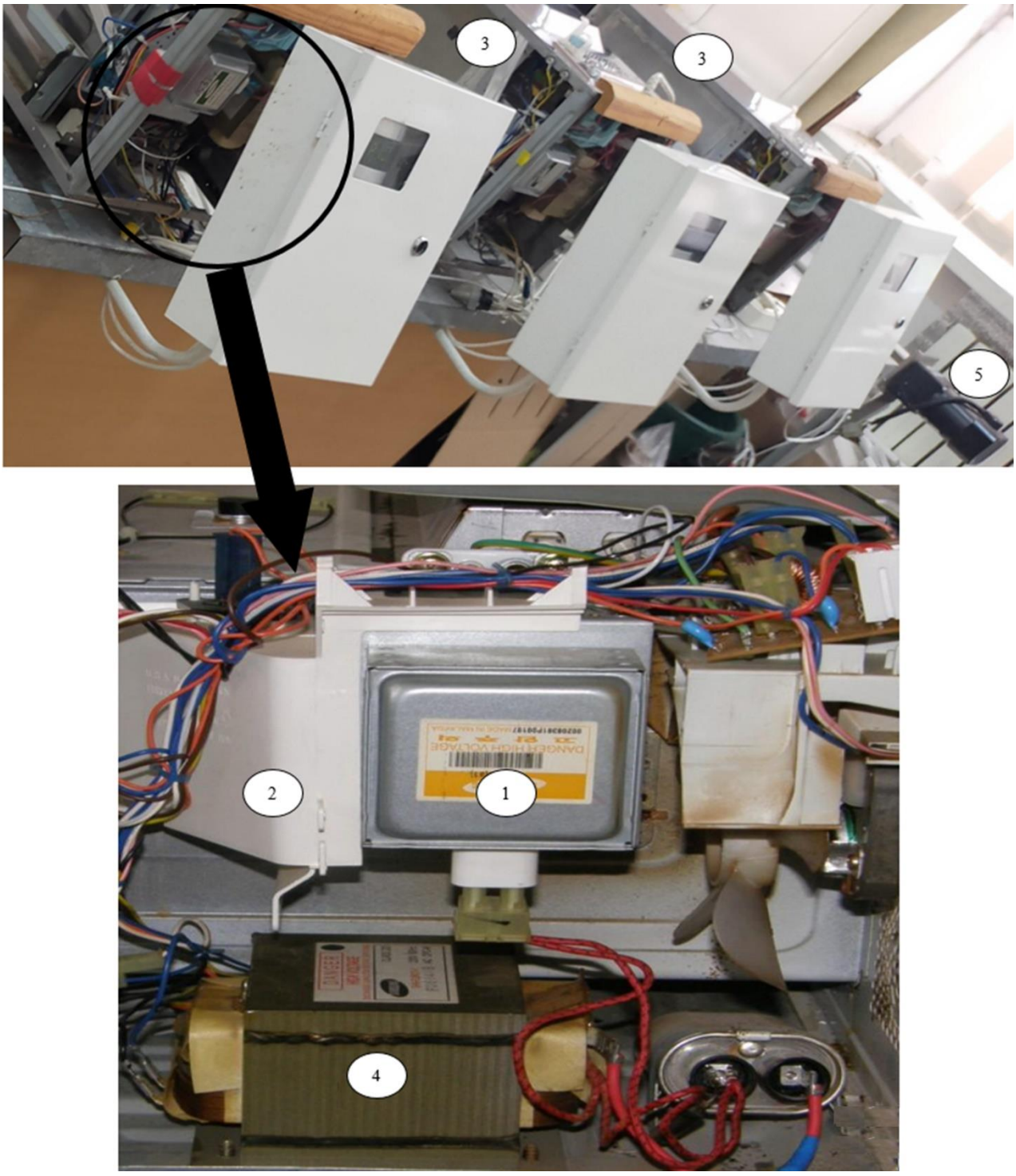


Рисунок 5.4. СВЧ модуль. 1 – магнетрон, 2 – волновод,
3 – резонаторная камера, 4 – высоковольтный трансформатор,
5 – электродвигатель Oriental Motor 6 – 90 W.

Установка представляет собой ленточный транспортер, на котором размещены СВЧ и ИК модули. СВЧ модуль (1) состоит из магнетрона, волновода, резонаторной камеры, вентилятора и высоковольтного трансформатора.

Модуль решает задачи передачи энергии продукту и отвода водяных паров из внутреннего пространства сушилки. Модуль ИК обработки (2) (рисунок 5.5) содержит два кварцевых ИК излучателя, расположенных на расстоянии 13 см от поверхности ленты транспортера. Мощность излучателей регулируется тиристорными регуляторами напряжения в диапазоне от 0 до 1100 Вт.

Рисунок 5.5. Модуль ИК обработки

Лента приводится в движение электродвигателем Oriental Motor 6–90 W (рисунок 5.4), с регулируемым количеством оборотов, что позволяет изменять скорость движения ленты в широком диапазоне от 0 до 35 мм/с.

Конструкция канала, выполненного в виде запредельного волновода (рисунок 5.6), обеспечивает отсутствие СВЧ излучения снаружи установки через места загрузки и разгрузки продукта.

Рисунок 5.6. Запредельный волновод

Задачами экспериментальной установки было проведение испытания для определения зависимостей, которые характеризуют кинетику процесса нагрева сырья электромагнитным полем и удаления влаги в подвижном слое растительного сырья.

Особенностью ленточной сушилки является то, что нагрев подвижного плотного слоя сырья осуществляется за счет нагрева влажного диэлектрического материала частей сырья в среде электромагнитного поля ИК и СВЧ диапазона. Удаление влаги, испаряющейся с поверхности продукта в результате ИК и СВЧ нагрева, происходит посредством воздушного потока, транспортирующего влагу за пределы сушильных камер.

Расчетная производительность экспериментальной установки 5 кг/ч, при снижении влажности с 85 до 12 %.

5.3. Энергетические характеристики разработанной сушилки

Одним из важнейших энергетических показателей является удельный расход энергии на килограмм удаленной влаги. Экспериментальные исследования разработанной сушилки показали, что удельные затраты энергии при сушке такого сырья как яблоко, картофель, морковь и пр. находятся на уровне лучших показателей в отрасли (Раздел 4).

5.4. Апробация промышленного образца ленточной СВЧ–ИК сушилки

Экспериментальная ленточная установка для обезвоживания растительного сырья в электромагнитном поле СВЧ и ИК излучения прошла производственные испытания в ООО «Борис-Агро» (приложение Е), ИП КФХ «Шаботенко А.А.» (приложение Ж), ООО «Сады Бахчисарая» (приложение И), АО «Крымская фруктовая компания» (приложение К) Республика Крым.

Перед началом каждого испытания устанавливался заданный режим работы: мощность излучения для каждой из шести камер и производительность установки

заданием скорости движения ленты конвейера. В ходе испытаний контролировалась температура слоя продукта во избежание повышения предельно допустимых температур. Испытания проводились в линии производства сушеных яблок, моркови, картофеля и пр.(таблица 5.1).

Результаты испытаний экспериментальной ленточной установки для обезвоживания растительного сырья в электромагнитном поле показали, что применение микроволнового и инфракрасного сушильного оборудования позволило получить высокопроизводительный экологически чистый технологический процесс, гарантирующий высокое сохранение исходных качественных характеристик высушенного сырья при показателях энергоемкости процесса около 4 МДж/кг удаленной влаги.

Таблица 5.1 – Результаты испытаний на ленточной сушилке

№	Продукт	Тип энергии	Рекомендованные параметры			Энерго-затраты МДж/кг	Влажность	
			Мощ-ность, кВт	Производи-тельность, кг/ч	Скорость ленты, м/с		началь-ная, %	конеч-ная, %
1	Яблоко	ИК	1,5	5,2	0,002	3,76	85	11
		СВЧ	3					
2	Карто-фель	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					

5.5. Экономический эффект внедрения инновационного оборудования на производстве

Наиболее энергоемкими в АПК являются технологии обезвоживания пищевого сырья. Строгих методов оценки энергетической эффективности, особенно инновационных энерготехнологий, нет. Нерешенные проблемы возникают при сравнении энергоэффективности электротехнологий и теплотехнологий, поскольку используются различные виды энергии; отсутствуют

объективные показатели эффективности использования энергии в различных технологиях обезвоживании сырья. Эксергетические методы удобны только для термодинамического анализа, экономические показатели не стабильны. Известные методы энергетического менеджмента, которые оперируют коэффициентом удельного энергопотребления (*КУЭ*), и удельным расходом энергии на 1 кг удаленной влаги $\left(J\right)$, не дают корректные результаты. Поэтому целесообразно провести оценку энергетической эффективности технологий при помощи методов энергетического менеджмента.

Ленточная сушилка с комбинированным ИК–СВЧ энергоподводом и микроволновой выпарной аппарат используют электрическую энергию. А традиционные аппараты для концентрирования и сушки – другие виды энергии.

Методология энергетического менеджмента основана на системном анализе всей технологической цепочки «первичное топливо – его трансформации в соответствующий вид энергии – распределительная сеть – потребитель» приведена в разделе 2.

Приведенные выше результаты производственных испытаний пилотных образцов сушильной техники согласуются с результатами анализа энергоэффективности приведенными в разделе 5.

Предлагаемые разработки были проанализированы с точки зрения коммерческой привлекательности.

В первую очередь проанализирована экономическая эффективность использования комбинированной СВЧ–ИК сушилки. Для чего было выполнено классическое сравнение капитальных затрат на изготовление установки с экономическим эффектом от ее внедрения. Для начала оценим капитальные затраты на изготовление установки.

Стоимость основных комплектующих и сборки для сушилки производительностью 5 кг/ч приведена в таблице 5.2.

Ориентировочная стоимость сушилки производительностью по сырью 5 кг/ч составляет 40 тыс. руб. Это достигается за счет использования маломощных магнетронов с воздушным охлаждением. Увеличение производительности в таком случае достигается прямым масштабированием.

Таблица 5.2. Стоимость основных комплектующих комбинированной сушилки

Наименование	Цена	Количество	Сумма, руб
Магнетрон	1500	3	4500
ИК излучатель	1500	3	4500
Корпус	1000	3	3000
Сборка	600	4	2400
Мотор-редуктор NMRV030/10	7800	1	7800
Лента конвейерная 2П-300-2-ТК-200-2-1-1	480	6	2880
Автоматика	2500	3	7500
Барабаны, ролики	1500	4	6000
Вентиляторы вытяжные	250	3	750
Сумма			39330

Учитывая сезонность производства, для оценки возможного количества высушенной продукции, произведенной на установке за год, примем время работы установки в течение 90 дней в год при двухсменном режиме работы и длительности смены 8 часов. Полученные в результате значения стоимостей сушилок и соответствующих величин возможной сезонной производительности по фруктово-овощному сырью приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3. Стоимости сушилок в зависимости от производительности

Производительность по сырью, кг/ч	Стоимость, тыс. руб.	Производительность по сухому продукту, в кг/год
5	40	1224
10	80	2448
20	160	4896
50	400	12240
100	800	24480

Для оценки коммерческой привлекательности использования сушилки для разных типов фруктово-овощного сырья было проведено оценочное сравнение рыночной стоимости высушенных продуктов со стоимостью сырья и энергии необходимой для их производства. Энергетические затраты на процесс сушки определялись по результатам проведенных производственных испытаний.

Следует учесть, что в таблице 5.4 принята стоимость яблок как сырья 5 руб/кг, что соответствует стоимости уборки урожая в собственных садах. При рыночной стоимости яблок в 40 руб/кг переработка их в сушеную продукцию становится экономически нецелесообразной, кроме использования их в составе ассорти из фруктовых чипсов и яблочных слайсов, которые могут быть произведены на данной установке.

Умножив полученную величину разницы в стоимости готовой продукции и стоимости сырья и энергии, обозначенную в таблице 5.4 как дельта, на производительность установки за сезон за вычетом зарплаты обслуживающего персонала, которая за сезон составит 60 тыс. руб., получим оценочную величину годовой прибыли от использования установки.

Таблица 5.4. Стоимость сырья и энергии в единице продукции

Продукт	Цена, руб/кг	Цена сырья, руб/кг	Выход на 1кг	Себесто-имость в сырье, руб/кг	Стоимость энергии, руб/кг	Дельта, руб/кг
Свекла сушеная кубик 5х5	350	9	0,12	75	35	240
Картофель сушеный	170	14	0,21	66	36,5	68
Морковь сушеная	260	10	0,15	67	43	150
Яблоко сушеное кольцо без кожуры	440	40	0,11	45	34	42
Яблоко сушеное (кубики) 5–7 мм	285	5	0,15	33	34	218
Яблоко сушеное	70	5	0,2	25	34	11
Ассорти из фруктовых чипсов.	3900	40	0,08	500	35	3365
Лук сушеный	110	14	0,2	70	35	5

Таблица 5.5. Сезонная прибыль от использования установки

Производи-тельность 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

Как видно из Таблицы 5.5 в случае производства сушеной свеклы и моркови установка окупится менее чем за сезон. При производстве сушеного картофеля установка с производительностью по сырью 5 кг/ч окупится за 2 сезона, увеличение же производительности в 2 раза позволит окупить установку за сезон. Интересная картина наблюдается при производстве яблочных слайсов. Здесь установка производительностью 50 кг/ч окупится за 1 сезон, а для меньшей производительности срок окупаемости составит 1,09 и 1,83 сезона при производительности 20 и 10 кг/ч соответственно. Такая картина связана с тем, что для расчетов принята стоимость сырья в 40 руб/кг. Естественно, в сезон оптовая цена яблок может быть меньше и показатели экономической привлекательности улучшатся. Для яблок собственного производства срок окупаемости установки будет в пределах сезона.

5.6. Инженерная методика расчета и оптимизации СВЧ вакуум-выпарных установок

Теплофизические модели, приведенные на рисунке (3.9), позволяют сравнить принципы организации процесса выпаривания в традиционных и в предлагаемом аппаратах. Видно, что энергетическое взаимодействие проходит принципиально не одинаково. В традиционных аппаратах все основано на теплопередаче. Формирование пограничного слоя у поверхности теплообмена является барьером

для теплового потока. Особенно это важно при повышении концентрации продукта. Именно величина пограничного слоя является основной проблемой при расчетах традиционных выпарных аппаратов. В предлагаемой микроволновой установке реализуется объемный подвод энергии непосредственно к воде. Здесь нет вообще пограничного слоя, следовательно, нет и основной проблемы в расчете аппарата.

Обобщенный алгоритм расчета серьезно упрощается (рисунок 5.7).

Исходными данными для расчета являются:

– объем сока, который следует концентрировать, V_C;

– значения начальной $\left(X_H\right)$ и конечной $\left(X_K\right)$ концентраций сока;

– время процесса, τ;

– электрическая мощность одного источника энергии, модуля, $\left(N_i\right)$.

Рисунок 5.7. Алгоритм расчета СВЧ вакуум-выпарного аппарата

Объем влаги в соке, которую следует удалить $\left(V_в\right)$, т.е. объем вторичного пара определим из материального баланса аппарата, составленного на основе (3.5):

$$\left.\begin{aligned} V_K + V_в &= V_C \\ V_K X_K &= V_H X_H \end{aligned}\right\} \qquad (5.15)$$

из (5.15) определяется объем вторичного пара:

$$V_в = V_C - V_H \cdot \frac{X_H}{X_Л} \qquad (5.16)$$

Дальнейшая процедура расчета приведена на рисунке 5.8.

Видно (рисунок 5.8), что расчет СВЧ аппарата предельно прост, он не требует громоздких методов итерационного проектирования и может быть использован как для проектирования таких аппаратов, так и для их оптимизации.

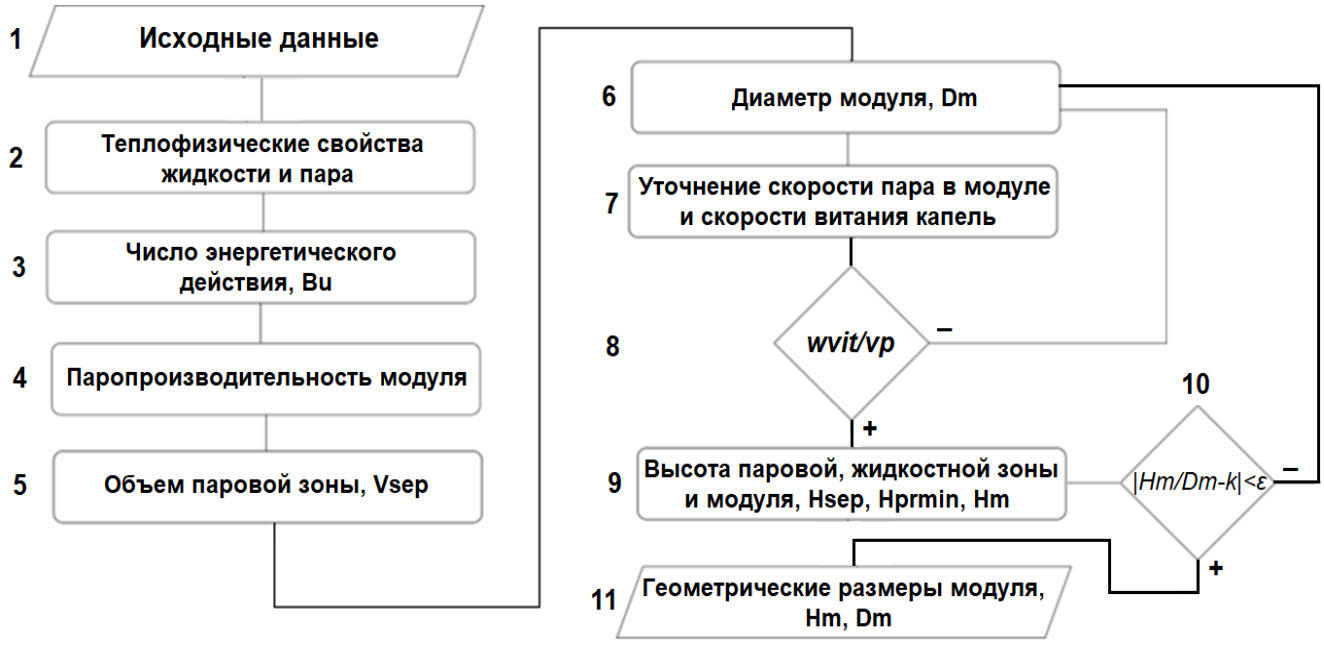


Рисунок 5.8. Алгоритм расчета числа СВЧ модулей

Для расчета промышленного аппарата, предназначенного для выпаривания продукта энергией поля СВЧ по заданной производительности, необходимо выбрать следующие основные характеристики: геометрию 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).

5.6.1. Геометрия рабочего объема

При выборе геометрии рабочего объема модуля следует руководствоваться показателями металлоемкости модуля, технологичности изготовления, удобства

эксплуатации. С точки зрения металлоемкости, наиболее выгодной формой модуля является сфера, однако такая форма имеет свои недостатки. Аппараты цилиндрической формы более технологичны в изготовлении и удобны для использования в модульных аппаратах.

Для модуля цилиндрической формы основными размерами являются диаметр (Dm) и высота (Hm) (рисунок 5.9).

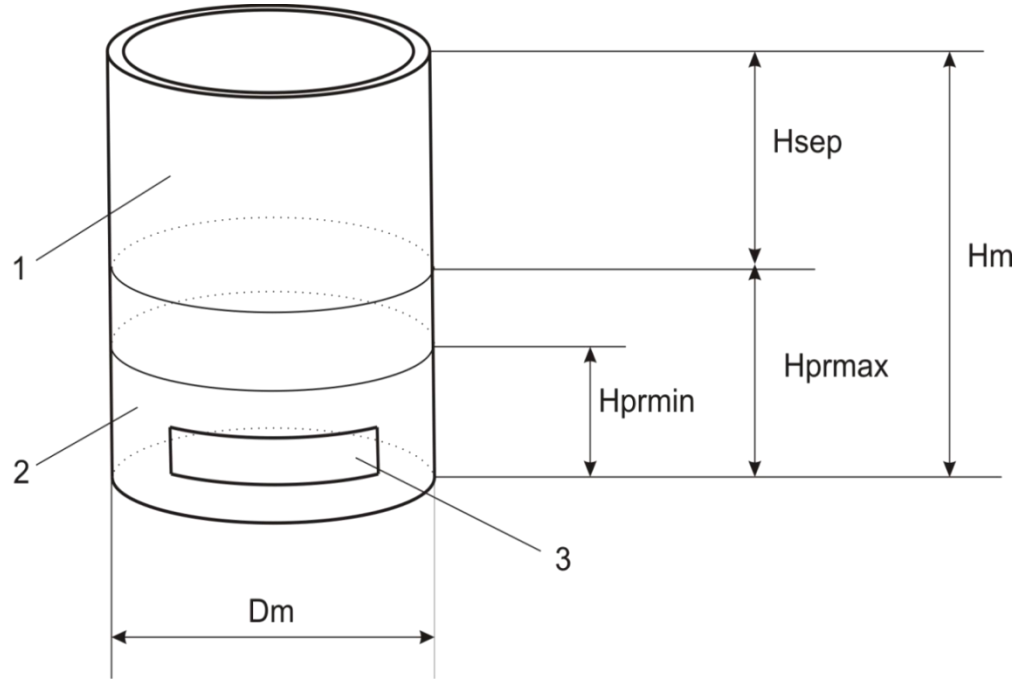


Рисунок 5.9. Схема СВЧ модуля: 1 – зона сепарации пара, 2 – зона кипения продукта, 3 – окно подключения волновода

При этом модуль условно делится на две зоны: зона кипения жидкого продукта и зона сепарации вторичного пара. Диаметр зоны кипения продукта должен быть не менее половины глубины проникновения СВЧ поля в продукт. Диаметр зоны сепарации пара регламентируется влагонапряженностью парового пространства и скоростью движения пара в нем. Учитывая размеры модуля, целесообразно, чтобы обе зоны модуля имели одинаковый диаметр, т.е. были размещены в одной цилиндрической емкости, что положительно скажется на надежности модуля, технологичности и стоимости его изготовления. Таким образом, высота модуля складывается из высоты зоны кипения жидкости $(Hpr\max)$ и высоты зоны сепарации

пара $(Hsep)$. Минимальная высота зоны кипения $(Hpr\min)$ определяется высотой окна волновода для подвода микроволновой энергии плюс две глубины проникновения микроволнового поля в продукт. Высота зоны сепарации зависит от необходимого объема парового пространства и диаметра сепаратора.

Глубина проникновения поля определяется по зависимости [374]:

$$dp = \frac{\lambda \cdot \sqrt{\varepsilon'}}{2\pi \cdot \varepsilon''}, \text{ м} \tag{5.17}$$

где λ – длинна волны, м;

ε' – действительная диэлектрическая постоянная материала,

ε'' – мнимая диэлектрическая постоянная материала.

При частоте излучения 2,45 ГГц длина волны составляет 12 см и глубина проникновения излучения в воду получается 15,6 мм. Исходя из этого, считаем, что диаметр модуля регламентируется диаметром парового сепаратора. Кроме того, величина глубины проникновения позволяет определить минимальную высоту уровня жидкой фазы в модуле на уровне 60 мм.

Диаметр модуля определим как диаметр парового сепаратора [77]:

$$Dm = \sqrt{\frac{W_{vtp} \cdot \gamma_v}{v_p \cdot 0,785}} \tag{5.18}$$

где W_{vtp} – паропроизводительность модуля,

γ_v – удельный объём пара при давлении в модуле,

v_p – скорость пара в модуле.

Максимальная скорость пара выбирается в зависимости от давления в модуле по [78, 392], но не должна превышать скорость витания капли, которая определяется по формуле:

$$w_{vit} := \sqrt{\frac{4g \cdot \left(p_{lic} - p_{vap}\right) \cdot d_{kap}}{3\xi \cdot p_{vap}}} \tag{5.19}$$

где d_{kap} – диаметр капли, равен 0,6 мм;

p_{lic}, p_{vap} – плотности жидкой и газовой фазы;

ξ – коэффициент сопротивления, зависит от числа Рейнольдса:

$$\xi = 18,5 \cdot \mathrm{Re}^{0,6} \tag{5.20}$$

Уравнение (5.20) справедливо для значений числа Рейнольдса в диапазоне от 0,2 до 500, при больших значениях числа Рейнольдса коэффициент сопротивления принимает значение 0,44.

Высота паровой зоны модуля определяется из учета обеспечения минимального объёма парового сепаратора:

$$H_{sep} = \frac{4 \cdot V_{sep}}{\pi \cdot D_m{}^2} \tag{5.21}$$

где $V_{sep} = W_{vtp} / W^0$ объём парового пространства;

W^0 – допустимое напряжение парового пространства.

Допустимое напряжение парового пространства зависит от давления в модуле и способа ввода парожидкостной смеси.

Общая высота модуля H_m равна сумме высот жидкостной и паровой зон. Алгоритм расчета конструктивных параметров СВЧ модуля показан на рисунке 5.4.

Исходными данными для расчета являются мощность магнетрона, частота излучения, вид продукта и давление в модуле. На втором этапе определяется температура кипения продукта в модуле, теплота парообразования, плотность жидкой и газовой фазы, а, также, действительная и мнимая диэлектрические проницаемости среды. На третьем этапе рассчитывают параметрический комплекс безразмерного давления и симплекс удельной теплоты фазового перехода, что дает возможность определить число энергетического действия. На четвертом этапе можно определить паропроизводительность модуля (скорость влагоизвлечения). На пятом этапе, в зависимости от вида сырья и давления в модуле, определяем допустимую паронапряженность паровой зоны, используя значение паронапряженности при атмосферном давлении и поправочный коэффициент, учитывающий давление в модуле (приложение Б), и объем паровой зоны модуля как отношение паропроизводительности к допустимой паронапряженности. На следующем этапе определяем допустимую скорость

пара в паровом пространстве модуля (приложение Б), а затем по формуле (5.18) определяем диаметр модуля. Получившееся значение D_m округляем до ближайшего типоразмера выпускаемых промышленностью труб. После этого, на седьмом этапе уточняем скорость пара в модуле и сравниваем ее на восьмом этапе со скоростью витания капли, определенной по зависимости (5.19). 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 9 и определяем высоту паровой части модуля, используя зависимость (5.21), минимальный уровень жидкой фазы в модуле и общую высоту модуля.

Алгоритм может быть дополнен блоком оптимизации массогабаритных показателей (рисунок 5.8).

В таком случае полученное отношение H_m/D_m сравнивается с заданным и, в случае несоответствия, соответствующим образом корректируется значение диаметра модуля.

Для определения типовых размеров модуля в соответствии с алгоритмом, представленном на рисунке 5.5, приняты следующие начальные условия. Рабочее давление в камере принято на уровне 7,4 кПа, что соответствует температурам кипения водных растворов около 40 °С. Такое условие принято исходя из условий эффективной работы данного модуля для использования в установках концентрирования термолабильных продуктов [55]. Для данного модуля предполагается использование излучателя электромагнитной энергии микроволнового диапазона с воздушным охлаждением. Диапазон мощностей промышленно выпускаемых излучателей находится в пределах 600–3000 Вт.

Для данных условий комплекс безразмерного давления составит 1,48 и симплекс удельной теплоты фазового перехода равен 4,57. Определенное по формуле 4.40 число энергетического действия $Bu = 1,46$.

Для магнетрона мощностью 600 Вт величина паропроизводительности составит 0,615 кг/час. Для определения минимального объёма парового сепаратора задаемся величиной напряженности парового пространства при атмосферном давлении, которая для водных растворов находится в диапазоне 500–1000 кг/(м^3·с). Напряженность парового пространства при рабочем давлении в модуле определяется как:

$$W^0 := W_{atm} \cdot f_2 \tag{5.22}$$

где W_{atm} – напряженность паровой камеры при атмосферных условиях;

f_2 – коэффициент учитывающий давление в модуле, равен 0,8 [392].

Для заданных условий напряженность парового пространства составит 800 кг/(м^3·ч). Минимальный объем парового пространства для разделения парожидкостной смеси при таком значении его напряженности составит 0,77 л.

Максимальная скорость пара в паровом пространстве, определенная по графику (приложение Б), составит 6 м/с. Тогда минимальный диаметр парового пространства, определяемый по формуле (5.18), составит 24 мм. Исходя из конструктивных соображений подключения волновода магнетрона к модулю, минимальный диаметр модуля ограничен 100 мм. Значение действительной скорости пара в паровом пространстве может быть выражено из формулы (5.18), и для диаметра модуля 100 мм составит 0,33 м/с, что меньше скорости витания капель жидкости, определенной по (5.19) и составляющей 1,6 м/с при числе Рейнольдса равном 6. Минимальная высота паровой части модуля составит 98 мм.

При расчете общей высоты модуля необходимо принять во внимание возникновение в процессе кипения переходного парожидкостного слоя на границе жидкой и паровой фазы. Высота этой переходной зоны зависит от скорости образования и разрушения паровых пузырей и может быть определена как:

$$h_{pz} := 1,41^3 \cdot \left[\frac{v_p{}^2}{g \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot \left(p_{lic} - p_{vap} \right)}}} \cdot \frac{p_{vap}}{p_{lic} - p_{vap}} \right]^{\frac{1}{2}} \times \times \left[\frac{\sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot \left(p_{lic} - p_{vap} \right)}}}{D_m} \right]^{\frac{1}{4}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot \left(p_{lic} - p_{vap} \right)}} \quad (5.23)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Для заданных условий 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 металлоемкости модуля возможно увеличение его диаметра до 150 мм. В таком модуле 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.

Расчеты параметров модулей с мощностью магнетрона от 700 до 3000 Вт приведены в (приложении А). Диапазон мощности выбран из условия наличия промышленно выпускаемых магнетронов с воздушным охлаждением. В результате расчетов, проведенных по алгоритму, представленному на рисунке 5.5 для водных растворов при давлении 7,4 кПа рассчитан типоразмерный ряд модулей с мощностью магнетрона от 600 до 3000 Вт (таблица 5.6).

Для модулей диаметром 100 мм, в целях унификации, предусмотрена возможность установки излучателей электромагнитной энергии мощностью от 600 до 1100 Вт, и принята высота модуля 250 мм, которая обеспечивает возможность

концентрирования водных растворов при максимальной мощности излучателя. В случае концентрирования сильно пенящихся растворов мощность излучателя может быть снижена, например, как предлагается для гранатового сока [136], или предлагается использование удлиненных модулей длиной 450 мм, что обеспечивает удвоенную высоту парового пространства в соответствии с рекомендациями [198].

Таблица 5.6. Типоразмерный ряд СВЧ выпарных модулей

Наименование	Диаметр, мм	Высота, мм	Мощность, Вт	Производительность по выпаренной влаге, кг/ч
М1-06	100	250	600	0,615
М1-07			700	0,717
М1-09	–	–	900	0,922
М1-10			1000	1,024
М1-11			1100	1,127
М1У-06		450	600	0,615
М1У-07			700	0,717
М1У-09			900	0,922
М1У-10			1000	1,024
М1У-11			1100	1,127
М2-06	150	150	600	0,615
М2-07			700	0,717
М2-09			900	0,922
М2-10			1000	1,024
М2-11			1100	1,127
М2У-06		300	600	0,615
М2У-07			700	0,717
М2У-09			900	0,922
М2У-10			1000	1,024
М2У-11			1100	1,127
М2У-20			2000	2,049
М2У-30			3000	3,073

Модуль диаметром 150 мм имеет две модификации. Первая высотой 150 мм, что обеспечивает наименьшую металлоемкость модуля, и вторая, высотой 300 мм для пенящихся растворов. Обе модификации позволяют устанавливать излучатели электромагнитной энергии СВЧ диапазона мощностью от 600 до 3000 Вт.

5.6.2. Режимные параметры модуля

Представленные в таблице 5.6 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. Учитывая, что эти параметры зависят от начальной и конечной концентрации продукта, обозначим коэффициент концентрирования как:

$$kk = \frac{b}{a} \tag{5.24}$$

где b – концентрация сухих веществ на выходе из модуля;

a – концентрация сухих веществ на входе в модуль.

Производительность модуля по сырью и концентрированному продукту зависит от коэффициента концентрирования и установленной мощности магнетрона. Такие зависимости для разработанных модулей в диапазоне kk от 1,5 до 8 представлены на (рисунок 5.7 и 5.8).

Одним из возможных применений микроволнового выпарного модуля может быть использование его как финальной стадии при многоступенчатом концентрировании, 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 (рисунок 5.9, 5.10).

Зависимости производительности модуля по сырью $G_н$ и конечному продукту $G_к$ представлены на (рисунок 5.11 и 5.12).

Обобщение данных в программе Table Curve 3D позволило определить общий вид уравнения для инженерного расчета производительности модуля по сырью $G_н$ (рисунок 5.11) и конечному продукту $G_к$ (рисунок 5.12) при заданных параметрах мощности и коэффициента концентрирования в виде экспоненциальных зависимостей:

$$G_н = e^{8{,}42+\frac{-57{,}4}{\ln(N)}+\frac{2{,}18}{kk^2}}, \text{ кг/ч} \qquad (5.25)$$

$$G_к = e^{4{,}28+\frac{-57{,}4}{\ln(N)}+\frac{5{,}74}{\sqrt{kk}}}, \text{ кг/ч} \qquad (5.26)$$

где N – установленная мощность магнетрона.

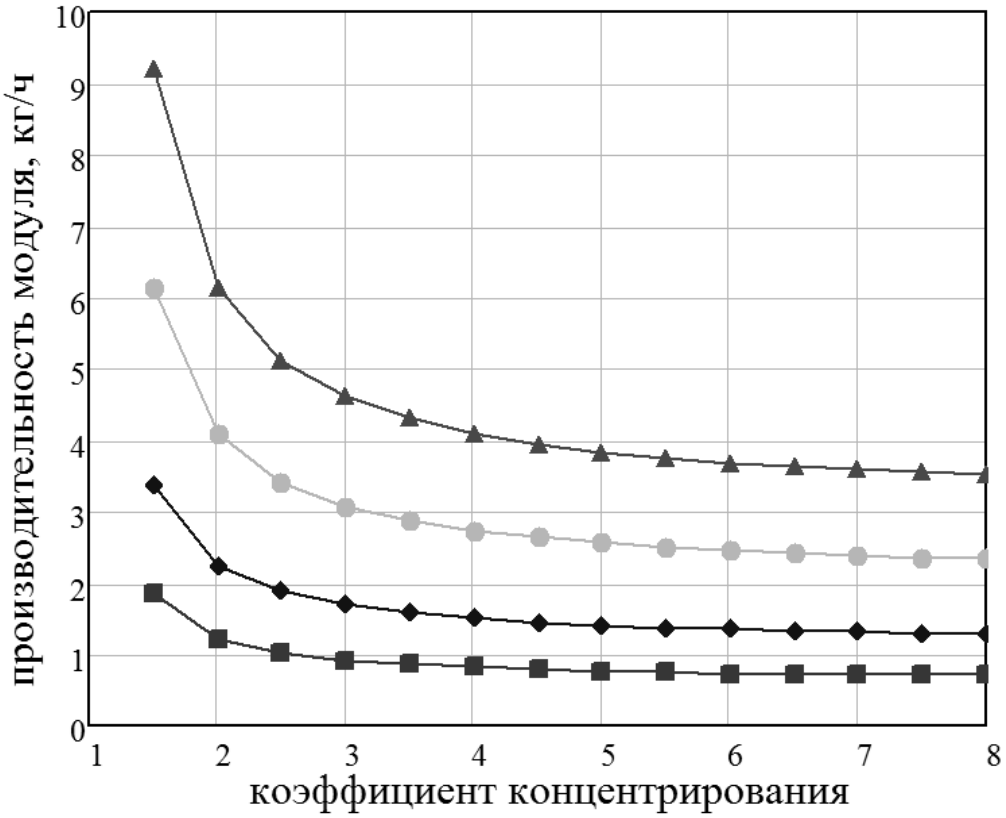


Рисунок 5.7. Зависимость производительности модуля по сырью от kk при установленной мощности магнетрона: ■ 700 Вт, ◊ 1100 Вт, ● 2000 Вт, ▲ 3000 Вт

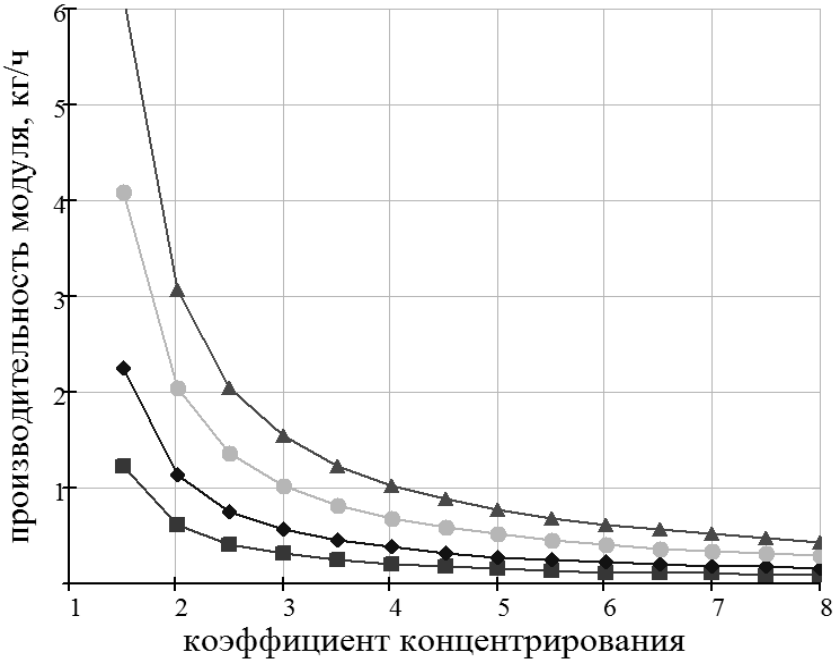


Рисунок 5.8. Зависимость производительности модуля по концентрированному продукту от *kk* при установленной мощности магнетрона:

■ 700 Вт, ◊ 1100 Вт, ● 2000 Вт, ▲ 3000 Вт

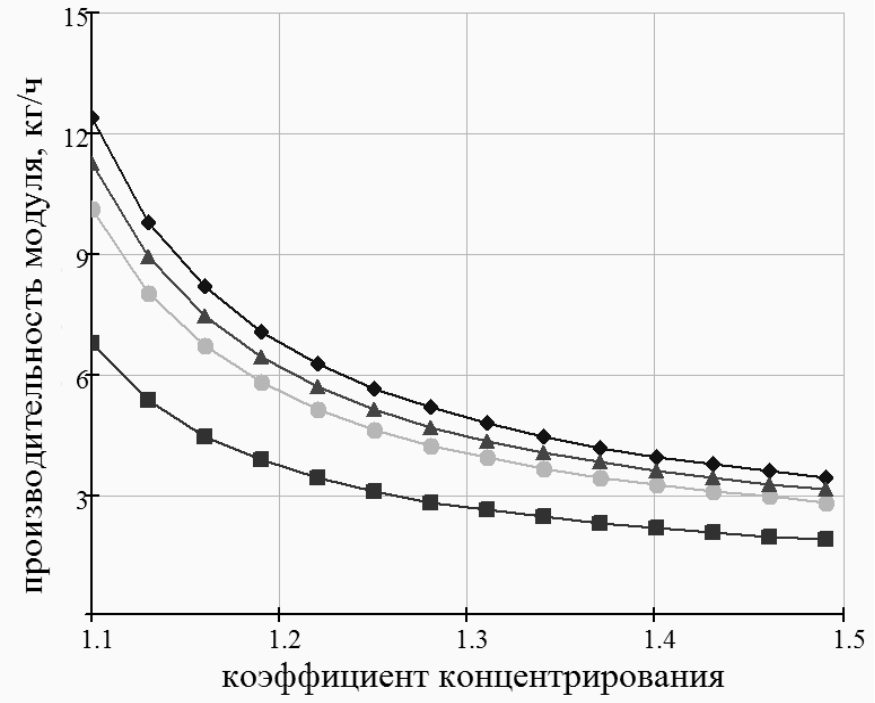


Рисунок 5.9. Зависимость производительности модуля по сырью от *kk* при установленной мощности магнетрона:

■ 700 Вт, ● 900 Вт, ▲ 1000 Вт, ◊ 1100 Вт

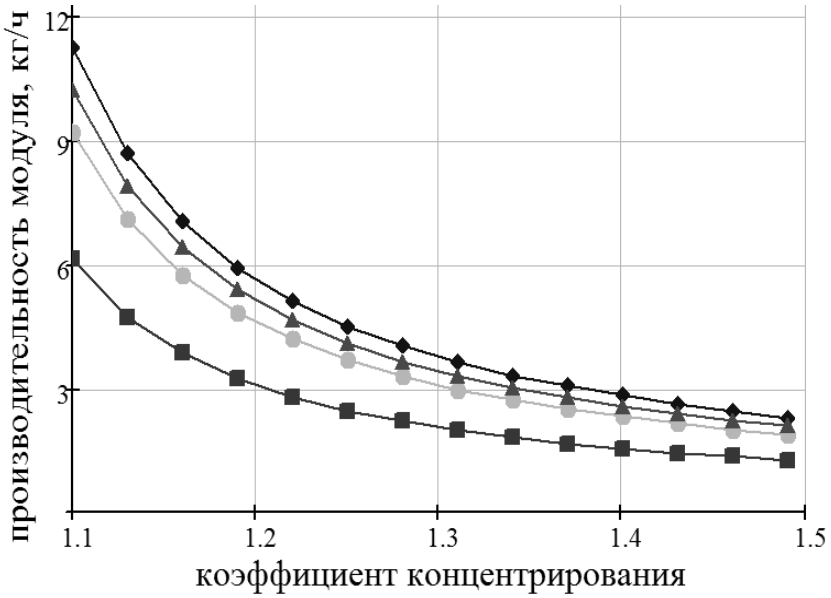


Рисунок 5.10. Зависимость производительности модуля по концентрированному продукту от *kk* при установленной мощности магнетрона:
■ 700 Вт, ● 900 Вт, ▲ 1000 Вт, ◊ 1100 Вт

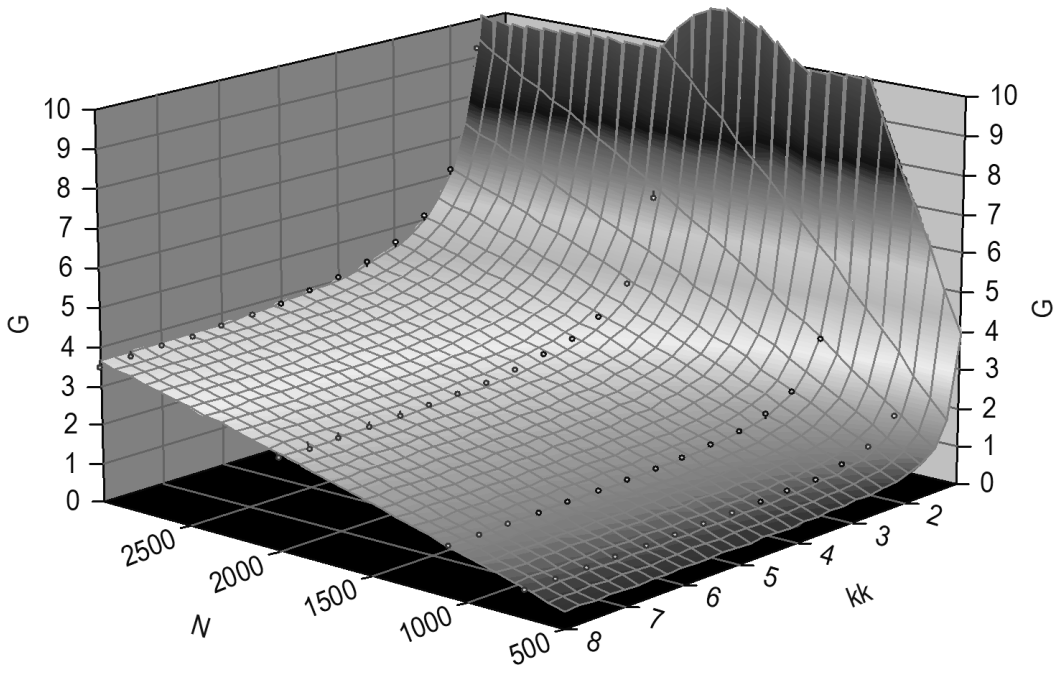


Рисунок 5.11. Зависимость производительности модуля по сырью ($G_н$, кг/ч) от *kk* и установленной мощности магнетрона (N)

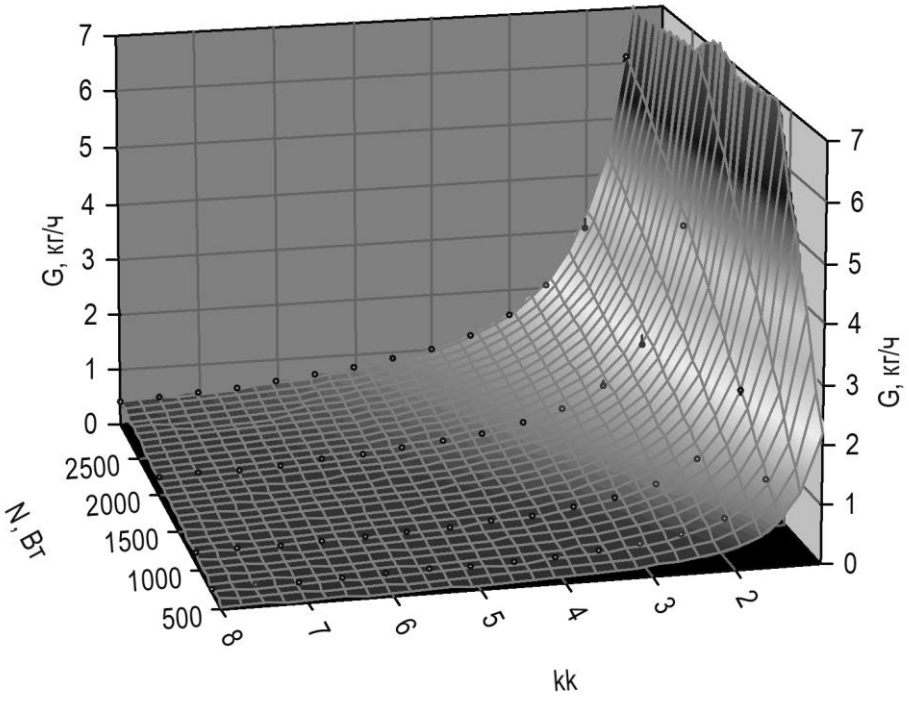


Рисунок 5.12. Зависимость производительности модуля по концентрированному продукту ($G_к$, кг/ч) от kk и установленной мощности магнетрона $\left(N\right)$

При работе модуля в периодическом режиме важными показателями становятся минимальный и максимальный объём продукта в модуле, максимальное время концентрирования и максимальный коэффициент концентрирования. Эти показатели, для разработанного типоразмерного ряда модулей приведены в таблице 5.7. Наибольшие коэффициенты концентрирования достигаются в модулях с установленными магнетронами мощностью 600 Вт, за счет меньшего необходимого объёма парового пространства.

Таблица 5.7. Режимные параметры модуля

Наименование	Минимальный объём продукта в модуле, л	Максимальный объём продукта в модуле, л	Максимальное время концентрирования, час	Максимальный коэффициент концентрирования
М1-06	0,47	1,20	1,41	2,54
М1-07	–	1,07	1	2,27
М1-09	–	0,81	0,44	1,72

Продолжение таблицы 5.7.

Наименование	Минимальный объём продукта в модуле, л	Максимальный объём продукта в модуле, л	Максимальное время концентрирования, час	Максимальный коэффициент концентрирования
М1-10	–	0,68	0,25	1,45
М1-11	–	0,56	0,09	1,18
М1У-06	0,47	2,77	4,48	5,87
М1У-07	–	2,64	3,62	5,60
М1У-09	–	2,38	2,49	5,05
М1У-10	–	2,25	2,09	4,78
М1У-11	–	2,13	1,76	4,51
М2-06	1,06	1,88	1,61	1,78
М2-07	–	1,75	1,16	1,66
М2-09	–	1,50	0,57	1,41
М2-10	–	1,37	0,36	1,29
М2-11	–	1,24	0,19	1,17
М2У-06	1,06	4,53	6,78	4,48
М2У-07	–	4,41	5,60	4,16
М2У-09	–	4,15	4,02	3,91
М2У-10	–	4,02	3,47	3,79
М2У-11	–	3,89	3,02	3,67
М2У-20	–	3,86	1,64	3,64
М2У-30	–	3,14	0,81	2,96

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

5.6.3. Определение паросодержания кипящего раствора

Выше было указано, что глубина проникновения СВЧ излучения в воду составляет 15,6 мм при температуре кипения раствора в модуле. Однако наличие паровых пузырей в жидкости с одной стороны увеличивает рассеивание микроволнового излучения за счет многократных частичных отражений в местах

перехода из жидкой фазы в паровую и из паровой в жидкую, а с другой стороны, в паровой фазе затухание электромагнитной волны происходит на порядок слабее. Это приводит к увеличению глубины проникновения микроволнового излучения. Для данной производительности модулей патрубки для подвода исходного продукта и отвода концентрированного продукта и пара могут быть выполнены в форме запредельных волноводов, чтобы гарантировать отсутствие утечек энергии. Для того чтобы обеспечить эффективное поглощение микроволновой энергии жидкой фазой и минимизировать перегрев паровой фазы и отражение энергии обратно в излучатель необходимо поддерживать уровень продукта над точкой ввода микроволнового излучения, превышающий минимально допустимый. Для определения такого уровня в главе 4 был рассмотрен процесс образования и роста паровых пузырей в жидкости.

Для упрощения задачи, приняв, что основное количество паровых пузырей образуется на уровне расположения ввода СВЧ-излучения, количество пузырей, которые образуются за время необходимое для достижения паровым пузырем границы раздела фаз, может быть определено как отношение паро-производительности модуля к паропроизводительности одного пузыря. Для модуля с излучателем электромагнитной энергии мощностью 600 Вт зависимость числа паровых пузырей от глубины точки их зарождения представлена на (рисунок 5.13).

Предположив, что зарождение паровых пузырей происходит через равные промежутки времени определим объемное паросодержение как отношение объема паровых пузырьков к объему парожидкостной смеси.

Для модуля диаметром 150 мм с излучателем мощностью 600 Вт распределение объемного паросодержания по высоте модуля представлено на (рисунок 5.14).

Усредненная высота слоя жидкости на каждом уровне может быть получена как отношение объема жидкой фазы, который определяется как разность объёма парожидкостной смеси и объёма пара, к площади поперечного сечения модуля (рисунок 5.15). Как видно из зависимости, на высоте слоя 42 мм над уровнем зарождения паровых пузырей наблюдается практическое отсутствие

жидкой фазы, однако усредненная суммарная высота уровня жидкой фазы над излучателем составляет 26 мм, что превышает глубину проникновения излучения в жидкость и, с учетом многократных частичных отражений от поверхностей раздела фаз, обеспечивает эффективное поглощение СВЧ энергии.

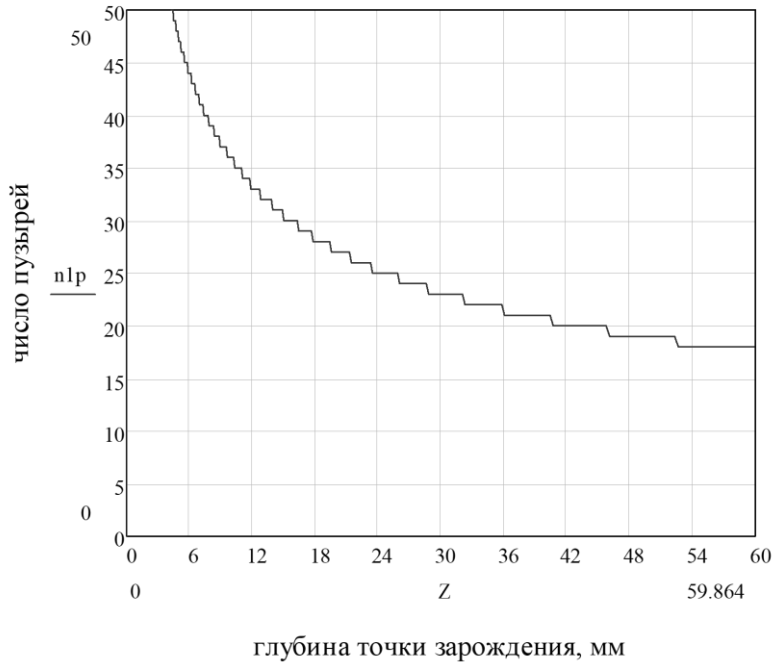


Рисунок 5.13. Зависимость числа паровых пузырей от глубины точки зарождения

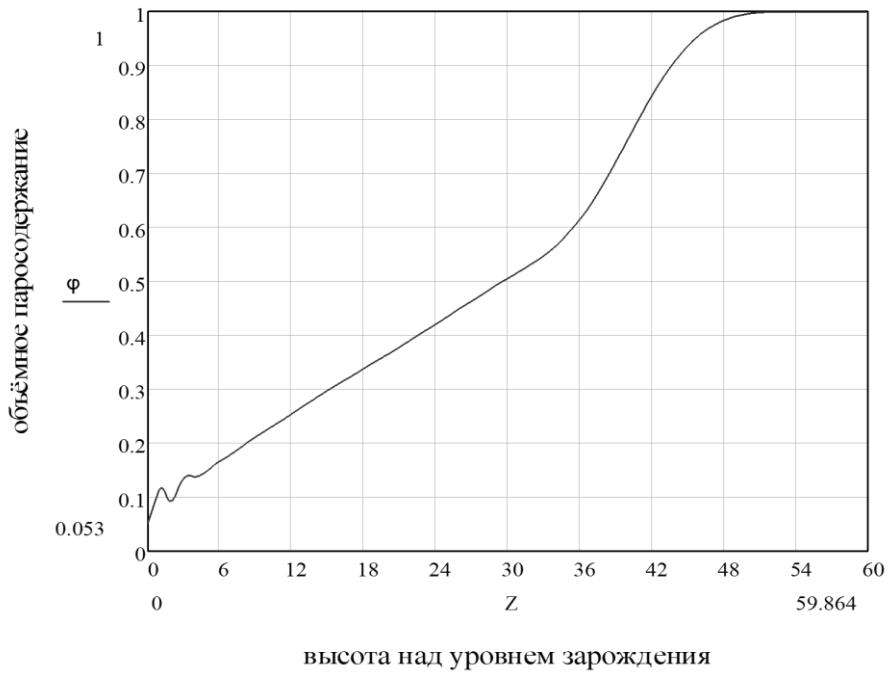


Рисунок 5.14. Зависимость объемного паросодержания от высоты над уровнем зарождения паровых пузырей

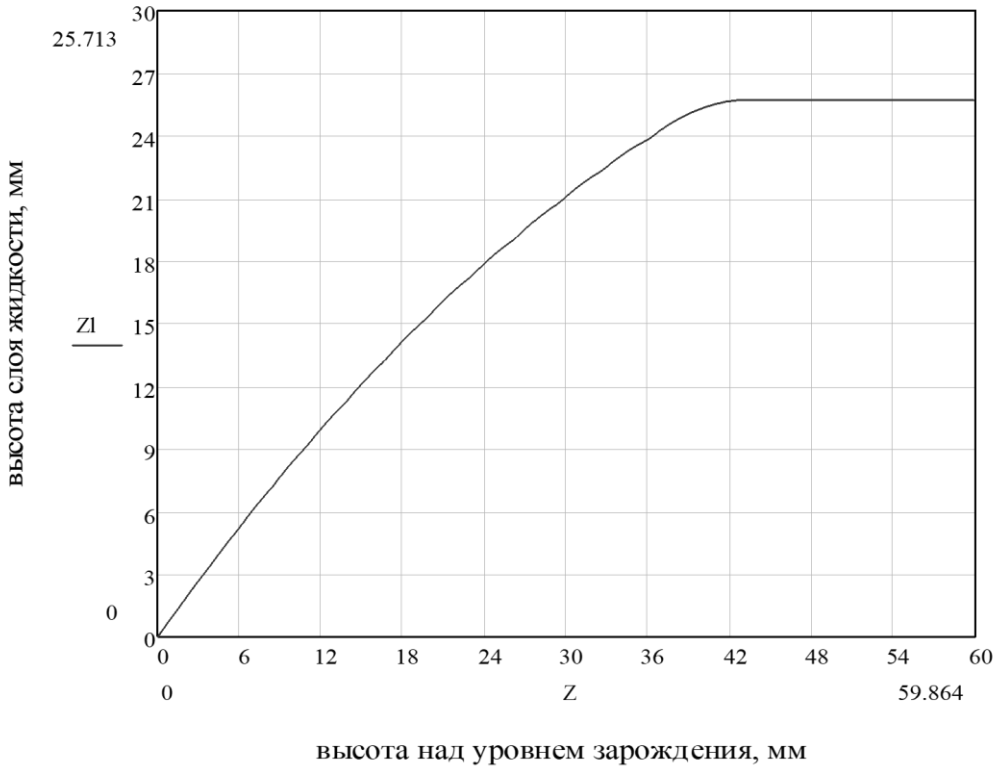


Рисунок 5.15. Зависимость суммарной высоты слоя жидкости от высоты над уровнем зарождения паровых пузырей

5.7. Разработка пилотной СВЧ вакуум-выпарной установки

5.7.1. Принципиальная схема инновационной СВЧ вакуум-выпарной установки

Современные тенденции совершенствования тепломассообменного оборудования свидетельствуют о преимуществах многофункциональных установок модульного типа. А в пищевых технологиях такое оборудование позволит загружать производство во время отсутствия сезонного сырья, легко перестраиваться к переработке разной растительной продукции. Очевидны главные требования к модулю – простота управления при переходе на новый технологический регламент [209].

Выполненные экспериментальные исследования, изложенные в Разделах 4.6.2–4.6.4, позволили проанализировать различные схемы и обосновать их положительные возможности и недостатки. В основе анализа лежали основные

кинетические зависимости, которые характерны для проектируемого модуля. Качественный характер кинетики обезвоживания в СВЧ модуле (рисунок 5.16) свидетельствует о том, что конструкция надежно и просто способна перестраиваться на необходимый режим работы. При постоянной мощности электромагнитного генератора (N) концентрация раствора во времени растет с нарастающей скоростью (рисунок 5.16 а). Объясняется это тем, что при $N = const$ паропроизводительность остается постоянной, а количество жидкости в растворе постоянно снижается. При этом, не сложно изменять мощность поля, чтобы рост концентрации оставался постоянным (рисунок 5.16 б). Можно утверждать, что мощностью поля можно управлять кинетикой роста концентрации раствора. Схемы управления мощностью магнетрона хорошо отработаны ведущими производителями оборудования для микроволнового нагрева.

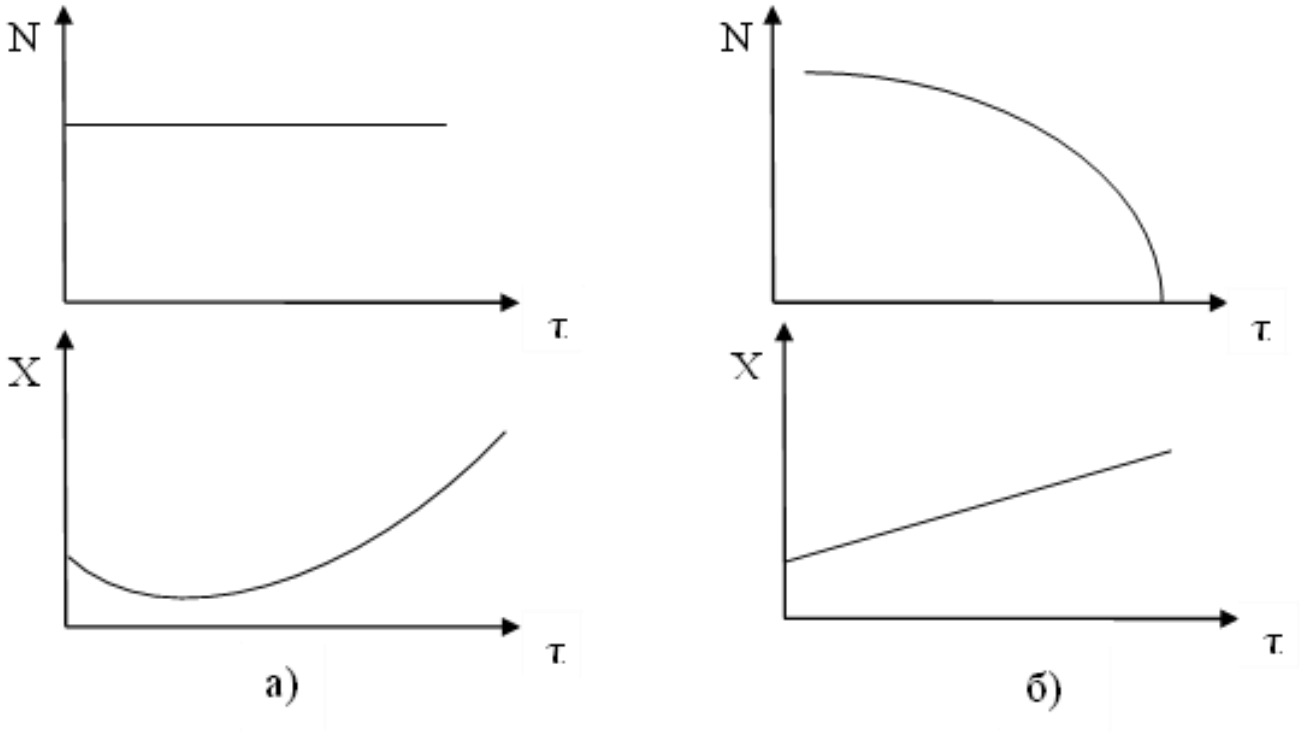


Рисунок 5.16. Качественные кинетические зависимости инновационной СВЧ вакуум-выпарной установки

Рассмотрим схему вакуум-выпарной установки, содержащей ряд модулей с электромагнитными генераторами (рисунок 5.17).

Приведенная схема реализует технологический регламент:

$$\frac{\partial W_m}{\partial \tau} = const \tag{5.27}$$

Естественно, модули горизонтальных уровней работают в режиме:

$$N11 = N21 = ... = Nn1 = const \tag{5.28}$$

$$N11 > N12 > ... > N1z \tag{5.29}$$

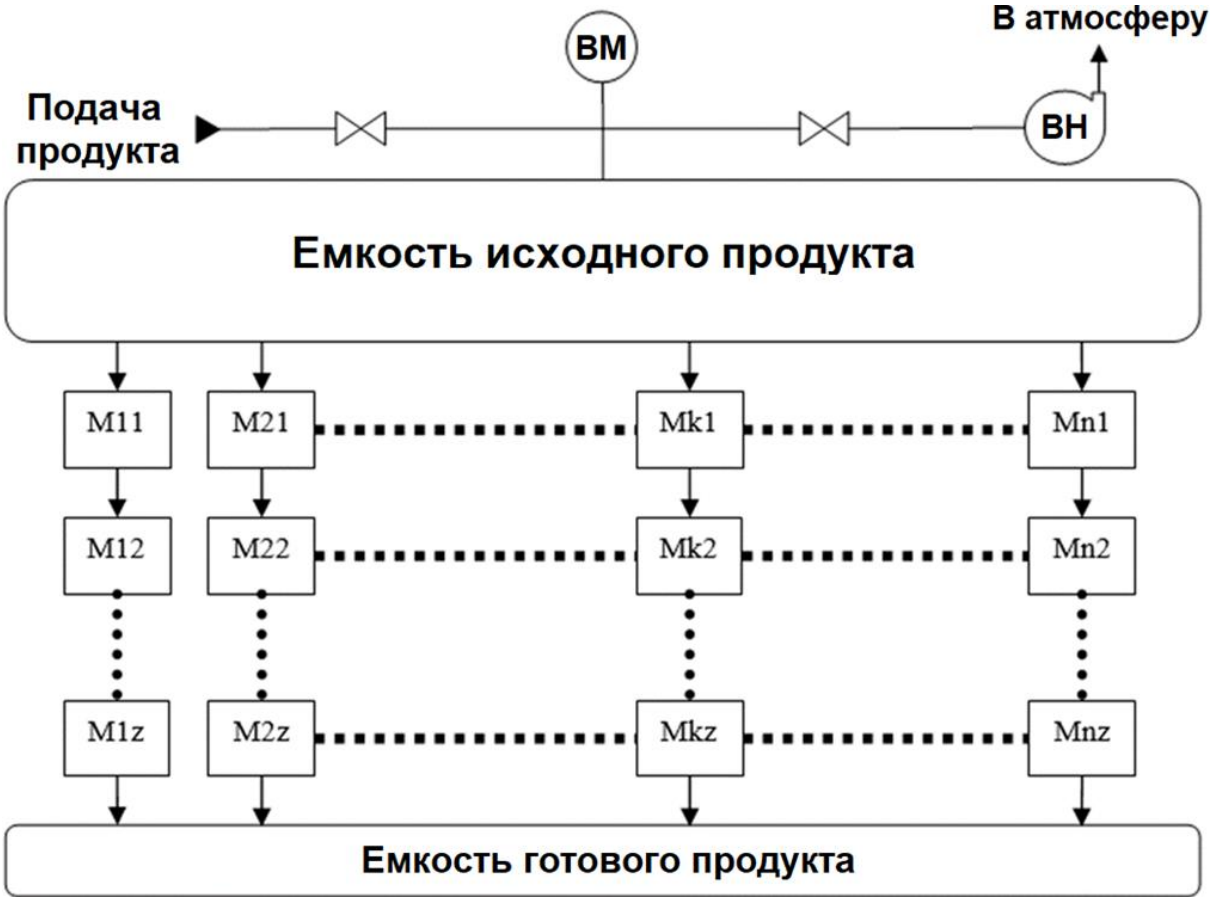


Рисунок 5.17. Принципиальная схема вакуум-выпарной установки с СВЧ модулями с разными мощностями генераторов

Таким образом, с помощью регулирования мощности СВЧ генераторов обеспечиваются необходимые параметры производительности по удалению пара по горизонтальным уровням установки.

Модульный принцип достаточно гибкий, и позволяет реализовывать разнообразные схемы их включения. Предложена схема, где обеспечивается работа при одинаковой нагрузке всех модулей (рисунок 5.18).

Рациональным условием функционирования установки:

– в модуле выпарить ровно половину поступившего в него раствора;

– общее число модулей в установке (рисунок 5.19) определяется степенью концентрирования раствора, т.е. числом ступеней (таблица 5.8).

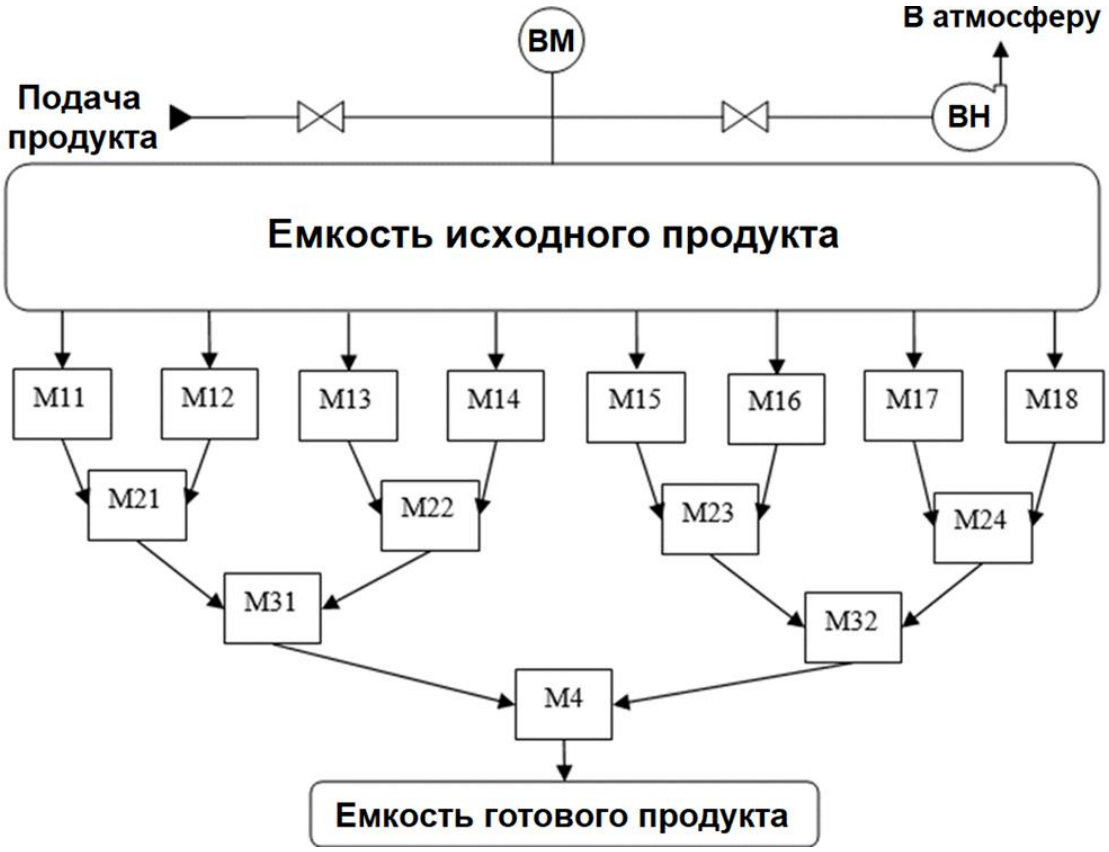


Рисунок 5.19. Принципиальная схема вакуум-выпарной установки с СВЧ модулями с равными мощностями генераторов

Анализ таблицы 5.8 позволяет предположить, что эффективность установки с повышением необходимой степени повышения концентрации снижается. Целесообразно, концентрирование растворов с низким содержанием целевых компонентов проводить на установках традиционного исполнения. А высокие концентрации – получать на установках с СВЧ генератором.

Очевидно, что возможны и другие варианты компоновки модулей, а оптимизация схемы требует системного анализа, подходов логистики. Целевой функцией моделирования можно принять минимум энергетических затрат, либо комплексный экономический критерий [210].

Основным элементом приведенных выше схем является тепловой модуль с СВЧ генератором. Это инновационный аппарат, конструкция которого требует обоснования.

Таблица 5.8. Компоновка модулей многоступенчатой вакуум-выпарной установки при их работе в режиме одинаковых мощностей СВЧ поля

Степень повышения концентрации	Число ступеней						
	1	2	3	4	5	6	7
4	2	1	–	–	–	–	–
6	4	2	1	–	–	–	–
8	8	4	2	1	–	–	–
10	16	8	4	2	1	–	–
12	32	16	8	4	2	1	–
14	64	32	16	8	4	2	1

5.7.2. Предлагаемая конструкция СВЧ вакуум-выпарной установки

Исходя из схем (рисунок 5.18 и 5.19) определены следующие требования к конструкции установки:

– быть работоспособной для работы в условиях вакуума (от 5 кПа);

– иметь радиопрозрачный ввод электромагнитной энергии микроволнового диапазона;

– обеспечивать в условиях вакуума ввод и выход раствора;

– обеспечить отсутствие утечек электромагнитной энергии выше допустимых значений.

Следовательно, основными элементами установки 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 обеспечить решение технологических задач и отвечать комплексным техническим требованиям (таблица 5.9).

Предлагаемая конструкция установки изображена на рисунке 5.20. является цилиндрический корпус (3), изготовленный из радионепроницаемого металла.

В корпусе имеется специальное окно для магнетрона (6), микроволновая энергия которого воздействует на сырье через радиопрозрачный корпус (5), выполненный из тефлона. 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).

Таблица 5.9. Концептуальная модель инновационной СВЧ вакуум-выпарной установки

Элемент конструкции	Технологические задачи	Технические требования и ограничения
Реакционный объем	Обеспечить процесс выпаривания из пищевых систем в вакууме и при температурах до 100°С	Быть радиопрозрачным, работоспособным в условиях вакуума и совместимым с пищевыми растворами
Узел ввода раствора и выхода концентрата и вторичного пара	Теплогидродинамические характеристики должны быть согласованы с технологическим регламентом. Обеспечивать движение потоков без их перемешивания	Отвечать условиям запредельного волновода, быть работоспособным в условиях вакуума и совместимым с пищевыми растворами
Корпус установки	Выдерживать силовые нагрузки. Соответствовать необходимым уровням тепловой защиты.	Соответствовать нормам электромагнитной защиты установки.
Узел ввода СВЧ энергии	Параметры волновода должны обеспечивать максимальные КПД транспортировки энергии.	Соответствовать нормам электромагнитной защиты установки.
Система генерации СВЧ поля	Должна предусматривать возможность регулировки выходной мощности магнетрона.	Должна быть автономной и не требовать специальных устройств для охлаждения силовой электроники.

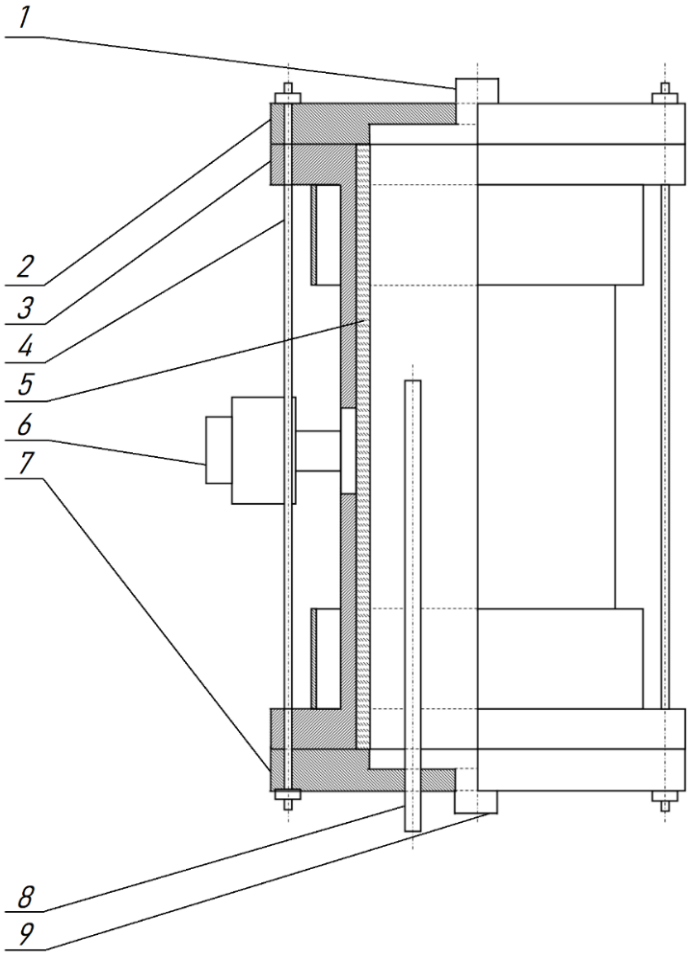


Рисунок 5.20. Схема предлагаемой конструкции СВЧ вакуум-выпарной установки. 1 – патрубок, 2 – верхний фланец, 3 – цилиндрический корпус, 4 – шпилька, 5 – радиопрозрачный корпус, 6 – магнетрон, 7 – нижний фланец, 8 – патрубок для непрерывной подачи сырья, 9 – патрубок непрерывной выгрузки готового продукта

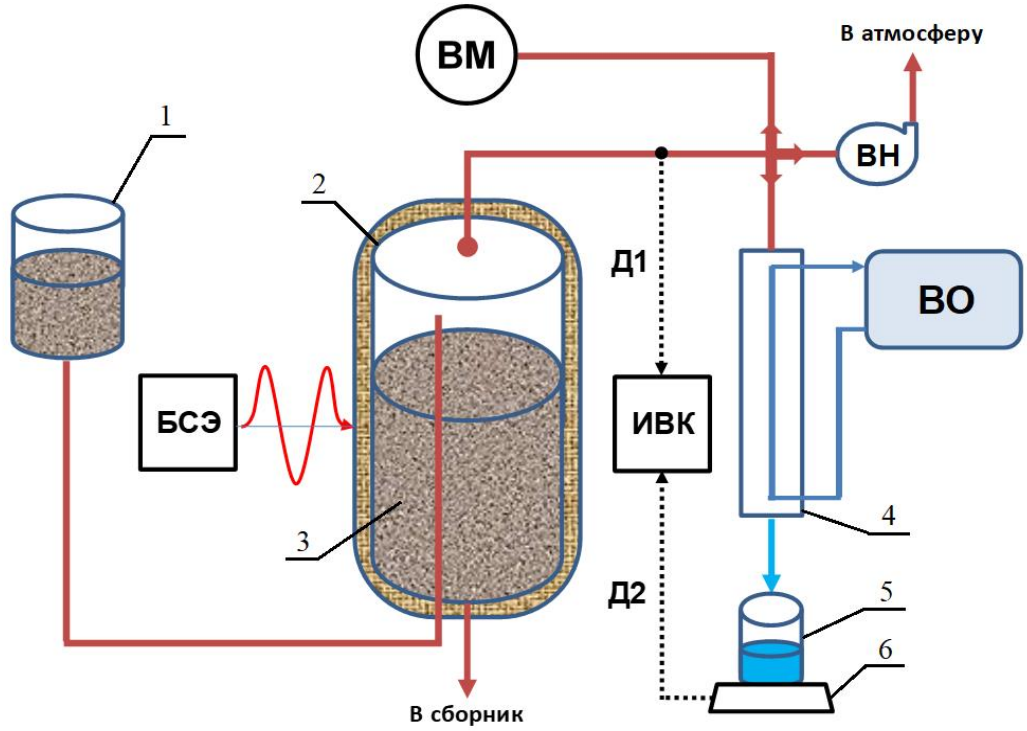
5.7.3. Конструкция стенда для исследований СВЧ вакуум-выпарной установки

Схема экспериментального стенда представлена на рисунке 5.21.

Основными элементами экспериментального стенда (рисунок 5.21) являются: емкость исходного продукта (1), реакционный объем (2), вакуум-насос (ВН), конденсатор (4), водоохладитель (ВО), сборник конденсата (5) и измерительно-вычислительный комплекс (ИВК).

Фото стенда, на котором проводились исследования экспериментального образца установки, приведено на рис. 5.22.

Реакционный объем посредством паропровода соединен с конденсатором. Контроль вакуума в системе осуществляется при помощи образцового вакуумметра. Блок силовой электроники по сигналам блока управления, состоящего из регулятора мощности и таймера, организовывает подвод электромагнитной энергии к продукту. Водоохладитель работает по такому же принципу, как и в схеме с СВЧ ВВУ периодического действия (Раздел 2.5.2, рисунок 2.11). Текущие показания измерителя температуры пара на выходе (Д1) и электронных весов (6) через интерфейс поступают на процессор ИВК для дальнейшей обработки. В качестве измерительных приборов были использованы: электронные весы ТВЕ-0,21-0,01 и датчик температуры Dallas DS 18b20. Сбор информации осуществлялся при помощи планшета CHUWI CW1506. Программа регистрации и обработки данных была реализована на базе SCADA-системы Simp Light (рисунок 2.6).



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

Рисунок 5.21. Схема экспериментального стенда для исследования СВЧ вакуум-выпарной установки

Рисунок 5.22. Стенд для испытаний СВЧ вакуум-выпарной установки

5.8. Энергетические характеристики разработанной СВЧ вакуум-выпарной установки

Анализ сводится к эффективности использования энергии первичного топлива органического происхождения. Расход топлива принят равным 100 %. Подробно конверсия энергии топлива в элементах инновационной установки поясняется схемой (рисунок 5.23).

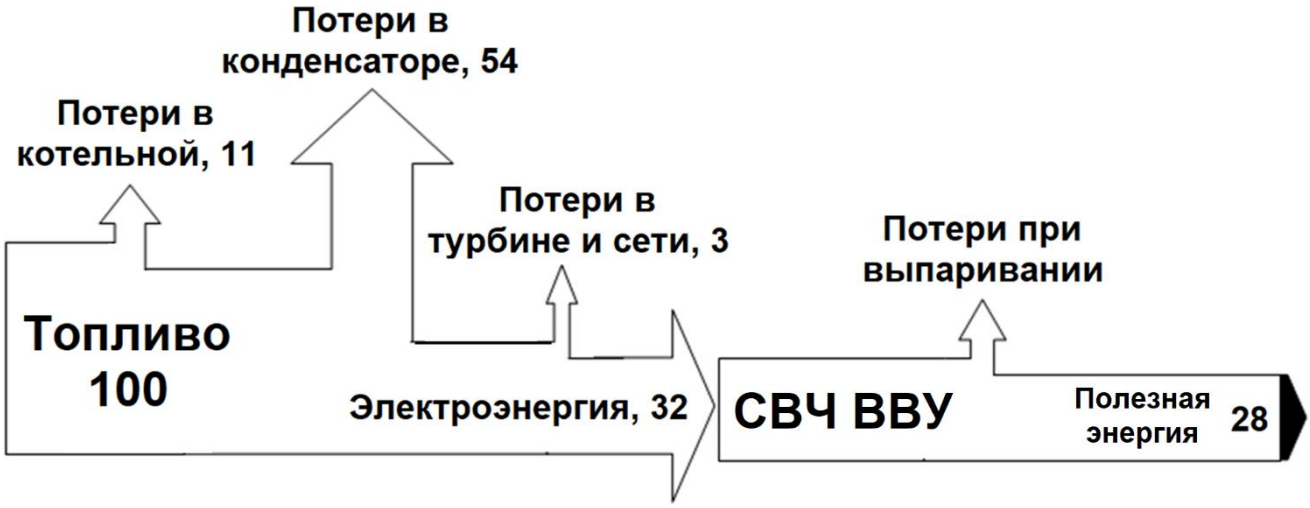


Рисунок 5.23. Конверсия энергии в инновационной технологии обезвоживания

В схеме (рисунок 5.23) анализируется вариант, когда количество удаленной влаги и при выпаривании, и при сушке равны. В этом случае инновационная технология требует затрат топлива на 6 % меньше. По мере повышения доли сушки (что характерно для практических задач), эффективность СВЧ вакуум-выпарной установки будет расти. Часто главным приоритетом является максимальное сохранение в готовом продукте пищевого потенциала сырья. В этом случае, традиционная сушка не может конкурировать с предложенной схемой СВЧ ВВУ [17, 150].

Предложенная гипотеза предлагает оперировать в расчетах базовыми характеристиками источника энергии, например топлива с теплотой сгорания 40 МДж/кг. На этой основе проведена оценка эффективности использования энергии в традиционных технологиях сушки и выпаривания и предложенных методов сушки и выпаривания в электромагнитном поле. Результаты анализа представлены на рисунке 5.24, где приняты следующие обозначения: ПГ – парогенератор; К – паровой калорифер; СК – конвективная сушильная камера; ВВУ – вакуум-выпарная установка; ПТ – паровая турбина; ЭГ – электрогенератор; ГТ – газовая турбина; ЭВУ – электромагнитная вакуум-выпарная установка. В расчетах принято: энергетический КПД преобразования топлива в электроэнергию на паротурбинных электростанциях 32 %, а на газотурбинных 60 %; КПД преобразования электрической энергии в СВЧ камерах 75 %.

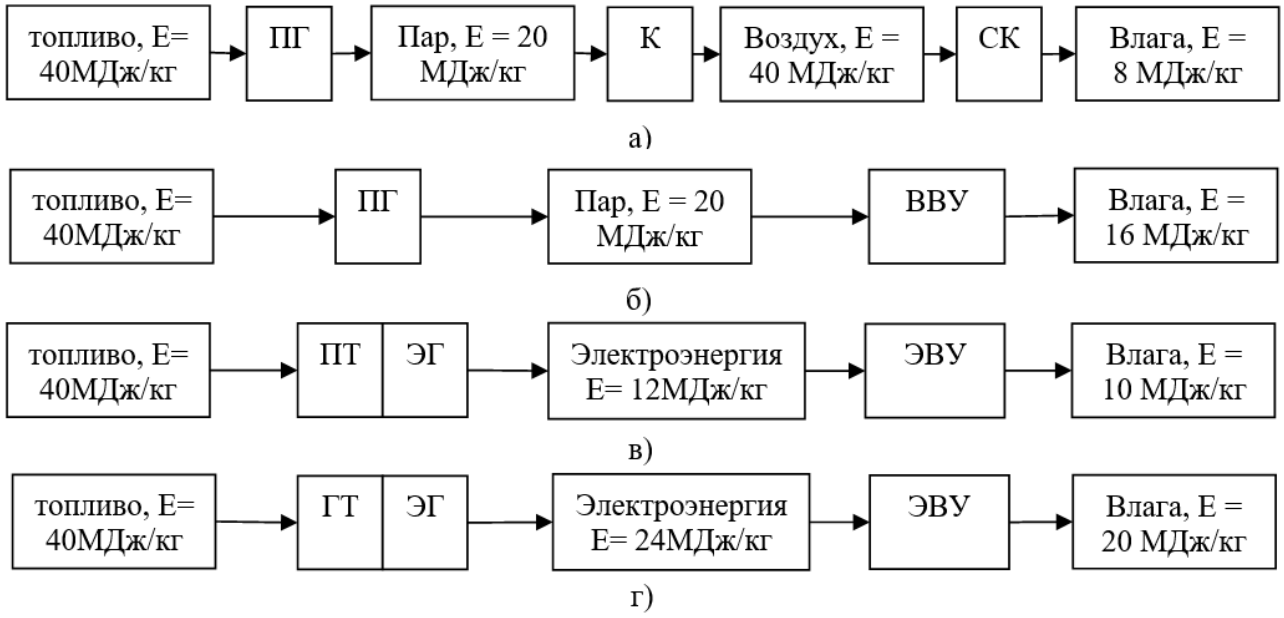


Рисунок 5.24. Конверсия энергии в технологиях обезвоживания (все параметры приведены к 1кг топлива):

а) – традиционные конвективные технологии сушки;

б) – традиционная технология выпаривания;

в) – СВЧ выпаривание с паровой турбиной;

г) – СВЧ выпаривание с газовой турбиной

Таблица 5.10. Сравнение традиционных и предложенного показателей энергоэффективности различных технологий обезвоживания

Энерготехнология	КУЭ, МДж/кг влаги	J, МДж/кг н.э.	d_0, кг влаги/кг н.э.
Сушка традиционная	4–7	4–9	1–3
Сушка в ЭМП	2–4	10–20	5–6
Выпаривание + сушка традиционная	2,8	8–20	3–6
Выпаривание в ЭМП	2,7	10–20	3,5–7,5

В литературе [149] отмечено, что в настоящее время при испытаниях сушильных аппаратов с ЭМП достигнуто значение $d_0 = 6$ кг в/кг н.э. Визуально отмечено, что из камеры выходит пароводяная смесь [149]. Аппараты реализуют режим бародиффузии, а это существенно снижает расход энергии. Реально достичь

значений $d_0 = 50$ кг в/кг н.э. при четком согласовании мощности ЭМП генераторов с характеристиками пищевого сырья.

Проведенные оценки свидетельствуют об энергетических и экономических преимуществах предлагаемых аппаратов. Естественно, капитальные затраты на проектирование и изготовление таких аппаратов окажутся выше, чем у традиционных конструкций, что требует отдельных расчетов.

5.9. Исследование бизнес-перспектив разработок

Предлагаемые разработки [16, 28, 30, 148, 150] прошли исследования на коммерческую привлекательность. Анализировался проект установки после традиционного выпарного аппарата ступени микроволнового вакуум-выпарного концентратора, задачей которого является повышение концентрации сока от традиционных 65 до 92 °brix. Естественно, вырастут капитальные и энергетические затраты, но сократятся транспортные расходы, что существенно при экспортных операциях. Установим, будет ли такой проект экономически целесообразными и обеспечит ли он прибыль.

Дополнительные капитальные затраты состоят из стоимости изготовления и установки дополнительной ступени выпаривания с электромагнитными источниками энергии. Следовательно, расчетная прибыль от эксплуатации установки будет определена из соотношения:

$$P = \Delta U_T - \Delta U_E - a\Delta K \qquad (5.30)$$

где ΔU_T – снижение расходов на транспортировку концентрированного сока;

ΔU_E – стоимость дополнительных затрат электроэнергии;

a – нормативный коэффициент эффективности использования оборудования (для пищевой промышленности: $a = 0{,}15$);

ΔK – увеличение стоимости установки из-за дополнительной ступени выпаривания.

Расчеты показывают, что экономическая эффективность от внедрения инновационных проектов зависит от ее функционального назначения и, как правило, ощутима, по сравнению с лучшими технологиями выпаривания.

Проведем оценку экономической эффективности перевозки концентрированного виноградного сока. Примем среднюю стоимость перевозки 20 т продукта на расстояние 1км в размере 120 руб. Были построены зависимости стоимости перевозки от расстояния (рисунок 5.25).

На следующем этапе определена стоимость перевозки в зависимости от степени концентрирования сока (рисунок 5.26). Обозначим a – степень концентрирования. Начальная концентрация сока $\left(X_н\right)$ равнялась 12 %. Рассмотрим варианты (рисунок 5.17), когда концентрация повышалась в 1,5, в 2 и в 4 раза. Т.е. конечная концентрация составляла, соответственно, 18 %, 24 % и 48 %.

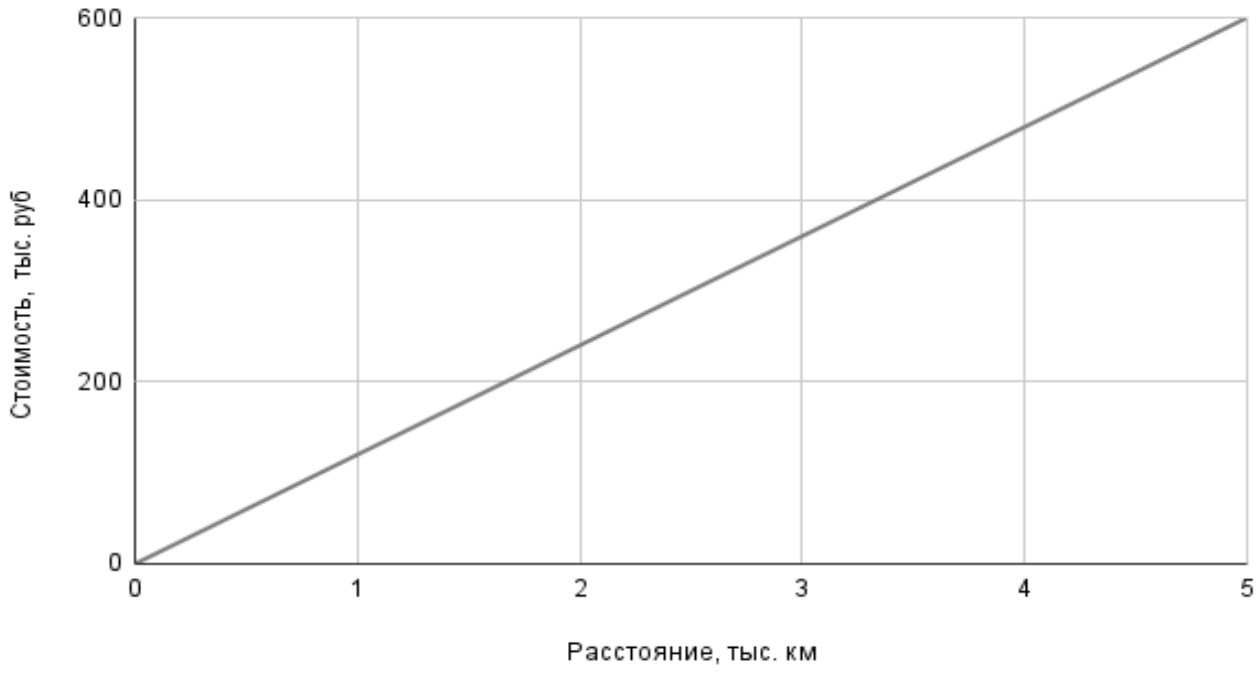


Рисунок 5.25. Зависимость стоимости перевозки от расстояния

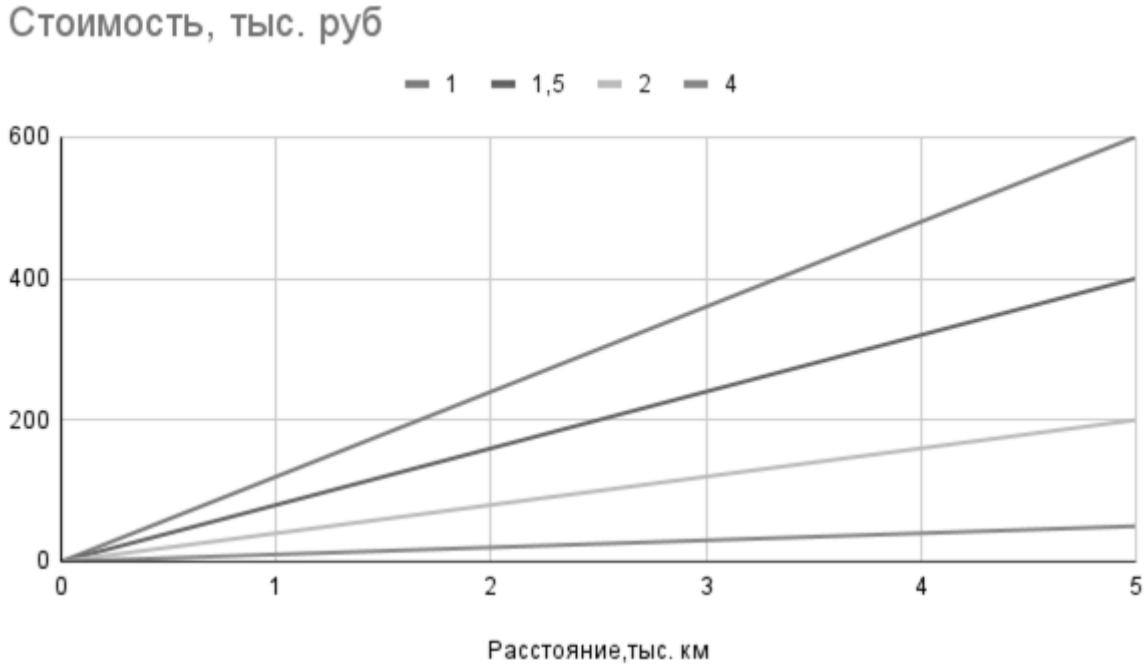


Рисунок 5.26. Влияние степени концентрирования сока на стоимость перевозки на различные расстояния

Следовательно, стоимость перевозки 20 т исходного сока на расстояние 1000 км составляет 120 000 руб. Но, если сконцентрировать сок в 1,5 раза до значения 18 %, то объем составит уже не 20, а 13,3 т, а стоимость, соответственно, – 80 тыс. руб. Аналогично определяем стоимость транспортировки соков, концентрация которых в 2 и в 4 раза выше. Экономию при перевозке можно определить как разницу между стоимостью неконцентрированного и концентрированного сока. Результаты расчетов представлены графически (рисунок 5.27). Правда стоит заметить, что такая линейная зависимость справедлива только для больших объемов перевозок, при полном заполнении автоцистерны. Использование же автотранспорта меньшей грузоподъемности не приведет к такому снижению стоимости.

Однако необходимо учесть и стоимость дополнительных затрат электроэнергии. Учитывая характеристики выпарных модулей, рассмотренные ранее, приведем стоимость электроэнергии, которая будет потрачена на концентрирование 20 т сока до тех же концентраций (рисунок 5.28).

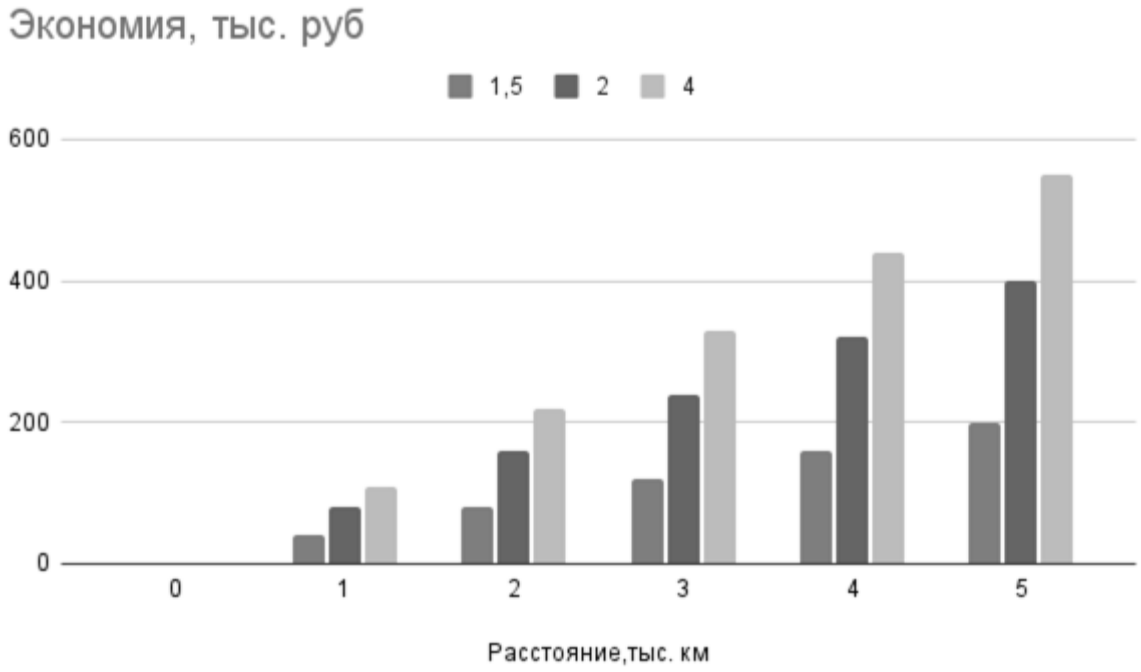


Рисунок 5.27. Экономия на транспортировке в зависимости от расстояния при степени концентрирования 1,5, 2 и 4 раза

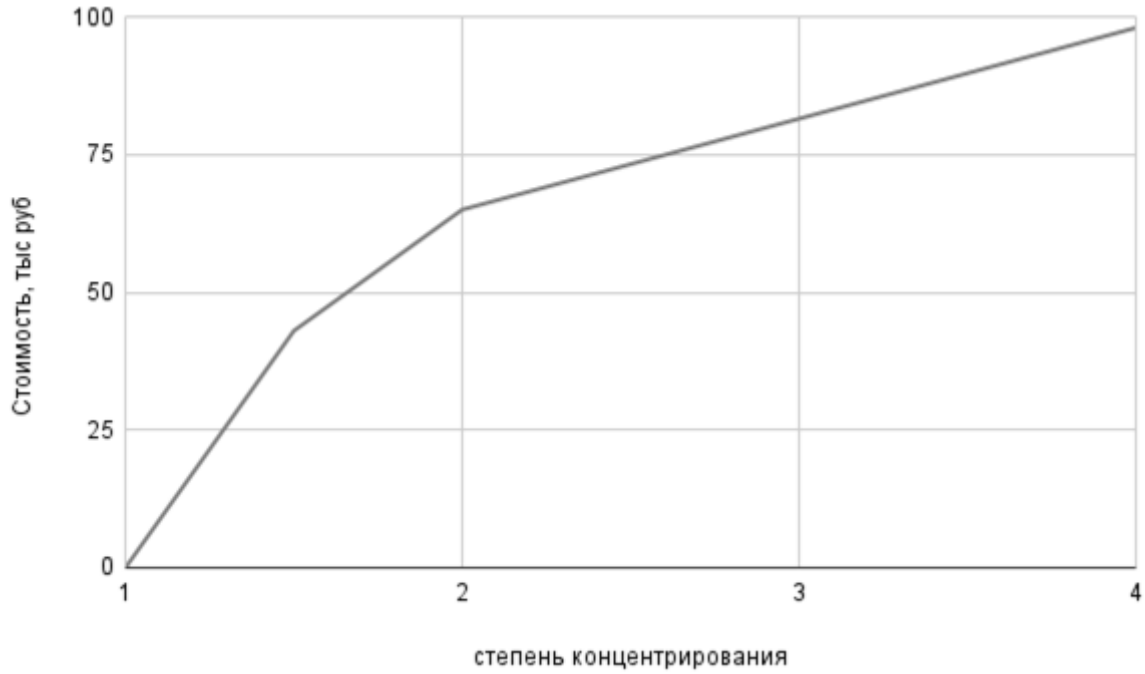


Рисунок 5.28. Стоимость концентрирования сока

Увеличение стоимости установки из-за дополнительной ступени выпаривания имеет постоянную часть около 50 тыс. руб. и переменную часть, которая зависит от количества модулей этой дополнительной ступени выпаривания. Количество модулей определяется степенью концентрирования и

временем проведения процесса. При себестоимости одного модуля около 2 тыс. руб. получим следующую зависимость увеличения стоимости установки в зависимости от времени необходимого для концентрирования 20 т сока (рисунок 5.20).

С учетом нормативного коэффициента составляющая капитальных затрат в формуле (5.27) представлена на графике (рисунок 5.21).

Оценим экономию от доставки продукта в Екатеринбург (рисунок 5.22).

Так при транспортировке сока на 3000 км средняя прибыль от предварительного концентрирования его в 1,5 раза составит 50 тыс. руб., а при концентрировании в 2–4 раза прибыль составит 150–200 тыс. руб. Очевидна экономическая целесообразность концентрирования сока.

Определим разницу экономии на транспортировку и затрат на концентрирование в зависимости от степени концентрирования (таблица 5.11).

С учетом составляющей капитальных затрат получим следующие зависимости для расчетной прибыли от транспортировки концентрированного сока в зависимости от степени концентрирования и производительности установки (рисунок 5.23).

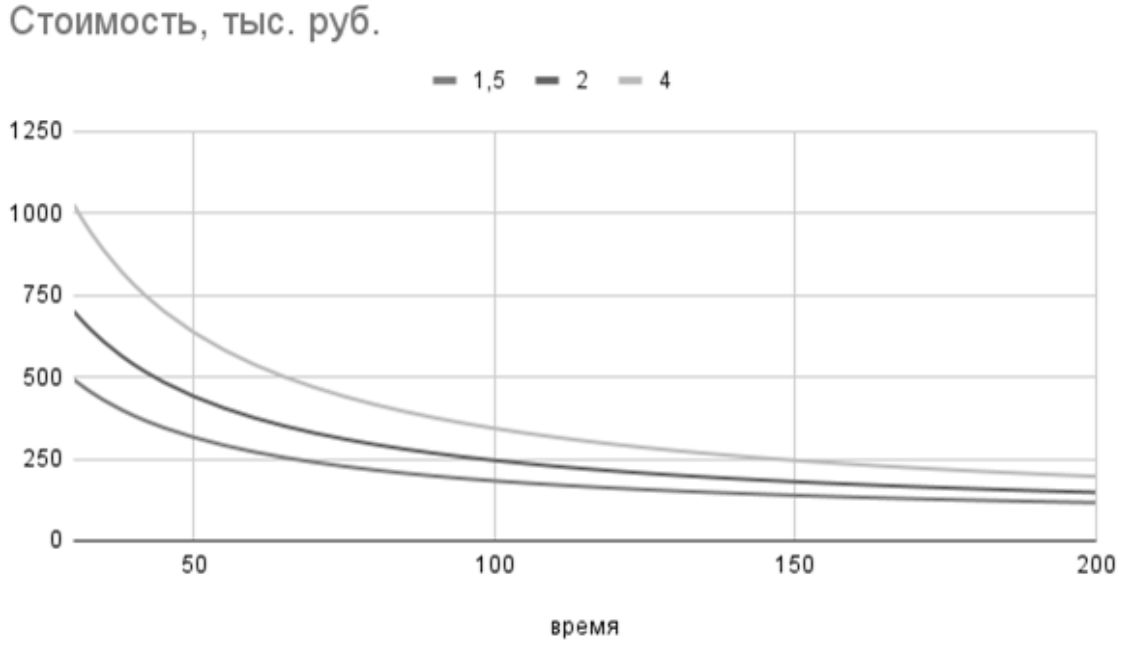


Рисунок 5.20. Стоимость дополнительно установленного оборудования в зависимости от степени концентрирования и производительности

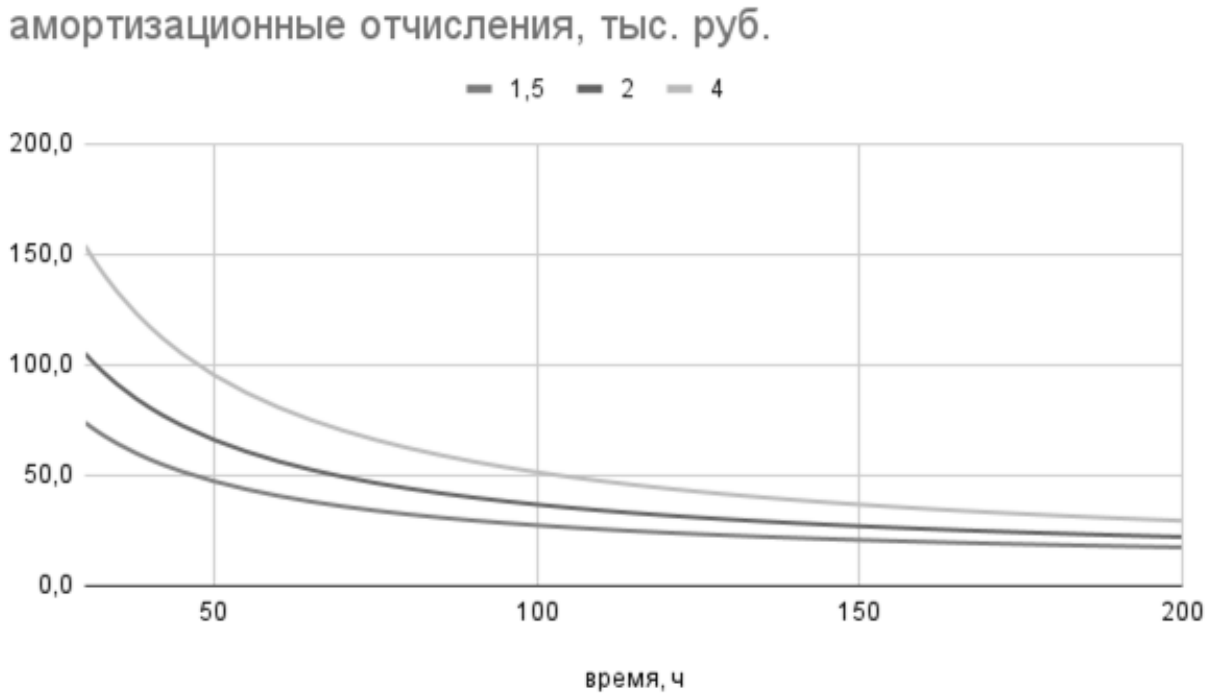


Рисунок 5.21. Снижение расчетной прибыли за счет стоимости дополнительно установленного оборудования в зависимости от степени концентрирования и производительности

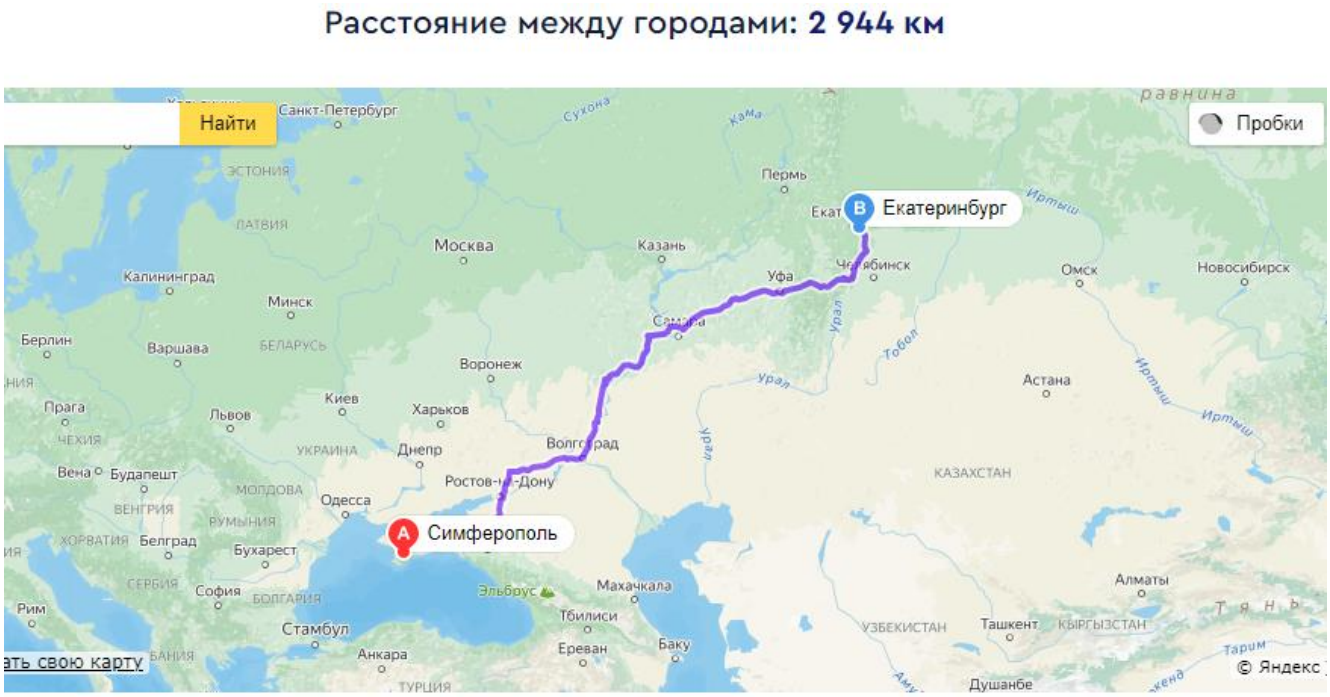


Рисунок 5.22. Расстояние от Симферополя до Екатеринбурга

Таблица 5.11. Экономический эффект

	Степень концентрирования		
	1,5	2	4
ΔU_T тыс. руб.	120	240	330
ΔU_E тыс. руб.	43	65	98
Разница, тыс. руб.	77	175	232

Разработанная микроволновая вакуум-выпарная установка прошла опытно-промышленную проверку в ООО «ЮГ-МОЛОКО» (Приложение Л) и ООО «ДК «Мегатрейд-Юг» (Приложение М) Республики Крым. Результаты испытаний показали, что применение микроволновой вакуум-выпарной установки позволило получить высокопроизводительный экологически чистый продукт. Доказана возможность организации объемного подвода энергии в процессе выпаривания.

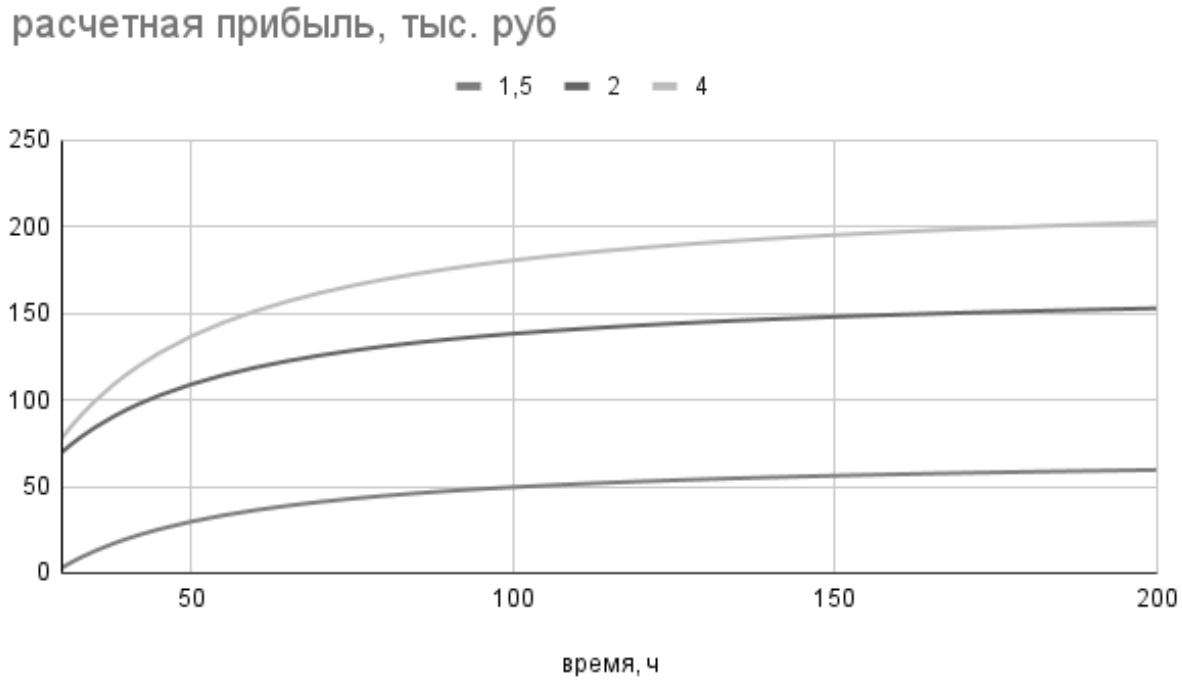


Рисунок 5.23. Зависимость расчетной прибыли при степени концентрирования 1,5, 2, и 4 раза

5.10. Качественные характеристики продуктов, полученных при сушке и выпаривании в электромагнитном поле

Результаты определения качественных характеристик продуктов

Концентрированный яблочный сок получали двумя способами:

- в традиционном вакуум-выпарном аппарате (температура кипения раствора $t_{кип}$ = 65–70 °С, давление в аппарате P = 40–50 кПа, время процесса выпаривания τ = 300 мин, конечная концентрация X = 69,5 °Brix);
- в инновационном СВЧ вакуум-выпарном аппарате (температура кипения раствора $t_{кип}$ = 35–40 °С, давление в аппарате P = 5–10 кПа, время процесса выпаривания τ = 120 мин, конечная концентрация X = 67 °Brix).

Сушенные фрукты и овощи были получены на двух установках:

- в традиционной конвективной сушилке (температура продукта $t_{суш}$ = 60–70 °С, температура сушильного агента $t_{суш}$ = 80–90 °С, скорость сушильного агента ν = 2,5 м/с, время процесса сушки τ = 300 мин, конечная влажность продукта X = 10,4 %).
- в инновационной ленточной СВЧ-ИК сушилке (температура продукта $t_{суш}$ = 40–45 °С, удельная мощность излучателей 9 кВт/м^2, скорость ленты ν = 5 мм/с, время процесса сушки τ = 60 мин, конечная влажность продукта X = 9,3 %).

Для возможности сравнения результатов показателей качества продуктов, полученных разными способами обезвоживания, необходимо добиться абсолютно одинаковых значений влажности для продуктов, что на практике довольно сложно. Поэтому был сделан пересчёт качественных показателей на сухой вес для концентрированного яблочного сока в мг/кг или г/кг, а для сушёных фруктов и овощей в мг/100 г (мг %) или г/100г (%).

Показатели качества: концентрированного сока яблочного (сорт «Фуджи»), сушенных фруктов и сушенных овощей полученного разными способами представлены в таблицах 5.12, 5.13 и 5.14 соответственно.

Таблица 5.12. Показатели качества концентрированного сока яблочного (сорт «Фуджи»), полученного разными способами

Показатель	Традиционный вакуум-выпарной аппарат	Инновационный СВЧ вакуум-выпарной аппарат
Влажность, %	30,50±0,2	33,09±0,2
Сухое вещество, %	69,50±0,2	66,91±0,2
Плотность, кг/дм^3 (при 20 °С)	1,3244±0,0005	1,3104±0,0005
Галловая кислота, мг/кг	2,3±0,1	2,3±0,1
5-Гидроксиметилфурфурол, мг/кг	37,1±0,8	2,1±0,1
Фурфурол, мг/кг	3,0±0,1	0,3±0,1
Процианидин В1, мг/кг	128,8±5,4	143,3±6,8
(+)-D-Катехин, мг/кг	75,3±3,8	85,5±4,0
Процианидин В2, мг/кг	215,8±6,3	222,5±7,1
Хлорогеновая кислота, мг/кг	2310,3±33,9	2439,7±29,6
Процианидин С1, мг/кг	100,6±4,8	102,8±6,2
(-)-Эпикатехин, мг/кг	347,5±7,3	373,1±9,5
Флоридзин, мг/кг	26,0±0,9	30,6±0,8
Рутин, мг/кг	5,3±0,2	6,4±0,3
Кверцетин-3-О-глюкозид, мг/кг	1,6±0,1	1,8±0,1
Кверцетин-3-О-арабинозид, мг/кг	1,2±0,1	1,5±0,1
Флоретин, мг/кг	10,9±1,1	14,4±1,6
Кверцетин-3-О-рамнозид, мг/кг	1,2±0,1	1,7±0,1
Изорамнетин-3-О-глюкозид, мг/кг	0,7±0,1	1,0±0,1
Лимонная кислота, г/кг	1,0±0,1	1,0±0,1
Яблочная кислота, г/кг	63,0±0,3	63,6±0,5
Глюкоза, г/кг	308,7±2,6	308,3±3,1
Фруктоза, г/кг	646,4±2,5	648,4±3,0
Сумма сахаров, г/кг	955,0±5,1	956,7±6,1

Таблица 5.13. Показатели качества сушенных фруктов, полученных разными способами сушки

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	—
Процианидин B1, мг %	11,7±0,2	15,5±0,3
(+)-D-Катехин, мг %	14,5±0,2	16,4±0,7
Процианидин B2, мг %	25,4±0,4	37,1±0,6
Хлорогеновая кислота, мг %	208,9±10,0	280,3±14,1
Процианидин C1, 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	—
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

Таблица 5.14. Показатели качества сушенных овощей, полученных разными способами сушки

Показатель	Морковь (сорт «Нантская»)		Лук (сорт «Глобус»)	
	Конвек-тивная сушка	СВЧ-ИК сушка	Конвек-тивная сушка	СВЧ-ИК сушка
Влажность, %	9,8±0,2	7,1±0,2	12,6±0,2	9,6±0,2
5-Гидроксиметилфурфурол, мг %	8,8±0,2	0,8±0,1	6,6±0,1	0,3±0,1
Фурфурол, мг %	0,4±0,1	—	—	—
Хлорогеновая кислота, мг %	9,3±0,2	12,1±0,3	—	—
Кверцетин-3-О-глюкозид, мг %	1,1±0,1	1,7±0,2	—	—
Каротинойды (спектрофотометрия), мг %	14,9±0,3	16,1±0,3	—	—
β-Каротин (ВЭЖХ) мг %	13,1±0,3	14,4±0,3	—	—

Продолжение таблицы 5.14.

Показатель	Морковь (сорт «Нантская»)		Лук (сорт «Глобус»)	
	Конвек-тивная сушка	СВЧ-ИК сушка	Конвек-тивная сушка	СВЧ-ИК сушка
Лимонная кислота, %	0,10±0,01	0,08±0,01	0,76±0,03	0,79±0,3
Яблочная кислота, %	3,74±0,05	3,70±0,05	3,08±0,5	3,05±0,5
Молочная кислота, %	0,09±0,01	—	0,06±0,01	—
Глюкоза, %	55,22±0,40	54,90±0,40	27,83±0,50	28,10±0,55
Фруктоза, %	10,84±0,40	10,59±0,40	17,44±0,50	17,85±0,55
Сумма сахаров, %	66,06±0,80	65,49±0,80	45,26±1,00	45,95±1,10

Реализация предложенных технологий обезвоживания, заключающаяся в переходе от граничных условий (ГУ) III рода к ГУ II рода в выпарных аппаратах, позволило реализовать способ адресной доставки энергии непосредственно к полярным молекулам сырья, а именно к жидкости внутри капилляра. При таком способе подвода энергии значительно снижается влияние фактора вязкости продукта, исчезает понятие термического пограничного слоя, появляется возможность стабилизации величины паропроизводительности в широком диапазоне значений концентрации продукта. Отвод пара из всего объёма жидкости происходит без термической порчи продукта в пограничном слое. В результате получается продукт высокой концентрации, без привкуса «варки», без изменения цвета и аромата. Температура выпаривания составляет t = 35–40 °С, по сравнению с традиционной t = 65–70 °С, конечная концентрация сухих веществ 92–95 %, по сравнению с традиционной технологией – 35–65 % сухих веществ.

При предложенной технологии выпаривания сохраняются полезные вещества лучше, чем в традиционных технологиях (достоверно выше представлены показатели полифенолов и каротиноидов). Однако содержание основных компонентов, таких как сахара и органические кислоты одинаковы в пределах погрешности (достоверно нет отличий) для разных способов сушки.

Применение предлагаемой технологии сушки, заключающейся в использовании комбинированной системы сушки с чередующимися СВЧ и ИК диапазонами излучения, позволило организовать эффективное удаление влаги из продукта при сохранении его качества. Молочная кислота при сушке предлагаемым

способом не образуется, 5-гидроксиметилфурфурол и фурфурол кратно ниже, влажность сушенных фруктов и сушенных овощей достоверно ниже, что хорошо должно сказаться на процессе хранения. Температура сушки составляет t = 40–45 °С, по сравнению с традиционной t = 60–70 °С, снижение влажности с 85 % до 10 %, время сушки составляет $\tau_{суш}$ = 55–65 мин, что в 5–6 раз меньше, чем в традиционных технологиях. Энергоёмкость процесса в 2,0–2,2 раза ниже, чем при конвективной сушке.

Лабораторными исследованиями было подтверждено предположение о том, что электромагнитный принцип подвода энергии имеет свойство, воздействуя непосредственно на влагу в объёме продукта, к сохранению полезных веществ, при кратковременной сушке повышенными температурами.

ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 5

1. Разработана пилотная установка многозонной комбинированной ленточной СВЧ–ИК сушилки, результаты испытаний которой показывают, что применение ИК и СВЧ сушильного оборудования позволит получить высокопроизводительный экологически чистый технологический процесс, гарантирующий высокое сохранение исходных качественных характеристик высушенного сырья при показателях энергоемкости процесса около 4 МДж/кг удаленной влаги.

2. В случае производства сушеной свеклы и моркови предложенная сушильная установка окупится менее чем за сезон. При производстве сушеного картофеля установка с производительностью по сырью 5 кг/ч окупится за 2 сезона, увеличение же производительности в 2 раза позволит окупить установку за сезон. При производстве яблочных слайсов установка производительностью 50 кг/ч окупится за 1 сезон, а для меньшей производительности срок окупаемости составит 1,09 и 1,83 сезона при производительности 20 и 10 кг/ч соответственно.

3. Разработана пилотная СВЧ вакуум-выпарная установка, позволяющая организовать процесс выпаривания в непрерывном режиме при низком давлении,

что способствует сохранению качества готового продукта. С точки зрения материалоемкости, технологичности изготовления, удобства эксплуатации и монтажа наиболее удачной является цилиндрическая форма модуля с одинаковыми диаметрами жидкостной и паровой зоны.

4. При помощи разработанных алгоритмов расчета и оптимизации геометрических параметров модулей разработан их типоразмерный ряд, позволяющий использовать весь диапазон мощностей промышленно выпускаемых излучателей электромагнитной энергии с воздушным охлаждением.

5. При работе модуля в непрерывном режиме, основными факторами, влияющими на его производительность, являются мощность магнетрона и коэффициент концентрирования. Это влияние представлено в виде экспоненциальных зависимостей (5.18) и (5.19).

6. При транспортировке сока на 3000 км средняя прибыль от предварительного концентрирования его в 1,5 раза составит 50 тыс. руб., а при концентрировании в 2–4 раза прибыль составит 150–200 тыс. руб.

7. Результаты проведенного анализа полученных образцов готовой продукции на ленточной СВЧ–ИК сушилке и СВЧ вакуум-выпарной установке подтверждают безопасность воздействия электромагнитного поля на пищевое сырье. Ключевые параметры качества во многом превосходят образцы, полученные традиционными методами.

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 источников СВЧ 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 СВЧ вакуум-выпарных установок периодического действия (диапазон безразмерного давления $2 \le P \le 22$, безразмерной теплоты фазового перехода $1 \le R \le 4{,}56$, точность с максимальным отклонением ±8 %) и непрерывного действия (диапазон безразмерной мощности $1 \le N \le 2{,}27$, безразмерного давления $2 \le P \le 16$, безразмерной теплоты фазового перехода $3{,}32 \le R \le 4{,}56$, точность с максимальным отклонением ± 8 %;

- процесс сушки с использованием установки для пищевого сырья в неподвижном слое при ИК, СВЧ подводе энергии, а также на ленте транспортёра при комбинированном подводе энергии от ИК и СВЧ 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 – $w_Л = 0{,}002$ м/с, длина установки $L_{уст} = 7$ м, время нахождения продукта в установке $\tau_{суш} = 3500$ с, мощность СВЧ излучателей $N_{сушСВЧ} = 7{,}2$ кВт и мощность ИК излучателей $N_{сушИК} = 9$ кВт;

- СВЧ вакуум-выпарной установки модульного типа непрерывного действия с основными характеристиками: геометрия рабочего объема; мощность; количество и распределение источников ЭМП в рабочем объёме 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.

Разработаны технические задания на ленточную комбинированную СВЧ-ИК сушилку непрерывного действия (приложение Н); СВЧ вакуум-выпарную установку непрерывного действия (приложение П).

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 СВЧ 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 интенсификации 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 диссертации 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алтухов, И. В. Применение дискретного ИК-энергоподвода в технологии сушки сахаросодержащих корнеплодов / И. В. *Алтухов // Вестник ИрГСХА.* − 2013. − № 55. − С. 100−105.
2. Алтухов, И. В. Технология инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеплодов / И. В. Алтухов, В. Д. Очиров // *Engineering problems in agriculture and industry : материалы Международной конференции*. − Улан-Батор, 2010. − С. 87−92.
3. Алтухов, И. В. Особенности работы импульсных ик-излучателей в технологии сушки корнеклубнеплодов / И. В. Алтухов, Н. В. Цугленок // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2015. − № 4 (126). − С. 109–114.
4. Алтухов, И. В. Влияние импульсной инфракрасной сушки на сохранность активно действующих веществ / И. В. Алтухов, Н. В. Цугленок, В. Д. Очиров // *Вестник АПК Ставрополья*. − 2015. − № 1. − С. 7–10.
5. Алтухов, И. В. Исследование процесса сушки корнеплодов моркови при ИК-энергоподводе / И. В. Алтухов, В. Д. Очиров // *Вестник ИрГСХА*. – 2011. – № 42. – С. 26−31.
6. Алтухов, И. В. Обоснование режимов ИК-энергоподвода в технологии сушки моркови : монография / И. В. Алтухов, В. Д. Очиров, В. А. Федотов. – Иркутск, 2013. – 97 с.
7. Алтухов, И. В. Обоснование режимов сушки сахаросодержащих корнеплодов ИК-излучением / И. В. Алтухов // *Вестник ИрГСХА*. – 2013. – № 56. – С. 87−97.
8. Баран А.А. Флокулянты в биотехнологии / А. А. Баран, А. Я. Тесленко. – Ленинград : Химия, 1990. – 142 с.

9. Бурдо О.Г., Бурдо А.К., Сиротюк И.В., Пур Д.С. Технологии селективного подвода энергии при выпаривании пищевых растворов. *Problemele energeticii regionale*. 2017. № 33 (1). P. 100−109.
10. 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
11. Бурдо О. Г. Исследование энерготехнологий процессов обезвоживания растительного сырья / О. Г. Бурдо, А. В. Гаврилов, И. В. Безбах, В. П. Мордынский // *Наукові праці ОНАХТ*. − 2018. − № 1 (82). − 156−161.
12. Бурдо О. Г. Микроволновая энергия, как фактор интенсификации тепломассопереноса и формирования полиэкстракта / О. Г. Бурдо, И. В. Сиротюк, Ю. Альхури, Ю. О. Левтринская // *Problemele energeticii regionale*. − 2018. – № 1 (36). – С. 58−71.
13. Бурдо, О. Г. Наномасштабные эффекты в пищевых технологиях / О. Г. Бурдо // *Инженерно-физический журнал*. − Минск, − 2005. − № 1 (78). – С. 88−93.
14. Бурдо, О. Г. Пищевые наноэнерготехнологии / О. Г. Бурдо. – Херсон, 2013. – 294 с.
15. Бурдо О. Г., Ружицкая Н. В., Макаренко Т. А., Малашевич С. А. Концентрирование экстрактов стевии в микроволновой вакуум-выпарной установке. *Научные труды Одесской национальной академии пищевых технологий*. 2015. Т. 47, № 2. С. 67−70.
16. Бурдо О. Г. Система инновационных энерготехнологий обезвоживания пищевого сырья // О. Г. Бурдо, С. Г. Терзиев, А. В. Гаврилов [и др.] // *Problemele Energeticii Regionale*. – 2020. − Vol. 2(46). − P. 92−107.
17. Бурдо О. Г. Сравнение эффективности энерготехнологий при использовании разных источников энергии / О. Г. Бурдо, А. В. Гаврилов, Ю. Альхури [и др] // *Вестник ХПИ*. – 2018. − № 35 (1311). − С. 53−58.

18. Бурдо О.Г. Холодильные технологии в системе АПК / О. Г. Бурдо. –Одесса : Полиграф, 2009. − 288 с.
19. Бурдо, О. Г. Эволюция сушильных установок / О. Г. Бурдо. – Одесса : Полиграф, 2010. – 368 с.
20. Бурдо О. Г. Электромагнитные технологии обезвоживания сырья / О. Г. Бурдо, С. Г. Терзиев, И. И. Яровой, А. А. Борщ // *Problemele energeticii regionale*. − 2012. − № 1 (18). – С. 69−79.
21. Бурдо, О. Г. Энергетическая стратегия развития агропромышленного комплекса в условиях кризиса / О. Г. Бурдо, С. М. Буйвол, В. Н. Бандура // Проблемы региональной энергетики. − 2009. − № 1. − Р. 54−62.
22. Бурдо О. Г. Энергетический мониторинг инновационных энерготехнологий переработки растительного сырья / О. Г. Бурдо, А. В. Гаврилов, М. В. Кашкано, [и др.] // *Problemele energeticii regionale*. − 2019. – № 2 (43). – С. 23−38.
23. Бурдо, О. Г. Энергетический мониторинг пищевых производств / О. Г. Бурдо. – Одесса : Полиграф, 2008. – 244 с.
24. Виниченко, С. А. Разработка и научное обеспечение процесса сушки плодов смородины черной в вакуум-аппарате с СВЧ-энергоподводом : специальность 05.18.12 «Процессы и аппараты пищевых производств» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / С. А. Виниченко. − Воронеж, 2014. − 20 с.
25. Гаврилов, А. В. Анализ современных энерготехнологий переработки растительного сырья / А. В. Гаврилов // *Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ им. В. П. Горячкина».* − 2019. − № 5 (93). − С. 31−39. doi: 10.34677/1728-7936-2019-5-31-39.
26. Гаврилов А.В. 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

27. Гаврилов А.В. Исследование энерготехнологий процессов обезвоживания растительного сырья // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – Симферополь, 2018. Вып. 16 (179). – С. 82-89.
28. Гаврилов А.В. 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
29. 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
30. Гаврилов, А. В. Экспериментальное моделирование процесса выпаривания водных растворов в условиях вакуума и микроволнового поля / А. В. Гаврилов // *Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В. П. Горячкина»*. − 2020. − № 1 (95). – С. 41−50.
31. Гаврилов А.В. 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 энергоресурсоэффективности 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
32. Гаврилов А.В. Энерготехнологии процессов обезвоживания растительного сырья // Сборник тезисов докладов участников Российской теоретической и научно-практической, юбилейной конференции «Агробиологические основы адаптивно-ландшафтного ведения сельскохозяйственного производства»

(посвященной 100-летию создания Академии биоресурсов и природопользования). Симферополь, 12-16 октября 2018 г. – С. 150-154.

33. Гербер, Ю. Б. Исследование динамики процесса сушки ферроцинсодержащих отходов виноделия // *Научные труды Южного филиала Национального университета биоресурсов и природопользования Украины "Крымский агротехнологический университет". Серия: Технические науки*. − 2014. − № 163. − С. 5−10.
34. Гербер, Ю. Б. Исследование предварительного подогрева теплоносителя комплексным энергозамещающим устройством в тепловых процессах переработки молока / Ю. Б. Гербер, А. В. Гаврилов, А. П. Вербицкий // *Техника и технология пищевых производств (Food Processing : Techniques and Technology)*. − Кемерово, 2018. − Вып. № 3 (48). − С. 124−132. − doi: 10.21603/2074-9414-2018-3-124-132.
35. 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.
36. 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. Мордовия*. − 2020. – Т. 30, № 2. − С. 200−218. − doi: 10.15507/2658-4123.030.202002.200-218.
37. 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
38. Гербер, Ю. Б. Определение параметров перемешивающего устройства в емкости для сквашивания при комбинированном подводе тепла / Ю. Б. Гербер, А. В. Гаврилов, Э. М. Сироткина // *Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования*

«Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина». − Москва, 2017. − Вып. № 4 (80). − С. 39−42.

39. Гербер, Ю. Б. Основы энергосбережения в процессе приготовления концентрированных продуктов / Ю. Б. Гербер // Научные труды КГАУ. − Симферополь, 1997. − С. 43−46.
40. Гербер, Ю. Б. Сушка сельскохозяйственной продукции с использованием возобновляемых источников энергии : учебное пособие для студентов и магистрантов высших учебных заведений инженерно-технологического профиля / Ю. Б. Гербер, С. В. Чунихин, Л. И. Грачева, О. В. Носковский, А. А. Дьяченко. − Симферополь, 2004. − 260 с., ил.
41. 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.
42. Гербер, Ю. Б. Технология переработки сельскохозяйственной продукции / Ю. Б. Гербер, K. Dewettinck, А. А. Дьяченко // Гент ; Симферополь, 2004. − 330 с., ил.
43. Гербер, Ю. Б. Энергетические показатели работы термо-смешивающей 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 им. В. П. Горячкина». − Москва, 2018. − Вып. № 6 (88). − С. 65−69.
44. Гинзбург, А. С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности / А. С. Гинсбург. – Москва : Пищевая промышленность, 1973. − 527 с.
45. Гинзбург, А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – Москва : Пищевая промышленность, 1973. − 528 с.
46. Гинзбург, А. С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности / А. С. Гинзбург. – Москва : Агропромиздат, 1985. − 336 с.

47. Гинзбург, А. С. Современные проблемы кибернетики сушки − теория и техника управления процессом сушки и работой сушильной установки / А. С. Гинзбург // Труды III Минского Международного форума по тепломассообмену. − 1996. − Т. VIII . − С. 8−20.
48. Григорьев, И. В. Импульсная инфракрасная сушка семян овощных культур / И. В. Григорьев, С. П. Рудобашта // *Вестник МГАУ им. В. П. Горячкина*. − 2009. − № 4 (35). − С. 7−10.
49. Григорьев, И. В. Импульсная инфракрасная сушка семян овощных культур, нетрадиционных и редких растений : специальность 05.20.02 «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / И. В. Григорьев. – Москва : МГАУ им. Горячкина, 2010. − 222 с.
50. Григорьев И. В., Рудобашта С. П. Способ импульсной инфракрасной сушки термолабильных материалов. Патент № 2393397 Российская Федерация, МПК F26B 3/06(2006.01), F26B 3/30(2006.01). : № 2009119751 : заявл. 2009.05.26 : опубл. 27.06.2010 ; Бюл. № 18 – 6 с.
51. Гришин, М. А. Установки для сушки пищевых продуктов : справочник / М. А. Гришин, В. И. Атаназевич, Ю. Г. Семенов. − Москва : Агропромиздат, 1989. − 215 с.
52. Гухман. А. А. Введение в теорию подобия : учебное пособие для вузов / А. А. Гухман. − 2-е изд., доп. и перераб. – Москва : Высшая школа, 1973. – 296 с.
53. Гухман, А. А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло- и массоообмена: (процессы переноса в движущейся среде) / А. А. Гухман. − 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1974. – 328 с.
54. Данилов Ю. Б. Интенсивные и энергосберегающие выпарные аппараты с пластинчатой греющей камерой / Ю. Б. Данилов [и др.] // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Chemistry, Chemical Technology and Ecology : збірник наукових праць. – Харків : НТУ "ХПІ"*, 2018. – № 35 (1311). – С. 38−44.

55. Демиденко, Н. Д. Моделирование и оптимизация тепломассообменных процессов в химической технологии. – Москва : Наука, 1991. – 239 с.
56. Демидов, А. С. Сушка семян подсолнечника инфракрасным излучением / А. С. Демидов, Б. А. Вороненко, С. Ф. Демидов // *Новые технологии*. – 2011. – № 3. – С. 25–30.
57. Демидов С. Ф. Некоторые закономерности процесса инфракрасной сушки семян подсолнечника для семенного фонда / С. Ф. Демидов, Б. А. Вороненко, А. С. Демидов, О. А. Бакк // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств*. − 2013. − № 2.
58. Демидов, С. Ф. Кинетика сушки морской капусты инфракрасным излучением / С. Ф. Демидов, Д. А. Ободов, Б. А. Вороненко // *Процессы и аппараты пищевых производств*. − 2012. − № 1.
59. Демидов, С. Ф. Математическое описание совместного тепломассопереноса при инфракрасном нагреве морской капусты / С. Ф. Демидов, Б. А. Вороненко, Д. А. Ободов // *Процессы и аппараты пищевых производств*. − 2012. − № 2.
60. Демидов, С. Ф. Сушка морских водорослей инфракрасным излучением / С. Ф. Демидов, Б. А. Вороненко, Д. А. Ободов // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств*, 2014. − № 2.
61. Демидов, С. Ф. Кинетика инфракрасной сушки шинкованной свеклы / С. Ф. Демидов, Б. А. Вороненко, И. А. Бажанова // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств*. – 2015. − № 3. − С 158–163.
62. Демидов, С. Ф. Инфракрасная сушка кроющих чешуек репчатого лука перед закладкой на хранение / С. Ф. Демидов, В. И. Филиппов, С. А. Петров // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств*. – 2016. − № 4. − С. 26−31.
63. Демидов, С. Ф. Сушка листьев брусники инфракрасным излучением / С. Ф. Демидов, М. И. Кременевская, Б. А. Вороненко [и др.] // *Научный журнал НИУ ИТМО*. − 2014. − № 2. − С. 27–36.

64. Джангирян В. Г., Кривенко И. В., Наместников В. В, Афанасьев А. Г., Прохоров Е. Н. Способ и установка для концентрирования кислот. Патент № RU 2651253, МПК B01D1/00 (2006.01), B01J 19/12(2006.01).: № 2016141084 заявл. 19.10.20016 : опубл. 18.04.2018 /– 25 с.
65. Елисеева Л.Г. Анализ тенденций импортозамещения соковой продукции на российском рынке / Л. Г. Елисеева, Е. В. Гришина // *Международная торговля и торговая политика*. – 2016. − № 1 (5). − С. 75−81.
66. Желтоухова, Е. Ю. Исследование радиационно-конвективной сушки картофеля при переменном теплоподводе / Е. Ю. Желтоухова, А. А. Каданцев, В. И. Яницкий // *Вестник ВГУИТ*. − 2017. − Т. 79, № 1. − С. 46–49.
67. Кришер, О. Научные основы техники сушки : пер. с нем. / О. Кришер. – Москва : Издательство иностранной литературы, 1961. − 540 с.
68. Желтоухова, Е. Ю. Исследование влияния радиационно-конвективной сушки на технологические свойства чипсов из хурмы / Е. Ю. Желтоухова // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. − 2012. − № 1. − С. 13−15.
69. Арсеньєв, В. Застосування рідинно-парового ежектора для рекомпресії вторинної пари вакуумних випарних установок / В. Арсеньєв, С. Шарапов, В. Мірошниченко // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2013. № 2. С. 57−64.
70. Завалий, А. А. Инфракрасная сушка плодов и овощей / А. А. Завалий, И. В. Янович // *Научные труды Южного филиала Национального университета биоресурсов и природопользования Украины "Крымский агротехнологический университет". Серия: Сельскохозяйственные науки*. − 2011. − № 137. − С. 190−196.
71. Завалий, А. А. Сравнительный анализ затрат энергии на процесс сушки при конвективном и инфракрасном подводе тепла к продукту / А. А. Завалий, В. С. Рутенко // *Научные труды Южного филиала Национального университета биоресурсов и природопользования Украины "Крымский*

агротехнологический университет". Серия: Технические науки. − 2014. − № 162. − С. 95−103.

72. Завалий, А. А. Экспериментальное исследование равномерности сушки на лотке инфракрасной камеры для сушки плодов и овощей / А. А. Завалий // Пищевая наука и технология. −2013. − Т. 24, № 3. − С. 77−81.
73. Кац З. А. Сушка картофеля, фруктов и овощей при радиационно-конвективном теплоподводе / З. А. Кац, Э. А. Гусева, А. П. Рысин [и др.] // Труды ВНИИКОП. – 1973. − Вып. XVIII. − С. 91−112.
74. Киптелая, Л. В. Влияние размещения рефлектора в ИК-сушилке на процессе сушки плодово-ягодного сырья / Л. В. Киптелая, А. Н. Загорулько // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке : международная научно-технологическая конференция, Санкт-Петербург, 13−15 ноября 2013 г. − С. 321−323.
75. Кирич, Н. Б. Ресурсоощадність харчових переробних підприємств вимога дня / Н. Б. Кирич, І. А. Кінаш // Book of abstracts International scientific and technical conference "State and prospects of food science and industry". − Тернопіль, 2015. − С. 196−198.
76. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – Новосибирск : Наука, 1970. – 458 с.
77. Кутепов, А. М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании / А. М. Кутепов, Л. С. Стерман, Н. Г. Стюшин. – 3-е изд., испр. – Москва : Высшая школа, 1986. − 448 с.
78. Лащинский, А. А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры : справочник / А. А. Лащинский, А. Р. Толчинский. − Москва : Альянс, 2013. − 752 с. : ил.
79. Лебедев, П. Д. Сушка инфракрасными лучами / П. Д. Лебедев. – Ленинград : Госэнергоиздат, 1955. − 232 с.
80. Лонцин, М. Основные процессы пищевых производств : пер. с англ. / М. Лонцин, Р. Мерсон. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 384 с.

81. Левин, С. Е. Мониторинг промышленной безопасности топливно-энергетического комплекса / С. Е. Левин, С. Я. Нагибин, В. В. Шилов // *Национальная безопасность России: актуальные аспекты*. − 2018. С. 30−36.
82. Лыков, А. В. Сушка в химической промышленности / А. В. Лыков. – Москва : Химия, 1970. − 429 с.
83. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. − Москва : Энергия, 1968. − 470 с.
84. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва : Высшая школа, 1967. – 600 с.
85. Лыков, А. В. Тепломассообмен : справочник / А. В. Лыков. – Москва : Энергия, 1971. – 560 с.
86. Марченко, В. Н. Энергетическая эффективность парового струйного термокомпрессора / В. Н. Марченко, М. Г. Прокопов // *Холодильна техніка і технологія*. 2007. № 5 (109). С. 45–51.
87. Остриков, А. Н. Радиационно-конвективная сушка грушевых чипсов при импульсном энергоподводе / А. Н. Остриков, Е. Ю. Желтоухова // *Известия вузов. Серия: Пищевая технология*. − 2012. − № 1. − С. 83−86.
88. Остриков А. Н., Стурова Е. Ю. Способ производства персиковых чипсов. Патент № 2456805 Российская Федерация, МПК A23B7/02, A23L3/54.: № 2011106688/13 : заявл. 22.02.2011 : опубл. 27.07.2012 ; Бюл. № 21 / ; Воронежская государственная технологическая академия. – 11 с.
89. Остриков А. Н., Стурова Е. Ю. Способ производства чипсов из хурмы. Патент № 2461203 Российская Федерация, МПК A23B7/01, A23L3/54.: заявл. 13.04.2011 ; опубл. 20.09.2012 ; Бюл. № 26 / ; Воронежская государственная технологическая академия. – 11 с.
90. Остриков, А. Н. Изучение кинетики радиационно-конвективной сушки персиков при импульсном энергоподводе / А. Н. Остриков, Е. Ю. Желтоухова // *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК − продукты здорового питания*. – 2014. − № 1. – С. 114–118.
91. Очиров, В. Д. Обоснование режимов ИК-энергоподвода в технологии сушки корнеплодов моркови импульсными керамическими преобразователями

излучения : специальность 05.20.02 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. Д. Очиров. − Красноярск, 2011. − 189 с.

92. Плановский, А. Н. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности / А. Н. Плановский, В. И. Муштаев, В. М. Ульянов. – Москва : Химия, 1979. − 287 с.
93. Плешков, А. И. Исследование процесса рациационно-конвективной сушки овощей в состоянии псевдоожижения : специальность 05.00.00 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. И. Плешков. − Воронеж : ВТИ, 1968. – 197 с.
94. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. – Москва : Энергия, 1973. − 288 с.
95. Рудобашта, С. П. Кинетика импульсной инфракрасной сушки зерна в монослое / С. П. Рудобашта, С. А. Проничев // *Вестник ФГОУ ВПО МГАУ «Агроинженерия»*. − Москва : ФГОУ ВПО МГАУ, 2006. − Вып. 3. – С. 53−55.
96. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта ; под ред. А. Н. Плановского. – Москва : Химия, 1980. – 248 с.
97. Семков, С. В. Энергетический аудит винзавода / С. В. Семков // *Сборник трудов ОНАХТ*. – Одесса, 2006. − Вып. 28. – С. 404−408.
98. Семочкин А. С. Применение СВЧ-излучения для концентрирования серной кислоты в вакууме / А. С. Семочкин, А. И. Хацринов, М. Ф. Хакимов [и др.] // *Вестник Казанского технологического университета*. 2010. № 8. С. 410−411.
99. Справочник по теплообменникам : пер. с англ. В 2-х т. Т. 1 / под. ред. Б. С. Петухова. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.
100. Стерман, Л. С. Химические и термические методы обработки воды на ТЭС : учебное пособие для вузов / Л. С. Стерман, В. Н. Покровский. – Москва : Энергия, 1981. − 232 с.
101. Струпан, Е. А. Технология получения экстрактов из дикорастущего растительного сырья, широко применяемого в пищевой промышленности и

фитотерапии / Е. А. Струпан, В. С. Колодязная, О. А. Струпан // Вестник КрасГАУ. − 2012. − № 8. – С. 199−205.

102. Таубе, П. Р. Химия и микробиология воды : учебник для студентов вузов / П. Р. Таубе, А. Г. Баранова. – Москва : Высшая школа, 1983. − 280 с.
103. 191 Теория тепломассообмена / С. И. Исаев, И. А. Кожинов, В. И. Кофанов [и др.] ; под ред. А. И. Леонтьева. – Москва : Высшая школа, 1979. – 495 с.
104. Тришин, Ф. А. Управление потоками энергии в низкотемпературных разделительных установках / Ф. А. Тришин, А. Р. Трач, Ю. В. Орловская // *Probleme energeticii regionale*. − 2018. – № 1 (36). − С. 72−86.
105. Трушечкин, А. В. Научное обеспечение процесса двухстадийного вакуум-выпаривания поликомпонентных овощных смесей и разработка оборудования для его реализации: специальность 05.18.12: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. В. Трушечкин; Воронежский государственный университет инженерных технологий. − Воронеж, 2013. − 266 с.
106. Худоногов, И. А. Влияние режимов ИК-энергоподвода на качественные и количественные показатели сушеных корнеплодов моркови / И. А. Худоногов, В. Д. Очиров // *Вестник АлтГАУ*. – Барнаул, 2010. – № 8. – С. 73−77.
107. Чубик, И. А. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов / И. А. Чубик, А. М. Маслов. – Москва : Пищевая промышленность, 1970. – 184 с.
108. Abano EE. Microwave Assisted Convective air Drying of Sugarloaf Pineapples (ananas comosus). *Applied Engineering in Agriculture*, 2021, vol. 37, no. 5, pp. 763-774. doi: 10.13031/aea.14380
109. Abbaspour-Gilandeh Y., Kaveh M., Fatemi H., Hernández-Hernández J. L., Fuentes-Penna A., Hernández-Hernández M. Evaluation of the Changes in Thermal, Qualitative, and Antioxidant Properties of Terebinth (Pistacia atlantica) Fruit under Different Drying Methods. *Agronomy*, 2020, vol. 10, no. 9. doi: 10.3390/agronomy10091378

110. Afzal, T. M. Diffusion in potato during far infrared radiation drying / T. M. Afzal, T. Abe // *Journal of Food Engineering*. − 1998. − № 37 (4). – P. 353–365.
111. Afzal, T. M. Energy and quality aspects during combined FIR–convection drying of barley / T. M. Afzal, T. Abe, Y. Hikida // *Journal of Food Engineering*. − 1999. − № 42 (4). − P. 177–182.
112. Afzal, T. M. Some fundamental attributes of far infrared radiation drying of potato / T. M. Afzal, T. Abe // *DryingTechnology*. − 1999. − № 17 (1/2). − P. 137–155.
113. Alizehi M.H., Niakousari M., Fazaeli M., Iraji M. Modeling of vacuum- and ultrasound-assisted osmodehydration of carrot cubes followed by combined infrared and spouted bed drying using artificial neural network and regression models. *J Food Process Eng*, 2020, 43(12), e13563. https://doi.org/10.1111/jfpe.13563
114. Almena A., Goode K.R., Bakalis S., Fryer P.J., Lopez-Quiroga E. Optimising food dehydration processes: energy-efficient drum-dryer operation. *Energy Procedia*, 2019, vol. 161, pp. 174-181. doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.078
115. Alvi T., Khan M.K., Maan A.A. et al. Modelling and Kinetic Study of Novel and Sustainable Microwave-Assisted Dehydration of Sugarcane Juice. *Processes*, 2019. DOI:10.3390/pr7100712
116. An J., Du Y., Yan J., Xie H., Liao X., Wei H. Study on the characteristics and kinetics of microwave hot air combined drying of peanut pods. *Case Stud. Thermal Eng*., 2024. https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104640
117. An N.N., Sun W.H., Li B.Z., Wang Y., Shang N., Lv W.Q., Li D., Wang L.J. Effect of different drying techniques on drying kinetics, nutritional components, antioxidant capacity, physical properties and microstructure of edamame. F*ood Chem*, 2022, 373(Pt B):131412. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131412
118. Antal, T. Effect of combined drying on the physical properties and bioactive components of 'Jonathan' apple (Malus domestica L.). *Acta Alimentaria*, 2023, vol. 53, No. 4, P. 538-549. Doi: 10.1556/066.2023.00114
119. Araujo M.E.V., Barbosa E.G., Lopes R.P., Corrêa P.C., Barbosa E.G. Infrared drying of pear slices: Drying kinetics, energy, and exergy analysis. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, vol. 44, no. 12, e13915. Doi: 10.1111/jfpe.13915

120. Arballo J.R., Campañone L.A., Mascheroni R.H. Study of microwave drying of vegetables by numerical modeling. Influence of dielectric properties and operating conditions. *Food Science and Technology Research*. 2018, 24(5), 811-816.
121. Asghar M., Yusof Y., Mokhtar M. et al. Processing of coconut sap into sugar syrup using rotary evaporation, microwave, and open-heat evaporation techniques. *J Sci Food Agric*, 2020. – P. 4012-4019. DOI: 10.1002/jsfa.10446
122. Azimi-Nejadian, H., Hoseini, S. S. Study the effect of microwave power and slices thickness on drying characteristics of potato. *Heat and Mass Transfer*, 2019, 55(10), 2921-2930. http://dx.doi.org/10.1007/s00231-019-02633-x
123. Bahlul N., Balti M., Guellouze M.S., Kechaou N. Coupling of Microwave Radiations to Convective Drying for Improving Fruit Quality. *IDS'2018: 21st International Drying Symposium*, p. 699. doi: 10.4995/ids2018.2018.7794
124. Balin, B. E. EKC hypothesis and the effect of innovation: A panel data analysis / B. E. Balin, D. M. Akan // *Journal of Business Economics and Finance*. − 2015. − № 4 (1). − P. 81−91.
125. Bassey, E.J., Cheng, J.H., Sun, D.W. Comparative elucidation of bioactive and antioxidant properties of red dragon fruit peel as affected by electromagnetic and conventional drying approaches. *Food Chemistry*, 2024, vol. 439, 138118. Doi: 10.1016/j.foodchem.2023.138118
126. Batista, A. S. Moisture Diffusion in Passion Fruit Seeds under Infrared Drying / A. S. Batista, M. F. F. Souza, M. M. Prado // *Diffusion Foundations and Materials Applications*. − 2022. − Vol. 30. − P. 25–32. − https://doi.org/10.4028/P-W52H5B.
127. Besir A., Gökmen S., Gül Lb., Yazici F., Gül O. Evaluating of Microwave Drying for Hawthorn Slice as Alternative to Convective Drying. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2022, vol. 65, no. 1, e22210614. doi: 10.1590/1678-4324-2022210614
128. 58 Bhartia, P. J. Microwave Power / P. Bhartia, S. S. Stuchly, M. Hamid. – 1973. − № 8. − P. 243–252.

129. Bhattacharjee C., Saxena V.K., Dutta, S. Fruit juice processing using membrane technology: A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, vol. 43, pp. 136-153. doi:10.1016/j.ifset.2017.08.002

130. Blau, R. Proc Prod Tech Div Meetings, Potato Chip Inst Intern / R. Blau, M. Powell, J. E. Gerling. – 1965. − P. 1–8.

131. Boateng I.D., Yang X.M., Process optimization of intermediate-wave infrared drying: Screening by Plackett–Burman; comparison of Box-Behnken and central composite design and evaluation: A case study. *Ind. Crops Prod*., 2021, **162**, 113287. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113287

132. Bolek S. Potential of Energy Saving by Microwave Drying for Waste Cucumis Metuliferus Seeds as Alternative to Freeze Drying. *Environmental engineering and management journal*, 2021, vol. 20, no. 9.

133. Bolin, H. R. Food dehydration by solar energy / H. R. Bolin, D. K. Salunkhe // *Crit. Rev. Food Sci. Nutri*. 1982. № 16. P. 327–354.

134. Bonazzi C. Food drying and dewatering / C. Bonazzi, E. Dumoulin, A. L. Raoult-Wack, Z. Berk, J. J. Bimbenet, F. Courtois, G. Trystram, J. Vasseur // *Drying Technology*. 1996. 14 (9). P. 2135−2170.

135. Borad S.G., Singh A.K., Meena G.S., Arora S., Raju P.N., Sabikhi L. Optimization of Spray Drying of Colostrum Protein Ingredients – A Rheological Approach. *Journal of Food Engineering*, 2021, 288, 110247. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110247

136. Borts B. Экспериментальное исследование динамики пузырьков воздуха в воде при быстрой декомпрессии / B. Borts, Yurij Kazarinov, Stella Skoromnaya, Viktor Tkachenko // *Journal of Kharkiv University, physical series: Nuclei, Particles, Fields*. − 2012. – Vol. 991. − P. 95−101.

137. Bouraoni, M. Microwave and convective drying of potato slices / M. Bouraoni, P. Richard, T. Durance // *Food Process Eng*. – 1994. − № 17 (3). − P. 353–363.

138. Bozkir H., Baysal T. Concentration of apple juice using a vacuum microwave evaporator as a novel technique: Determination of quality characteristics. *J Food Process Eng*, 2017, pp. 1-9. doi: 10.1111/jfpe.12535

139. Bozkir H., Baysal T. Concentration of orange juice by vacuum microwave evaporator. *3rd International Congress on Food Technology; October 10-12, 2018 Nevşehir/Turkey*. – P. 426.

140. Bozkir H. Concentration of apple juice by vacuum microwave evaporator and in comparison to rotary evaporator / Hamza Bozkir [et al.] // *Food Process Technol*. 2017. № 8:9 (Suppl). P. 128.

141. Bozkir, H., Tekgül, Y., Erten, E.S. Effects of tray drying, vacuum infrared drying, and vacuum microwave drying techniques on quality characteristics and aroma profile of orange peels. *J Food Process Eng*, 2021, vol.44, no. 1, e13611. doi: 10.1111/jfpe.13611

142. Bozkir H., Tekgul Y. Production of Orange Juice Concentrate Using Conventional and Microwave Vacuum Evaporation: Thermal Degradation Kinetics of Bioactive Compounds and Color Values. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, vol. 46, no. 6. Article number 15902. doi: 10.1111/jfpp.15902

143. Brennen, J. G. Dehydration of foodstuffs / J. G. Brennen ; T. M. Hardman (ed.) // Water and Food Quality. − Elsevier Applied Science Publishers, London. – 1989. − 33 p.

144. Brennan, J. G. Evaporation and Dehydration, in Food Processing Handbook / J. G. Brennan. − 2th ed. − Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany. − 2011. − P. 234−241. − doi: 10.1002/9783527634361.ch3.

145. Briki, S., Zitouni, B., Bechaa, B., & Amiali, M. Comparison of convective and infrared heating as means of drying pomegranate arils (Punica granatum L.). *Heat and Mass Transfer*, 2019, 55(11), 3189-3199. http://dx.doi.org/10.1007/s00231-019-02644-8

146. Britnell P. The application of heat pump drier in Australian food industry / P. Britnell, S. Birchall, S. Fitz-Paine, G. Young, R. Mason, A. Wood ; V. Rudolph, R. B. Keey (eds.) // *Drying ’94*. – 1994. − Vol. B. − P. 897–903.

147. Bulantekin Ö., Kuşçu A., Evaluation of microwave vacuum drying combined with explosion puffing drying and compared with microwave vacuum drying and hot-air

drying by the quality of the dried apple slices. *Cogent Food & Agriculture*, 2024, **10**(1), 2404699. https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2404699

148. Burdo O., Bezbakh I., Zykov A., Terziev S., Gavrilov A., Sirotyuk I., Mazurenko I., Yunbo Li. Development of powerefficient 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
149. Burdo O. G. Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes / O. Burdo, V. Bandura, A. Zykov [et al.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. − 2017. − Vol. 4, № 11 (88). − P. 34−42.
150. Burdo O. Electrodynamic apparatuses for solutions' concentration / O.G. Burdo, I.V. Sirotyuk, N.V. Ruzhitskaya, A.V. Gavrilov, D.S. Goncharov. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2022. T. 58. № 3. Pp. 290-298. doi: 10.3103/S1068375522030073
151. Burdo O.G. Electrodynamic Processes as an Effective Solution of Food Industry Problems / O.G. Burdo, F.A. Trishyn, S.G. Terziev, A.V. Gavrilov, I.V. Sirotyuk. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. − 2021. − Vol. 57(3). − P. 330–344. − doi: 10.3103/S1068375521030030.
152. Burdo, O. G. Electrotechnologies of targeted energy delivery in the processing of food raw materials / O. G. Burdo, V. N. Bandura, Y. O. Levtrinskaya // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. − 2018. − № 54 (2). − P. 210−218.
153. Burdo O. Experimental studies of the kinetics of infrared drying of spent coffee grounds / O. Burdo, I. Bezbakh, S. Shyshov, A. Zykov, A. Gavrilov, O. Vsevolodov, I. Sirotyuk, S. Terziev // Technology audit and production reserves. № 1/1 (51), 2020. Pp. 4-10. doi:10.15587/2312-8372.2020.195863
154. Burdo O., Gavrilov A., Kashkano M., Levtrynskaya Y., Sirotyuk 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
155. Burdo, O. G. Nanoscale effects in food-production technologies / O. G Burdo // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. − 2005. − № 1 (78). – С. 90−96.

156. 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. Gavrilov, V. Bandura, I. Mazurenko // Eastern-European journal of Enterprise Technologies, 2019, 5/11 (101). Pp. 24-32. doi: 10.15587/1729-4061.2019.178937

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

158. Burdo O.G., Trishyn F.A., Terziev S.G., Gavrilov A.V., Sirotyuk I.V. Elecrodymanic technologies – effective solution to the food industry problems. *Электронная обработка материалов*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 74-88. doi: 10.5281/zenodo.3970438

159. Calín-Sánchez, Á.; Lipan, L.; Cano-Lamadrid, M.; Kharaghani, A.; Masztalerz, K.; Carbonell-Barrachina, Á.A.; Figiel, A. Comparison of traditional and novel drying techniques and its effect on quality of fruits, vegetables and aromatic herbs. *Foods* 2020, *9*, 1261.

160. Caminata L.P., Perdomo C., Kiminami R. Effect of microwave heating during evaporation solvent and polymeric precursor formation in synthesis of $BaZr_{0.08}Ti_{0.92}O_3$ nanopowders. *Journal of Solid State Chemistry*, 2020. DOI: 10.1016/j.jssc.2020.121586

161. Cao X., Zhang M., Fang Z., Mujumdar A.S., Jiang H., Qian H., Ai H. Drying kinetics and product quality of green soybean under different microwave drying methods. *Dry Technol*, 2017, 35(2): 240–248. https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1170698

162. Cao, X., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Zhong, Q. Evaluation of quality properties and water mobility in vacuum microwave-dried carrot slices using pulse-spouted bed with hot air. *Drying Technology*, 2019, 37(9), 1087-1096. http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2018.1484758

163. Cao X., Zhang M., Qian H., Mujumdar A.S. Drying based on temperature-detection-assisted control in microwave-assisted pulse-spouted vacuum drying. *J Sci Food Agric*, 2017, 97(8):2307–2315. https://doi.org/10.1002/jsfa.8040

164. Carvalho G.R., Monteiro R.L., Laurindo J.B., Augusto P.E.D. Microwave and Microwave-Vacuum Drying as Alternatives to Convective Drying in Barley Malt Processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 73, 102770. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102770

165. Chantasiriwan, S. Simulation of quadruple-effect evaporator with vapor bleeding used for juice heating / S. Chantasiriwan // *International Journal of Food Engineering*. −2016. − № 2 (1). − P. 36−41.

166. Chen, Q., Song, H., Bi, J., Chen, R., Liu, X., Wu, X., Hou, H. Multi-Objective Optimization and Quality Evaluation of Short- and Medium-Wave Infrared Radiation Dried Carrot Slices. *International Journal of Food Engineering*, 2019, 20180234. doi:10.1515/ijfe-2018-0234

167. Chong C.H., Figiel A., Law C.L., Wojdylo A. Combined Drying of Apple Cubes by Using of Heat Pump, Vacuum-Microwave, and Intermittent Techniques. *Food Bioprocess Technol*. 2014, 7(4), 975-989.

168. Chua, K. J. Advances in heat pump systems: A review / K. J. Chua, S. K. Chou, W. M. Yang // *Appl. Energy*. 2010. Vol. 87. P. 3611–3624.

169. Chua LS., Leong C.Y. Effects of Microwave Heating on Quality Attributes of Pineapple Juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, vol. 44, no. 10. Article number 14786. doi: 10.1111/jfpp.14786

170. Ciurzynska A., Janowicz M., Karwacka M., Galus S., Kowalska J., Ganko K. The Effect of Hybrid Drying Methods on the Quality of Dried Carrot. *Applied Sciences-Basel*, 2022, vol. 20, no. 12, 10588. doi: 10.3390/app122010588

171. Clapp, J. The global political economy of climate change, agriculture and food systems / J. Clapp, P. Newell, Z. W. Brent // *The Journal of Peasant Studies*. − 2018. − № 45 (1). − P. 80−88.

172. Cohen, J. S. Progress in food dehydration / J. S. Cohen, T. C. S. Young // *Trends in Food Science & Technology*. − 1995. − № 6. – P. 20–24.

173. Costa M.P. Simultaneous analysis of carbohydrates and organic acids by HPLC-DAD-RI for monitoring goat's milk yogurts fermentation / M.P. Costa, B.S. Frasao, B.R.Carneiro de C. Lima, B.L. Rodrigues, C.A. Conte-Junior // *Talanta*. − 2016. − №152. − P. 162–170. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.01.061.

174. Cote, B. Mode´lisation et simulation du se´chage en continu des couches minces par rayonnement infrarouge / B. Cote, A. D. Broadbent, N. Therien // *Canadian Journal of Chemical Engineering*. − 1990. − № 68. − 786–794.

175. Cuccurullo, G., Giordano, L., Metallo, A., Cinquanta, L. Drying rate control in microwave assisted processing of sliced apples. *Biosystems Engineering,* 2018, 170, 24–30.

176. Cui, C., Zhao, D., Huang, J., & Hao, J. Progress on research and development of goji berry drying: a review. *International Journal of Food Properties*, 2022, *25*(1), 435–449. https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2046054

177. Curi, P. N., Salgado, D. L., Mendonça, K., Pio, R., Ferreira, J. L. G., & Souza, V. R. Influence of microwave processing on the bioactive compounds, antioxidant activity and sensory acceptance of blackberry jelly. *Food Science and Technology*, 2019, 39(Suppl. 2), 386-391. http://dx.doi.org/10.1590/fst.18618

178. da Costa FO, Alvarenga TF, de Mesquita TVC, Petri Júnior I. Hybrid drying of pulped arabica coffee cherry beans (*Coffea arabica L. cv. Catuai*) using a hexagonal microwave dryer designed by numerical simulations. *J Food Process Eng*. 2021; 44:e13666. https://doi.org/10.1111/jfpe.13666

179. Dai J.-W., Xiao H.-W., Zhang L.-H., Chu M.-Y., Qin W., Wu Z.-J., Han D.-D., Li Y.-L., Liu Y.-W., Yin P.-F. Drying characteristics and modeling of apple slices during microwave intermittent drying. *Journal of Food Process Engineering*. 2019, 1-10. DOI:10.1111/jfpe.13212

180. de Faria R. Q., dos Santos A. R. P., Gariepy Y., da Silva E. A. A., Sartori M. M. P., Raghavan V. Optimization of the Process of Drying of Corn Seeds with the Use of Microwaves. *Drying Technology*, 2019, vol. 38, no. 5-6, p. 676-684. doi: 10.1080/07373937.2019.1686009

181. de Souza A.U. Hybrid microwave-hot air drying of the osmotically treated carrots / Amanda Umbelina de Souza [et al.] // *LWT*. − 2022. − Vol. 156. − 113046. − https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.113046.

182. Decareau, R. V. Microwaves in the Food Processing Industry. − Academic Press, Orlando, 1985. − 79 p.

183. Delfiya D.S.A., Prashob K., Murali S., Alfiya P.V., Samuel M.P., Pandiselvam R. Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: a review. *J Food Process Eng*, 2022, 45(6):e13810. https://doi.org/10.1111/jfpe.13810

184. Demircan, B., Velioglu, Y.S., Giuffre, A.M. Comparison of different drying methods for bergamot peel: Chemical and physicochemical properties. *Journal of Food Science*, 2024, vol. 89, no. 3, pp. 1498-1516. Doi: 10.1111/1750-3841.16944

185. Dincer C. Effect of Intermittent Microwave Vacuum Concentration on Quality Parameters of Apple Juice and Sour Cherry Nectar and Mathematical Modeling of Concentration. *Food Science and Technology*, 2021, vol. 55, no. 3, pp. 175-196. doi: 10.1080/08327823.2021.1952837

186. Dinçer C., Çam I.B., Torun M., Gulmez H.B., Topuz A. Mathematical modeling of concentrations of grape, pomegranate and black carrot juices by various methods. *The Journal of Food*, 2019, vol. 44, no. 6, pp. 1092-1105. doi: 10.15237/gida.GD19080

187. Dinçer, İ. Heat Pumps, in Refrigeration Systems and Applications / İ. Dinçer, M. Kanoğlu. − 2thed. − John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. − 2010. − P. 104−121. − doi: 10.1002/9780470661093.ch6.

188. Dong W., Cheng K., Hu R., Chu Z., Zhao J., Long Y. Effect of microwave vacuum drying on the drying characteristics, color, microstructure, and antioxidant activity of green coffee beans. Molecules, 2018, 23(5), 1146. https://doi.org/10.3390/molecules23051146

189. Dostie M. Preliminary measurements on the drying of thick porous materials by combination of intermittent infrared and continuous convection heating / M. Dostie, J.-N. Se´guin, D. Maure, Q.-A. Ton-That, R. Chaˆtigny // *Drying'89* / A. S. Mujumdar, M. A. Roques (eds.). − New York : Hemisphere, 1989.

190. Doymaz I. Drying, Drying Behavior and Some Quality Parameters of Potato Finger Chips Using Infrared Radiation. *Latin American Applied Research*, 2021, 51(4), 261–267. https://doi.org/10.52292/j.laar.2021.779

191. Doymaz I. Drying, Colour and Rehydration Characteristics of Orange Slices Under Infrared Radiation Heating. *Latin American Applied Research*, 2022, 52(1), 43–48. https://doi.org/10.52292/j.laar.2022.826

192. Duarte-Correa Y., Díaz-Osorio A., Osorio-Arias J., Sobral P.J., Vega-Castro O. Development of fortified low-fat potato chips through vacuum impregnation and microwave vacuum drying. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol*., 2020, **64**, 102437. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102437

193. Dumpler J., Moraru C.I. Microwave vacuum Drying of Dairy Cream: Processing, Reconstitution, and Whipping Properties of a Novel Dairy Product. *Journal of Dairy Science*, 2024, 107(2), 774—789. https://doi.org/10.3168/jds.2023-23657

194. Eiholzer T. Integration of a solar thermal system in a medium-sized brewery using pinch analysis : methodolog and case study / T. Eiholzer, D. Olsen, S. Hoffmann [et al.] // *Appi Therm. Eng*. – 2017. − № 113. − P. 1558−1568.

195. El-Mesery H.S., Ashiagbor K., Hu Z., Alshaer W.G. A Novel Infrared Drying Technique for Processing of Apple Slices: Drying Characteristics and Quality Attributes. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 52, 103676. https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103676

196. El-Mesery H.S., Kamel R.M., Alshaer W.G. Thin-Layer Drying Characteristics, Modeling and Quality Attributes of Tomato Slices Dried with Infrared Radiation Heating. *Bioscience Journal*, 2022, 38, e38049. https://doi.org/10.14393/BJ-v38n0a2022-42303

197. Elik A., Yanik D.K., Mascan M., Göğüş F. Influence of three different concentration techniques on evaporation rate, color and phenolics content of blueberry juice. *J Food Sci Technol*, 2016, vol. 53, no. 5, pp. 2389-2395. doi: 10.1007/s13197-016-2213-0

198. Emec, B. G. Opredelenie metodom jadernogo magnitnogo rezonansa srednih razmerov i koncentracii vozdushnyh puzyr'kov, soderzhashihsja v vode / B. G. Emec // *Pis'ma v ZhTF*. – 1997. − T. 23, vyp. 19. − S. 42−45.

199. Eminoğlu, M.B.; Yegül, U.; Sacilik, K. Drying characteristics of blackberry fruits in a convective hot-air dryer. *HortScience*, 2019, *54*, 1546–1550.

200. Evaporator Hand Book. − 4th ed. – APV Americas, Engineered Systems Separation Technologies. – 67 p.

201. FAO Year Book Production. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Rome, 1999. 328 p.

202. Farjana S. H. Solar process heat in industrial systems − A global review / S. H. Farjana, N. Huda, M. A. P. Mahmud, R. Saidur // *Renew. Sustain. Energy Rev*. – 2018. − № 82. − P. 2270−2286.

203. Fazaeli M., Hojjatpanah G., Emam-Djomeh Z. Effects of heating method and conditions on the evaporation rate and quality attributes of black mulberry (*Morus nigra*) juice concentrate // Journal of Food Science and Technology, 2013, Vol. 50, Issue 1, pp. 35-43.

204. Franco A.P., Yamamoto L.Y., Tadini C.C., Gut J.A.W. Dielectric properties of green coconut water relevant to microwave processing: effect of temperature and field frequency. *J Food Eng*, 2015, 155, 69–78. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.01.011

205. Funebo, T. Microwave assisted air dehydration of apple and potato / T. Funebo, T. Ohlsson // *Food Eng*. – 1998. − № 38 (3). − P. 353–367.

206. Fung H. Microwave and spouted bed drying of frozen blue berries: the effect of drying and pretreatment methods on physical properties and retention of flavour volatiles / H. Fung, J. Tang, D. S. Mattinson, J. K. Fellman // *Food Process. Preservation*. – 1999. − № 23 (6). − P. 463–479.

207. Gallego-Juarez J. A. A new high intensity ultrasonic technology for food dehydration / J. A. Gallego-Juarez, G. Rodriguez-Corral, J. C. Galvez Moraleda, T. S. Yang // *Drying Technology*. – 1999. − № 17 (3). − P. 597–608.

208. Gao X., Shu D., Li X. et al. Improved film evaporator for mechanistic understanding of microwave-induced separation process. *Front Chem Sci Eng*, 2019. DOI: 10.1007/s11705-019-1816-1

209. 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.

210. Gavrilov A.V. Study of the features of modeling microwave vacuum evaporation / A.V. Gavrilov, 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

211. Ge X. Experimental Study on Concentrating Apple Juice by Microwave / Xinfeng Ge // *Advance Journal of Food Science and Technolog*. 2014. V. 6, № 4. P. 544−546.

212. Geng Z. Characteristics and multi-objective optimization of carrot dehydration in a hybrid in frared / Geng Zhihua, Torki Mehdi, Kaveh Mohammad [et al.]. − /hot air dryer, *LWT*, 2022. – Vol. 172. – 114229. − ISSN 0023-6438. − https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114229.

213. Gerber Y. Development of curd product technology with the addition of grape seed oil / Y. Gerber, A. Gavrilov, 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

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

215. 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

216. Gerber J. Optimization of energy costs for drying ferrocene-containing wastes of winemaking /, A. Zavaly, A. Gavrilov [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and*

Environmental Science : 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, INTERAGROMASH 2019, Rostov-on-Don, 10–13 сентября 2019 года. Vol. 403. – Rostov-on-Don: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012014. – doi: 10.1088/1755-1315/403/1/012014.

217. 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
218. Ginzburg, A. S. Application of Infrared Radiation in Food Processing. *Chemical and Process Engineering Series* / A. S. Ginzburg. − London: Leonard Hill, 1969. – 412 p.
219. González-Cavieres L., Pérez-Won M., Tabilo-Munizaga G., Jara-Quijada E., Díaz-Álvarez R., Lemus-Mondaca R. Advances in vacuum microwave drying (VMD) systems for food products. *Trends Food Sci. Technol*., 2021, **116**, 626–638. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.005
220. Gu, C., Ma, H.L., Guo, L.A., Zhang, X.L., Liu, D.D., Ouyang, N.N., Luo, X., Shan, Y.Q., Tuly, J.A. Effects of catalytic infrared drying in combination with hot air drying and freeze drying on the drying characteristics and product quality of chives. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, vol. 161, 113363. Doi: 10.1016/j.lwt.2022.113363
221. Guemouni, S., Mouhoubi, K., Brahmi, F., Dahmoune, F., Belbahi, A., Benyoub, C., Adjeroud-Abdellatif, N., Atmani, K., Bakhouche, H., Boulekbache-Makhlouf, L., & Madani, K. Convective and microwave drying kinetics and modeling of tomato slices, energy consumption, and efficiency. *Journal of Food Process Engineering*, 2022, 45(9), e14113. https://doi.org/10.1111/jfpe.14113
222. Guzik P., Kulawik P., Zając M., Migdał W. Microwave Applications in The Food Industry: An Overview of Recent Developments. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 1—20. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1922871
223. Hallstrom, B. Heat Transfer and Food Products / B. Hallstrom, C. Skjoldebrand, C. Tragardh. – London : Elsevier Applied Science, 1988. – 263 p.

224. Hameed A., Maan A.A., Khan M.K.I., Mahmood Khan I., Niazi S., Waheed Iqbal M., Riaz T., Manzoor M.F., Abdalla M. Evaporation Kinetics and Quality Attributes of Grape Juice Concentrate as Affected by Microwave and Vacuum Processing. *International Journal of Food Properties*, 2023, *26*(1), 1596—1611.
225. https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2218062
226. Holdsworth, S. D. Dehydration of foodstuffs − a review / S. D. Holdsworth // Food Technol. – 1971. − № 6. − 331 p.
227. Horuz E., Bozkurt H., Karataş H., Maskan M. Effects of Hybrid (Microwave-Convectional) and Convectional Drying on Drying Kinetics, Total Phenolics, Antioxidant Capacity, Vitamin C, Color and Rehydration Capacity of Sour Cherries. *Food Chemistry*, 2017, vol. 230, pp. 295-305. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.03.046
228. Horuz, E., Bozkurt, H., Karatas, H., Maskan, M. Microwave-conventional drying characteristics of red pepper: modeling, temperature profile, diffusivity and activation energy. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22(2), 425-437.
229. Hosovskyi R. Diffusive mass transfer during drying of grinded sunflower stalks / R. Hosovskyi [et al.] // *Chemistry & Chemical technology*. − 2016. − № 10 (4). – P. 459−464.
230. Hosseinalipour S.M., Zaghari P. Design and Fabrication of Catalytic Infrared Fruit Dryer to Evaluate Its Performance in the Bananas Drying Process. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46, e16627. https://doi.org/10.1111/jfpp.16627
231. Hou L., Zhou X., Wang S. Numerical analysis of heat and mass transfer in kiwifruit slices during combined radio frequency and vacuum drying. *Int J Heat Mass Transf*, 2020, 154:119704. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119704
232. Электронный ресурс: https://east-fruit.com/novosti/za-pyat-let-prodazhi-sushenykh-ovoshchey-i-fruktov-v-mire-uvelichilis-na-10/ (Дата обращения: 25.11.2024 г.).
233. Huang D., Men K., Tang X., Li W., Sherif S. Microwave intermittent drying characteristics of camellia oleifera seeds. *J Food Process Eng*. 2021; 44, e13608. https://doi.org/10.1111/jfpe.13608

234. Huang D., Yang P., Tang X., Luo L., Sunden B. Application of Infrared Radiation in the Drying of Food Products. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 110, 765–777. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.039

235. Ibis O.I., Bugday Y.B., Aljurf B.N., Goksu A.O., Solmaz H., Oztop M.H., Sumnu G. Crystallization of Sucrose by Using Microwave Vacuum Evaporation. *Journal of Food Engineering*, 2024, 365, 111847. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111847

236. IRENA. Solar heat for industrial processes. Technol. Briefs. Электронный ресурс: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_-ETSAP_Tech_Brief_E21_Solar_Heat_Industrial_2015.pdf (Дата обращения: 25.11.2024 г.).

237. Isik A., Ozdemir M., Doymaz I. Investigation of Microwave Drying on Quality Attributes, Sensory Properties and Surface Structure of Bee Pollen Grains by Scanning Electron Microscopy. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2021, vol. 38, no. 1, pp. 177—188. doi: 10.1007/s43153-020-00088-w

238. Israr H. Effect of heat treatments on sensor)' characteristics and shelf-life of skimmed milk / H. Israr, K. Muhammad, S. Muhammad [et al.] // *African Journal of Food Science*. − 2014. – Vol. 8, № 2. − P. 75−79.

239. Izli, N., Polat, A. Effect of convective and microwave methods on drying characteristics, color, rehydration and microstructure properties of ginger. *Food Science and Technology*, 2019, 39(3), 652-659. http://dx.doi.org/10.1590/fst.04518

240. Jayaraman, K. S. Dehydration of fruits and vegetables − recent developments in principles and techniques / K. S. Jayaraman, D. K. Das Gupta // *Drying Technology*. – 1992. − V.10, issue 1. – P. 1−50.

241. Jiang N. Evaluation of freeze-drying combined with microwave vacuum drying for functional okra snacks: Antioxidant properties, sensory quality, and energy consumption / N. Jiang, C. Liu, D. Li, Z. Zhang, C. Liu, D. Wang, L. Niu, M. Zhang // *Food Science and Technology*. − 2017. − Vol. 82. − P. 216−226.

242. Jiang N., Liu C., Li D., Zhang Z., Liu C., Wang D.I., Zhang M. Evaluation of freeze drying combined with microwave vacuum drying for functional okra snacks:

Antioxidant properties, sensory quality, and energy consumption. *LWT-Food Sci. Technol*., 2017, 82, 216–226. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.015

243. Joardder Muh., Karim A. Pore Evolution in Cell Walls of Food Tissue During Microwave-Assisted Drying: an In-Depth Investigation. *Foods*, 2023, vol. 12, no. 13. doi: 10.3390/foods12132497
244. Júnior Vieira da Silva. Influence of ultrasound and vacuum assisted drying on papaya quality parameters / Júnior Vieira da Silva, L. Lins de Melo, R. A. Batista de Medeiros, Z. M. Pimenta Barros, P. M. Azoubel // *LWT*. − 2018. − Vol. 97. − P. 317−322.
245. Junqueira L.A., Amaral T.N., Leite Oliveira N., Prado M.E.T., de Resende, J.V. Rheological Behavior and Stability of Emulsions Obtained from *Pereskia aculeata* Miller via Different Drying Methods. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1), 21–35. https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1437177
246. Kalinke, I., Kulozik, U. Enhancing Microwave Freeze Drying: Exploring Maximum Drying Temperature and Power Input for Improved Energy Efficiency and Uniformity. *Food Bioprocess Technol*, 2024, 17, 5357—5371. https://doi.org/10.1007/s11947-024-03438-5
247. Kalinke I., Roder J., Unterbuchberger G., Kulozik U. Microwave-Assisted Freeze Drying: The Role of Power Input and Temperature Control on Energy Efficiency and Uniformity. *Journal of Food Engineering*, 2025, 390, 112410. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112410
248. Kalyankar S.D., Deshmukh M.A., Chopde S.S., Khedkar C.D., Lule V.K., Deosarkar S.S. Milk Powder. *Encyclopedia of Food and Health*, 2016, pp. 724-728. doi: 10.1016/b978-0-12-384947-2.00465-7
249. Karthikeyan R. Performance analysis of greenhouse solar dryer using evacuated tubes / R. Karthikeyan, P. Thangavel, R. T. Raghunath, K. A. Muthu Priyan, M. Praveen Balaji // *Materials Today : proceedings*. – 2022. − № 66. − P. 1509−1513. − / https://doi.Org/10.1016/j.matpr.2022.06.4473.
250. Kassaye M. Determination of β-carotene in five commonly used Ethiopian vegetables using UVVis spectrophotometric method // Meseret Kassaye, Mulu

Hagos and Bhagwan Singh Chandravanshi / *Chemistry International*. − 2023. − №9(3). − P. 111-119. https://doi.org/10.5281/zenodo.8117660.

251. Kaveh M. Evaluation of exergy performance and onion drying properties in a multi-stage semi-industrial continuous dryer: Artificial neural networks (ANNs) and ANFIS models / M. Kaveh [et al.] // *Food and Bioproducts Processing*. − 2021. − Vol. 127. − P. 58–76. − https://doi.org/10.1016/J.FBP.2021.02.010.
252. Kayran, S., Doymaz, İ. Infrared Drying and Effective Moisture Diffusivity of Apricot Halves: Influence of Pretreatment and Infrared Power. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(2), 2016, e12827. doi:10.1111/jfpp.12827
253. Kemal E., Özbek H.N., Göğüş F., Yanık D.K. Hot Air-Assisted Radio Frequency Drying of Grated Potato (*Solanum tuberosum* L.): Drying Behavior and the Associated Effect on Characteristics of Potato Flour. *Journal of Food Science*, 2022, 87, 4068–4081. https://doi.org/10.1111/1750-3841.16265
254. Kemerli-Kalbaran, T.; Ozdemir, M. Impacts of microwave and freeze-drying methods on drying kinetics, physicochemical properties and antioxidant activity of pine nut (*Pinus pinea* L.). *Heat Mass Transf.* 2023, *60*, 31–46
255. Khademi, M. H. Simulation and optimization of a six-effect evaporator in a desalination process / M. H. Khademi, M. R. Rahimpour, A. Jahanmiri // *Chem. Eng. Proc*. 2009. Vol. 48. P. 339–347.
256. Khajehei F. Production of Pomegranate juice concentrate by complete block cryoconcentration process / F. Khajehei, M. Niakousari, M. H. Eskandari, M. Sarshar // *Journal of Food Process Engineering*. − 2015. − № 38 (5). − P. 488−498.
257. Khan M.K.I., Ghauri Y.M., Alvi T., Amin U., Khan M.I., Nazir A., Saeed F., Aadil R.M., Nadeem M.T., Babu I. Microwave Assisted Drying and Extraction Technique; Kinetic Modeling, Energy Consumption and Influence on Antioxidant Compounds of Fenugreek Leaves. *Food Science and Technology*, 2022, vol. 42. Article number e56020. doi: 10.1590/fst.56020
258. Khatun P., Karmakar A., Chakraborty I. Microwave-vacuum drying: Modeling validation of drying and rehydration kinetics, moisture diffusivity and

physicochemical properties of dried dragon fruit slices. *Food and Humanity*, 2024, **2**, 100292. https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100292

259. Kiptela, L. V. ICh-sushinnya roslinnoï sirovini / L. V. Kiptela, A. M. Zagorul'ko, O. S. Mol'skii // Les problemes contemporains dela technosphere et dela formation des cadres d'ingenieurs : VII Conference internationale scientifique et methodique du 8-17 octobre 2013 a Sousse (Tunisie). − P. 138−140.
260. Kuang H. Theoretical and experimental investigation of paper drying using gas-fired IR dryer / H. Kuang, R. Chen, J. Thibault, B. P. A. Grandjean // *Drying '92* − A. S. Mujumdar (ed.). – Amsterdam : Elsevier,1992. − 941 p.
261. Kschonsek, J. Polyphenolic compounds analysis of old and new apple cultivars and contribution of polyphenolic profile to the In vitro antioxidant Capacity / Kschonsek, Josephine & Wolfram, Theresa & Stöckl, Annette & Böhm, Volker // *Antioxidants (Basel, Switzerland)*. − 2018. №7(20). https://doi.org /10.3390/antiox7010020.
262. Kumar, C. Microwave-convective drying of food materials: A critical review / C. Kumar, M. A. Karim // *Critical reviews in food science and nutrition*. − 2019. − № 59 (3). − P. 379−394.
263. Kumar, L. Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review / L. Kumar, M. Hasanuzzaman, N. A. Rahim // *Energy Corners. Matiag*. – 2019. − № 195. − P. 885−908.
264. Kumar A., Shrivastava S.L. Temperature, concentration, and frequency dependent dielectric properties of pineapple juice relevant to its concentration by microwave energy. *Journal of Food Process Engineering*. 2019, 42(3), 1-12.
265. Kutlu N., Pandiselvam R., Saka I., Kamiloglu A., Sahni P., Kothakota A. Impact of Different Microwave Treatments on Food Texture. *Journal of Texture Studies*, 2022, 53(6), 709—736. https://doi.org/10.1111/jtxs.12635
266. Land, C. M. Industrial Drying Equipment. Selection and Application / C. M. Land. − New York : Marcel Dekker, 1991. – 362 p.
267. Lei YD., Chen JL., Zhang ZH., Deng XR. Influence of Microwave Vacuum Drying on the Effective Moisture Diffusivity of Seedless White Grapes. Vol. 42. Article № e37020. Doi: 10.1590/fst.37020

268. Li M.G., Zhou C.S., Wang B., Zeng S.Y., Mu R.Y., Li G.H., Li B.Z., Lv W.Q. Research Progress and Application of Ultrasonic— and Microwave—Assisted Food Processing Technology. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2023, 22(5), 3707—3731. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13198

269. Li Y. Comparative study of microwave-vacuum and vacuum drying on the drying characteristics, dissolution, physicochemical properties, and antioxidant capacity of Scutellaria extract powder / Y. Li, Y. Qi, Z. Wu, Y. Wang, X. Wang, F. Wang, M. Yang // *Powder Technology*. − 2017. − Vol. 317. − P. 430−437.

270. Lia H., Menga Y., Shua D. et al. Breaking the equilibrium at the interface: microwave-assisted reactive distillation (MARD). *Reaction Chemistry & Engineering*, 2019. DOI: 10.1039/x0xx00000x

271. Liang X., Li X., Zhang J., Kong B., Cao C., Zhang H., Shen L. Impact of power density on the drying kinetics, quality profiles, and microstructure of pork chip snacks dried by microwave vacuum drying. *LWT- Food Sci. Technol*., 2024, 205, 116477

272. Liu Hl., Liu Hy., Liu Hy., Zhang X., Hong Qc., Chen W., Zeng X. Microwave Drying Characteristics and Drying Quality Analysis of Corn in China. *Processes*, 2021, vol. 9, no. 9, 1511. doi: 10.3390/pr9091511

273. Liu W., Zhang M., Bhandari B. Nanotechnology – A shelf-life extension strategy for fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, vol. 60, no. 10, pp. 1706-1721. doi: 10.1080/10408398.2019.1589415

274. Lohrasbi-Nejab S., Shahedi M., Fathi M. Comparative study of microwave-vacuum, microwave and convectional evaporation methods on physicochemical properties of barberry juice. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020.

275. Lv W., Li D., Lv H., Jin X., Han Q., Su D., Wang Y. Recent development of microwave fluidization technology for drying of fresh fruits and vegetables. *Trends Food Sci Technol*, 2019, 86:59–67. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.047

276. Lyons, D. W. Heat Mass Transfer / D. W. Lyons, J. D. Hatcher, J. E. Sunderland. – 1972. − № 15. − P. 897–905.

277. Ma, Y., Tian, X., Wang, Y., Zhao, H., Song, J. Comparative Study on Drying Characteristics and Quality of Apple Cubes Dried in Two Different Microwave Dryers. Polish *Journal of Food and Nutrition Sciences*, 2023, 73(4), 367-374. https://doi.org/10.31883/pjfns/174972

278. Malakar, S., Arora, V.K., Nema, P.K., Yadav, D.K. Development of infrared-assisted hybrid solar dryer for drying pineapple slices: Investigation of drying characteristics, mass transfer parameters, and quality attributes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2023, vol. 88, 103437. Doi: 10.1016/j.ifset.2023.103437

279. Malekjani, N.; Emam-Djomeh, Z.; Hashemabadi, S.; Askari, G. Modeling Thin Layer Drying Kinetics, Moisture Diffusivity and Activation Energy of Hazelnuts during Microwave-Convective Drying. *Int. J. Food Eng.* 2018, *14*, 20170100.

280. Manal A. Sorour. Optimization of multiple effect evaporators designed for fruit juice concentrate. *American Journal of Energy Engineering*, 2015, pp. 6-11.

281. Manzoor M.F., Ahmed Z., Ahmad N., Aadil R.M., Rahaman A., Roobab U., Rehman A., Siddique R., Zeng X.A., Siddeeg A. Novel processing techniques and spinach juice: Quality and safety improvements. *Journal of Food Science*, 2020, vol. 85, no. 4, pp. 1018-1026. doi: 10.1111/1750-3841.15107

282. Marsden, T. Theorising food quality: some key issues in understanding its competitive production and regulation / T. Marsden // *Qualities of food*. Manchester University Press, 2018. − P. 129−155.

283. Mason R. L. Development and application of heat pump dryers to the Australian food industry / R. L. Mason, P. M. Britnell, G. S. Young, S. Birchall, S. Fitz-Paine, B. J. Hesse // *Food Australia*. – 1994. − № 46 (7). − P. 319.

284. Masud M., Joardder M., Ananno A., Nasif S. Feasibility Study and Optimization of Solar-Assisted Intermittent Microwave-Convective Drying Condition for Potato. *European Food Research and Technology*, 2022, vol. 248, no. 5, pp. 1335—1349. doi: 10.1007/s00217-022-03957-5

285. Meisel, N. *Microwave Energy Applications Newsletter* / N. Meisel. − 1979. − № 12 (6). − P. 3–6.

286. Menon, A.; Stojceska, V.; Tassou, S.A. A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. *Trends Food Sci. Technol.* 2020, *100*, 67–76

287. Milczarek R.R., Vilches A.M., Olsen C. W., Breksa A.P., Mackey B.E., Brandl M.T. Physical, microbial, and chemical quality of hot-air-dried persimmon (Diospyros kaki) chips during storage. *Journal of Food Quality*, 2020, vol. 2020, pp. 1-15. doi: 10.1155/2020/7413689

288. Moldovan C., Babotă M., Mocan A., Menghini L., Cesa S., Gavan A., Barros L. Optimization of the drying process of autumn fruits rich in antioxidants: A study focusing on rosehip (*Rosa canina* L.) and sea buckthorn (*Elaeagnus rhamnoides* (L.) A. Nelson) and their bioactive properties. *Food Funct*., 2021, **12**(9), 3939–3953.

289. Monteiro R.L., Link J.V., Tribuzi G., Carciofi B.A.M., Laurindo J.B. Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices. *Journal of food engineering*. 2018, (232), 1-10.

290. Monton C, Luprasong C, Charoenchai L. Acceleration of turmeric drying using convection and microwave-assisted drying technique: An optimization approach. *J Food Process Preserv*. 2019; 43:e14096. https://doi.org/10.1111/jfpp.14096

291. Moradi M., Azizi S., Niakousari M., Kamgar S., Khaneghah A.M. Drying of green bell pepper slices using an IR-assisted spouted bed dryer: an assessment of drying kinetics and energy consumption. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2020, 60. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102280

292. Naderi B., Maghsoudlou Y., Aminifar M. et al. Investigation on the changes in color parameters and turbidity of corcelian cherry (*cornus mass L*) produced by microwave and convectional heating. *Nutrition and Food Sciences Research*, 2015. – 4(2). – P. 39-46.

293. Nair P.K., Espinosa-Santana A.L., Guerrero-Martínez L., López-Ortiz A., Nair M.T.S. Prospects toward UV-blue filtered solar drying of agricultural farm produce using chemically deposited copper chalcogenide thin films on cellular

polycarbonate. *Solar Energy*, 2020, vol. 203, pp. 123-135. doi: 10.1016/j.solener.2020.04.012

294. Navarri, P. Preliminary study of drying of coated film heated by infrared radiation / P. Navarri, A. Gevaudan, J. Andrieu // *Drying'92* / A. S. Mujumdar (ed.). – Amsterdam : Elsevier, 1992. − 722 p.
295. Nayak D., Ray N., Dash N., Rath Ss., Pati S., De Ps. An analysis of the influence of drying methods on the drying kinetics and quality of ilmenite-coke composite pellets. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2023, vol. 76, no. 10, pp. 2865—2873. doi: 10.1007/s12666-023-02976-4
296. Nejad S.L., Shahedi M., Fathi M. Comparative Study of Microwave-Assisted Vacuum Evaporation, Microwave-Assisted Evaporation, and Conventional Evaporation Methods on Physicochemical Properties of Barberry Juice. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 307-317.
297. Nguyen T.V.L., Nguyen P.B.D., Tran T.T.V., Tran B.L., Huynh T.P. Low-Temperature Microwave-Assisted Drying of Sliced Bitter Melon: Drying Kinetics and Rehydration Characteristics. *Journal of Food Process Engineering*, 2022, vol. 45, no. 12. doi: 10.1111/jfpe.14177
298. Ning, X., Feng, Y., Gong, Y., Chen, Y., Qin, J., Wang, D. Drying features of microwave and far-infrared combination drying on white ginseng slices. *Food Science and Biotechnology*. 2019. doi:10.1007/s10068-018-00541-0
299. Nisoa M., Wattanasit K., Tamman A., Sirisathitkul Y., Sirisathitkul C. Microwave Drying for Production of Rehydrated Foods: a Case Study of Stink Bean (Parkia Speciosa) Seed. *Applied Sciences-Basel*, 2021, vol. 11, no. 7, 2918. doi: 10.3390/app11072918
300. Nonhebel, M. A. Drying of Solids in the Chemistry Industry / M. A. Nonhebel, A. A. H. Moss. − London : Butterworths, 1971. – 301 p.
301. 61 Olsen, C. M. Proc Prod Tech Div Meetings, Potato Chip Inst Intern / C. M. Olsen, C. L. Drake. – 1966. − P. 51–54.

302. Onwude, D. I., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R., Chen, G. Numerical modeling of radiative heat and mass transfer for sweet potato during drying. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2018. doi:10.1111/jfpp.13741

303. Onwude, D. I., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R., Chen, G. The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato. *Journal of Food Engineering*, 2019, 241, 75–87. doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.08.008

304. O'Neil C. E., Nicklas T. A., Zanovec M., Kleinman R. E. , Fulgoni V. L. Fruit juice consumption is associated with improved nutrient adequacy in children and adolescents: the National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) 2003–2006. *Public health nutrition*. 2012. № 15 (10). P. 1871−1878.

305. Orikasa T., S Koide., Sugawara H., Yoshida M., Kato K., Matsushima U., Okada M., Watanabe T., Ando Y., Shiina T., Tagawa A. Applicability of vacuum-microwave drying for tomato fruit based on evaluations of energy cost, color, functional components, and sensory qualities. *J. Food Process. Preserv*., 2018, 42(6), e13625. https://doi.org/10.1111/jfpp.13625

306. Ozcan, N. Y. Thermodynamic assessment of gas removal systems for single-flash geothermal power plants / N. Y. Ozcan, G. Gokcen // *Applied Thermal Engineering*. − 2009. − Vol. 29, № 14-15. − P. 3246−3253.

307. Ozturk S., Şakıyan O., Alifaki Y.O. Electric Properties and Microwave and Infrared-Microwave Combination Drying Characteristics of Banana and Kiwifruit. *J. Food Process Eng.*, 2016. doi: 10.1111/jfpe.12502

308. Panchal, H. A comprehensive review of solar milk pasteurization system / H. Panchal, J. Patel, S. Chaudhary // *Journal of Solar Energy Engineering*. − 2018. − Vol. 140, № 1.

309. Pandiselvam, R., Davison, S., Manikantan, M.R., Jeevarathinam, G., Jacob, A., Ramesh, S.V., Beegum, P.P.S. Infrared-aided hot-air drying of coconut: Impact on drying kinetics and quality metrics. *Journal of Food Process Engineering*, 2024, vol. 47, no. 6, e14668. Doi: 10.1111/jfpe.14668

310. Pankyamma V., Madhusudana Rao B., Debbarma J., Pallela Panduranga Naga V. Physicochemical, microstructural, and microbial qualities of dehydrated

Tuna chunks: Effects of microwave power and drying methods. *J Food Process Preserv*. 2021; 45:e15426. https://doi.org/10.1111/jfpp.15426

311. Pantelić, V.; Miletic, N.; Milovanović, V.; Đurović, I.; Petković, M. The antioxidant potential of convective and microwave-dried raspberries. *Proceedings of the 1st International Symposium on Biotechnology, Čačak, Serbia, 17–18 March 2023*; pp. 445–450.
312. Pattnaik M., Mishra H.N. Effect of microwave treatment on preparation of stable PUFA enriched vegetable oil powder and its influence on quality parameters. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, vol. 44, no. 4, pp. 1-15. doi: 10.1111/jfpp.14374
313. Pawar, S. B., Pratape, V. M. Fundamentals of Infrared Heating and Its Application in Drying of Food Materials: A Review. *Journal of Food Process Engineering*, 2015, 40(1), e12308. doi:10.1111/jfpe.12308
314. Petković, M.; Filipović, V.; Lončar, B.; Filipović, J.; Miletić, N.; Malešević, Z.; Jevremović, D. A Comparative analysis of thin–layer microwave and microwave/convective dehydration of chokeberry. *Foods* 2023, *12*, 1651.
315. Pinto R.O.M., do Nascimento R.B., Jermolovicius L.A., Jurkiewicz C., Gut J.A.W., Pinto U.M., Landgraf M. Microbiological Feasibility of Microwave Processing of Coconut Water. *LWT*, 2021, 145, 111344. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111344
316. Polat A., Taskin O., Izli N. Assessment of Freeze, Continuous, and Intermittent Infrared Dryingmethods for Sliced Persimmon. *Journal of Food Science*, 2024, 89, 2332–2346. https://doi.org/10.1111/1750-3841.16994
317. Pope, J. Industrial performance of the mechanical vapor recompression and multiple effect evaporator system: successful operation and significant reduction in steam usage / J. Pope, J. Hude // Amer*ican society of sugar beet technologists. Biennial meeting. Proceedings from the 31st Biennial Meeting February 28−March 3*. 2001. Vol. 31. P. 124−136.
318. Prabhanjan, D. G. Microwave assisted convective air drying of thin layer carrots / D. G. Prabhanjan, H. S. Ramaswamy, G. S. V. Raghavan // *Food Eng*. – 1995. − № 25 (2). − P. 283–293.

319. Prosekov, A. Y. Food security: The challenge of the present / A. Y. Prosekov, S. A. Ivanova // *Geoforum*. − 2018. − Vol. 91. − P. 73−77.

320. Qadri T., Naik H.R., Hussain S.Z., Naseer B., Bhat T., Vijaykumar, Wani F.J. Spray Dried Apple Powder: Qualitative, Rheological, Structural Characterization and Its Sorption Isotherm. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 165, 113694. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113694

321. Qu F., Qiu F., Zhu X., Ai Z., Ai Y., Ni D. Effect of Different Drying Methods on the Sensory Quality and Chemical Components of Black Tea. *Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie*, 2019, vol. 99, pp. 112-118. doi: 10.1016/j.lwt.2018.09.036

322. Radojčin, M.; Pavkov, I.; Bursać Kovaćević, D.; Putnik, P.; Wiktor, A.; Stamenković, Z.; Kešelj, K.; Gere, A. Effect of selected drying methods and emerging drying intensification technologies on the quality of dried fruit: A review. *Processes* 2021, *9*, 132.

323. Radoiu M., Mello A. Technical advances, barriers, and solutions in microwave—assisted technology for industrial processing. *Chem Eng Res Des*, 2022, 181:331–342. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.03.029

324. Rahman M. M. Multi-scale model of food drying: Current status and challenges / M. M. Rahman [et al.] // *Critical reviews in food science and nutrition*. − 2018. − № 58 (5). − P. 858−876.

325. Ramkumar G. Implementation of Solar Heat Energy and Adsorption Cooling Mechanism for Milk Pasteurization Application / G. Ramkumar, B. Arthi, S. D. Sundarsingh Jebaseelan, M. Gopila, P. Bhuvaneswari, R. Radhika, Geremew Geidare KailoQ // *Adsorption Science & Technology Volume*. – 2022. − Article ID 5125931. − https://doi.org/10.1155/2022/5125931.

326. Ricardo L. Monteiro. Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slic-es / Ricardo L. Monteiro [et al.] // *Journal of food engineering*. – 2018. − № 232. − P. 1−10.

327. Rodríguez Ó. Application of power ultrasound on the convective drying of fruits and vegetables: effects on quality / Óscar Rodríguez [et al.] // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. − 2018. − № 98 (5). − P. 1660−1673.

328. Roknul Azam S.M., Zhang M., Law C.L., Mujumdar A.S. Effects of drying methods on quality attributes of peach (Prunus persica) leather. *Dry Technol*, 2019, 37(3):341–351. https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1454942

329. Ryabcev, G. The Problem of Informal Impact in The Activities of Regulatory Authorities and The Ways of Its Solutions / G. Ryabcev // *Strategic Priorities*. − 2017. − № 44 (3). − P. 59−66.

330. Sabancı S., Icier, F. Effects of Vacuum Ohmic Evaporation on Some Quality Properties of Sour Cherry Juice Concentrates. *International Journal of Food Engineering*, 2019, vol. 15, no. 9, pp. 1-8. doi: 10.1515/ijfe-2019-0055

331. Sabarez, H. T. Thermal Drying of Foods. *Fruit Preservation* / Henry T. Sabarez. − New York : Springer, 2018. − P. 181−210.

332. Sabarez, H. T. Ultrasound assisted low temperature drying of food materials. IDS 2018 / / H. T. Sabarez, S. Keuhbauch, K. Knoerzer // *21st International Drying Symposium Proceedings. − Editorial Universitat Politècnica de València, 2018*. − P. 1245−1250.

333. Sadeghi, E., Haghighi Asl, A., Movagharnejad, K. Mathematical modelling of infrared-dried kiwifruit slices under natural and forced convection. *Food Science & Nutrition*, 2019, 7(11), 3589-3606. doi: 10.1002/fsn3.1212

334. Sadeghi, E., Haghighi Asl, A., Movagharnejad, K. Optimization and quality evaluation of infrared-dried kiwifruit slices. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(2), 720–734. doi:10.1002/fsn3.1253

335. Sakare, P., Prasad, N., Thombare, N., Singh, R., Sharma, S.C. Infrared Drying of Food Materials: Recent Advances. *Food Engineering Reviews*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 381-398. Doi: 10.1007/s12393-020-09237-w

336. Salehi, F. Influence of Infrared Drying on Drying Kinetics of Apple Slices Coated with Basil Seed and Xanthan Gums / F. Salehi, M. Satorabi // *International Journal*

of Fruit Science. − 2021. − Vol. 21 (1). − P. 519–527. − https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1908202

337. Salehi, F. Recent Applications and Potential of Infrared Dryer Systems for Drying Various Agricultural Products: A Review. *Int. J. Fruit Sci.* 2019, *20*, 586–602.
338. Salunkhe, D. K. Developments in technology and nutritive value of dehydrated fruits, vegetables and their products / D. K. Salunkhe, H. R. Bolin ; D. K. Salunkhe (ed.) // *Storage, Processing and Nutritional Quality of Fruits and Vegetables*. − CRC Press, Cleveland, OH. – 1974. − 39 p.
339. Salunkhe, D.K. Postharvest Biotechnology of Fruits / D. K. Salunkhe, B. B. Desai. − OH, Cleveland : CRC Press, 1984. – 184 p.
340. Salunkhe, D. K. Postharvest Biotechnology of Vegetables / D. K. Salunkhe, B. B. Desai. − OH, Cleveland : CRC Press, 1985. – 208 p.
341. Sandu, C. Infrared radiative drying in food engineering: a process analysis / C. Sandu // *Biotechnology Progress*. − 1986. – № 2 (3). – P. 109–119.
342. Sharifian F., Gharkhloo Z.R., Yamchi A.A., Kaveh M. Infrared and Hot Drying of Saffron Petal (*Crocus sativus* L.): Effect on Drying, Energy, Color, and Rehydration. *Journal of Food Process Engineering*, 2023, 46(7), e14342. https://doi.org/10.1111/jfpe.14342
343. Sheng M., Lin S., Ma T., Zhang T., Li Y., Chen D. Effects of Physicochemical Properties, Antioxidant Activities and Flavor Profiles of Lentinus edodes Powder by Different Drying Methods. *Food Sci.* 2024. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20240523.1556.004.html
344. Shibata Y., Tanaka K., Asakuma Y. et al. Selective evaporation of a butanol/water droplet by microwave irradiation, a step toward economizing biobutanol production. *Biofuel Research Journal*, 2020. – P. 1109-1114. DOI: 10.18331/BRJ2020.7.1.3
345. Shishir M.R.I., Chen W. Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, vol. 65, pp. 49-67. doi: 10.1016/j.tifs.2017.05.006

346. Simić S. Consideration of Opportunities for the Optimization of Heat Energy Consumption in Industry and Energetics / S. Simić, G. Orašanin, D. Golubović [et al.] // *Lecture Notes in Networks and Systems*. − 2019. − № 76. − P. 494−503.

347. Simpson R., Almonacid S., Lopez D., Abakarov A. Optimum design and operating conditions of multiple effect evaporators: Tomato paste. *Food Eng*. 2008. Vol. 89. P. 488−497.

348. Skåra T., Løvdal T., Skipnes D., Mehlomakulu N.N., Mapengo C.R., Baah R.O., Emmambux M.N. Drying of Vegetable and Root Crops by Solar, Infrared, Microwave, and Radio Frequency as Energy Efficient Methods: A Review. *Food Reviews International*, 2023 39:9, 7197-7217. https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2148688

349. Smith, F. J. Microwave hot air drying of pasta, onions and bacon / F. J. Smith // *Microwave Energy Applications Newsletter*. – 1979. – № 12 (6). − P. 6–12.

350. Somogyi, L. P. Dehydration of fruits / L. P. Somogyi, B. S. Luh ; (J. G. Woodroof, B. S. Luh, eds.) // *Commercial Fruit Processing*. − 2nd ed. − AVI Publishing, Westport, CT, 1986. − 353 p.

351. Song, J.M., Jin, X.W., Han, Y.R., Zhai, S.J., Zhang, K.X., Jia, W.T., Chen, J.L. Infrared drying effects on the quality of jujube and process optimization using response surface methodology. *LWT-Food Science and Technology*, 2024, vol. 214. Doi: 10.1016/j.lwt.2024.117089

352. Sossa, J.W.Z., Orozco, G.L., Murillo, L.M.G., Osorio, M.P., Suarez, N.S. Infrared Drying Trends Applied to Fruit. *Front. Sustain. Food Syst*. 2021. 5:650690. doi: 10.3389/fsufs.2021.650690

353. Sozzi, A.; Zambon, M.; Mazza, G.; Salvatori, D. Fluidized bed drying of blackberry wastes: Drying kinetics, particle characterization and nutritional value of the obtained granular solids. *Powder Technol.* 2021, *385*, 37–49.

354. Sturm B. Process intensification and integration of solar heat generation in the Chinese condiment sector − A case study of a medium sized Beijing based factory / B. Sturm, S. Meyers, Y. Zhang [et al.] // *Energy Convers. Manag*. – 2015. − № 106. − P. 1295−1308.

355. Su D.B., Lv W.Q., Wang Y., Li D. and Wang L.J. Drying characteristics and water dynamics during microwave hot-air flow rolling drying of *Pleurotus eryngii*. *Dry Technol*, 2020, 38: 1493–1504. https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1648291.

356. Su Y., Zhang M., Zhang W., Liu C., Bhandari B. Low oil content potato chips produced by infrared vacuum pre-drying and microwave-assisted vacuum frying. *Drying Technology*. 2018, 36(3), 294-306.

357. Sujinda N., Varith J., Shamsudin R., Jaturonglumlert S., Chamnan S. Development of a Closed—Loop Control System for Microwave Freeze—Drying of Carrot Slices Using a Dynamic Microwave Logic Control. *Journal of Food Engineering*, 2021, 302, 110559. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110559

358. Sun Y.A., Zhang M., Mujumdar A.S., Yu D.X. Pulse-spouted microwave freeze drying of raspberry: control of moisture using ANN model aided by LF-NMR. *J Food Eng*, 2021, 292. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110354

359. Sunderland, J. E. An economic study of microwave freeze drying / J. E. Sunderland // Food Technol. – 1982. – № 36 (2). − P. 50–56.

360. Süfer Ö., Palazoğlu T.K., Microwave–vacuum drying of pomegranate arils (*Punica granatum* L. cv. Hicaznar): Effect on quality and nutrient content. *J. Food Process. Preserv*., 2019, **43**(9), e14085. https://doi.org/10.1111/jfpp.14085

361. Taghinezhad, E.; Kaveh, M.; Khalife, E.; Chen, G. Drying of organic blackberry in combined hot air-infrared dryer with ultrasound pretreatment. *Dry. Technol.* 2020, 39, 2075–2091.

362. Talburt, W. F. Potato Processing / W. F. Talburt, O. Smith (eds.). − 4th ed. − An AVI Book by Van Nostrand Reinhold Company, Inc., New York, 1987. − P. 371–489.

363. Tao Y., Yan BW., Zhang N.N., Wang M.F., Zhao JX., Zhang H., Chen W., Fan DM. Microwave Vacuum Evaporation as a Potential Technology to Concentrate Sugar Solutions: A Study Based on Dielectric Spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 2021, vol. 294. Article number 110414. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110414

364. Taşkin O., Izli N. Effect of Microwave, Infrared and Freeze Drying Methods on Drying Kinetics, Effective Moisture Diffusivity and Color Properties of Turmeric.

Journal of Agricultural Sciences, 2019, no. 25, pp. 334-345. doi: 10.15832/ankutbd.439434

365. Tasmin N. Integration of Solar Process Heat in Industries: A Review / Nahin Tasmin, Shahjadi Hisan Farjana, Md Rashed Hossain, Santu Golder, M. A. Parvez Mahmud // *Clean Technologies*. − 2022. − № 4 (1). − P. 97−131. − doi: 10.3390/cleantechnol4010008.
366. Tepe T.K., Tepe B. The Comparison of Drying and Rehydration Characteristics of Intermittent-Microwave and Hot-Air Dried-Apple Slices. *Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 56, no. 11, pp. 3047-3057. doi: 10.1007/s00231-020-02907-9
367. Tezcan, D., Sabancı, S., Cevik, M., Cokgezme, O. F., Icier, F. Infrared drying of dill leaves: Drying characteristics, temperature distributions, performance analyses and colour changes. *Food Science and Technology International*, 2020, vol. 27, no. 1, P. 32-45. doi:10.1177/1082013220929142
368. Topuz, F.C., Bakkalbasi, E., Aldemir, A., Javidipour, I. Drying kinetics and quality properties of Mellaki (*Pyrus communis L.*) pear slices dried in a novel vacuum-combined infrared oven. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, vol. 46, no. 10. Doi: 10.1111/jfpp.16866
369. Topuz F.C., Uğurlu S., Bakkalbaşi E. Comparison of a Novel Vacuum-Combined Infrared and Hot-Air Convection Methods for Drying of Deveci (Pyrus communis l.) Pear Slices. *Latin American Applied Research*, 2023, 53(4), 317–325. https://doi.org/10.52292/j.laar.2023.1200
370. Therien N., Statistical analysis of a continuous infrared dryer / N. Therien, B. Cote, A. D. Broadbent // *Textile Research Journal*. − 1991. − № 61. − P. 193–202.
371. Ugurlu, S., Bakkalbasi, E. A comparison of phenolic compounds, antioxidant activity, and α-glucosidase inhibitory activities of apple chips dried and fried by vacuum combined infrared radiation. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2024, vol. 18, no. 5, pp. 3783-3792. Doi: 10.1007/s11694-024-02453-6

372. Ul’ev, L. M. Heat and power integration of processes for the refinement of coking products / L. M. Ul’ev, M. A. Vasil’ev // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. − 2015. − № 49 (5). − P. 676−687.

373. Van Arsdel, W. B. Food Dehydration / W. B. Van Arsdel, M. J. Copley. − Vol. 2. − AVI Publishing, Westport, CT, 1973.

374. Vankatesh, M. S. An Overview of Microwave Processing and Dielectric Properties of Agri-food Materials / M. S. Vankatesh // *Biosystems Engineering*. – 2004. − № 88 (1). − P. 1–18. − doi: 10.1016/j.biosystemseng.2004.01.007.

375. Walstra P. Dairy Science and Technology / P. Walstra, P. Walstra, J. T. M. Wouters, T. J. Geurts. − CRC Press, 2005. – 808 p.

376. Wang D., Zhang M., Wang Y., Martynenko A. Effect of pulsed-spouted bed microwave freeze drying on quality of apple cuboids. *Food Bioprocess Technol*, 2018, 11(5):941–952. https://doi.org/10.1007/s11947-018-2061-1

377. Wang, Q., Li, S., Han, X., Ni, Y., Zhao, D., Hao, J. Quality evaluation and drying kinetics of shitake mushrooms dried by hot air, infrared and intermittent microwave–assisted drying methods. LWT, 2019. doi:10.1016/j.lwt.2019.03.020

378. Wang RF., Zhao D.H., Gao YP., Xu Q., Wu L., Li ZY. Power Control in Microwave Drying of Green Turnip. *Drying Technology*, 2022, vol. 40, no. 10, pp. 2153-2163. doi: 10.1080/07373937.2021.1927073

379. Wegelin M. Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments / M. Wegelin, S. Canonica, K. Mechsner, T. Fleischmann, F. Pesaro, A. Metzler // *J Water SRT−Aqua*. – 1994. − Vol. 43, № 3. − P. 154−169.

380. Wei Q., Huang J., Zhang Z., Lia D., Liu C., Xiao, Y., Lagnika C., Zhang M. Effects of Different Combined Drying Methods on Drying Uniformity and Quality of Dried Taro Slices. *Drying Technology*, 2019, vol. 37, no. 3, pp. 322-330. doi: 10.1080/07373937.2018.1445639

381. Weiss, W. Solar Heat Worldwide / W. Weiss, M. Spörk-Dür. − 2021. − Available online: https://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide (accessed on 10 January 2022).

382. Williams-Gardner, A. ‘‘Industrial Drying.’’ Chemical and Process Engineering Series / A. Williams-Gardner ; I. L. Hepner (series ed.). − London : Leonard Hill, 1971.

383. When Will Fossil Fuels Run Out? Octopus Energy. − Available online: https://octopus.energy/blog/when-will-fossil-fuels-runout/ (accessed on 10 April 2021).

384. Wu B., Guo X., Guo Y., Ma H., Zhou C. Enhancing Jackfruit Infrared Drying by Combining Ultrasound Treatments: Effect on Drying Characteristics, Quality Properties and Microstructure. *Food Chemistry*, 2021, 358, 129845. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129845

385. Wu Y.R., Mu R.Y., Li G.H., Li M.G., Lv W.Q. Research Progress in Fluid and Semifluid Microwave Heating Technology in Food Processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(4), 3436—3454. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12978

386. Wu, B., Pan, Z., Xu, B., Bai, J., El-Mashad, H. M., Wang, B., Zhou, C., Ma, H. Drying Performance and Product Quality of Sliced Carrots by Infrared Blanching Followed by Different Drying Methods. *International Journal of Food Engineering*, 2018, 14(5-6). doi:10.1515/ijfe-2017-0384

387. Xu H., Wu M., Wang Y., Wei W., Sun D., Li D., Zheng Z., Gao F. Effect of Combined Infrared and Hot Air Drying Strategies on the Quality of Chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) Cakes: Drying Behavior, Aroma Profiles and Phenolic Compounds. *Foods*, 2022, 11(15): 2240. https://doi.org/10.3390/foods11152240

388. Yamchi, A.A., Hosainpour, A., Hassanpour, A., Fanaei, A.R. Developing ultrasound-assisted infrared drying technology for bitter melon (*Momordica charantia*). *Journal of Food Process Engineering*, 2024, vol. 47, no. 1. Doi: 10.1111/jfpe.14516

389. Yang X.-B. A phosphotungstic acid coupled silica-Nafion composite membrane with significantly enhanced ion selectivity for vanadium redox flow battery / X.-B. Yang, L. Zhao, K. Goh [et al.] // *Journal of Energy Chemistry*. − 2019. № 41. − P. 177−184.

390. Yildiz G., Izli G. Influence of Microwave and Microwave-Convective Drying on the Drying Kinetics and Quality Characteristics of Pomelo. *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 43, no. 6. doi: 10.1111/jfpp.13812

391. Youngswatdigul, J. Microwave vacuum drying of cranberries. I. Energy use and efficiency / J. Youngswatdigul, S. Gunasekaran // *Food Process. Preservation*. − 1996. – 20 (2). − P. 121–143.

392. Yousefi S. Comparing the Effects of Microwave and Conventional Heating Methods on the Evaporation Rate and Quality Attributes of Pomegranate (Punica granatum L.) Juice Concentrate / Shima Yousefi, Zahra Emam-Djomeh, Sayed Mohammad Ali Mousavi, Gholam Reza Askari // *Food and Bioprocess Technology*. 2012. № 5. P. 1328–1339doi: 10.1007/s11947-011-0603-x

393. Zahoor, I., Khan, M.A. Microwave assisted convective drying of bitter gourd: drying kinetics and effect on ascorbic acid, total phenolics and antioxidant activity. *Food Measure*, 2019, **13**, 2481–2490. https://doi.org/10.1007/s11694-019-00168-7

394. Zahra N. Beta carotene determination in different vegetables by high performance liquid chromatography // Zahra, Naseem & Saeed, Khalid & Shahzad, Khurram & Firdous, Shamma & Ahmad, Ijaz & Tariq, Bukhtawar & Yaseen, Rabea // *Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry*. − 2022. − №23(1). P. 160-167. https://doi.org/10.21743/pjaec/2022.01.16

395. Zambon A. Supercritical CO2 drying of food matrices. IDS / A. Zambon [et al.] // *21st International Drying Symposium Proceedings. − Editorial Universitat Politècnica de València, 2018*. − P. 17−23.

396. Zielinska M., Zielinska D., Markowski M. The Effect of Microwave-Vacuum Pretreatment on the Drying Kinetics, Color and the Content of Bioactive Compounds in Osmo-Microwave-Vacuum Dried Cranberries (Vaccinium macrocarpon). *Food and Bioprocess Technology*, 2018, vol. 11, no 3, pp. 585-602. doi: 10.1007/s11947-017-2034-9

397. Zeng S.Y., Li M.G., Li G.H., Lv W.Q., Liao X.J., Wang L.J. Innovative Applications, Limitations and Prospects of Energy-Carrying Infrared Radiation, Microwave and

Radio Frequency in Agricultural Products Processing. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 121, 76—92. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.032

398. Zeng, S.Y., Wang, B., Zhao, D.L., Lv, W.Q. Microwave infrared vibrating bed drying of ginger: Drying qualities, microstructure and browning mechanism. *Food Chemistry*, 2023, vol. 424. Doi: 10.1016/j.foodchem.2023.136340
399. Zeng S.Y., Zhou C.S., Wang B., Xiao H.W., Lv W.Q. Microwave infrared cooperative drying of ginger: moisture evolution, structure change, physicochemical properties, and prediction model. *Food Bioprocess Technol*, 2024, **17**: 4632–4651. https://doi.org/10.1007/s11947-024-03403-2
400. Zhang B., Zheng A., Zhou L., Huang Z., Wang S. Developing hot air-assisted radio frequency drying for in-shell walnuts. *Emir J Food Agric*, 2017, 28(7):459–467. https://doi.org/10.9755/ejfa.2016-03-286
401. Zhang D., Huang D., Zhang Yi., Lu Yi., Huang Sh., Gong G., Li L. Ultrasonic Assisted Far Infrared Drying characteristics and Energy Consumption of Ginger Slices. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 92, 106287. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106287
402. Zhang Dy., Huang D., Zhang Xy., Zhao Hy., Gong Gl., Tang Xh., Li Lj. Drying Performance and Energy Consumption of Camellia Oleifera Seeds Under Microwave-Vacuum Drying. *Food Science and Biotechnology*, 2023. doi: 10.1007/s10068—022—01239—0
403. Zhang H., Gong C., Wang X., Liao M., Yue J., Jiao S. Application of hot air-assisted radio frequency as second stage drying method for mango slices. *J Food Process Eng*, 2019, 42(2):e12974. https://doi.org/10.1111/jfpe.12974
404. Zhang Yi., Lu Yi., Huang D., Zhao H., Huang Sh., Zhang L., Gong G., Li L. Infrared Drying Characteristics and Optimization of Ginseng. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 57, 104334. https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104334
405. Zhou S.C., Chen W.J., Fan K. Recent Advances in Combined Ultrasound and Microwave Treatment for Improving Food Processing Efficiency and Quality: A Review. *Food Bioscience*, 2024, 58, 103683. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103683

406. Zhou, L., Guo, X., Bi, J., Yi, J., Chen, Q., Wu, X., Zhou, M. Drying of Garlic Slices (*Allium Sativum L.*) and its Effect on Thiosulfinates, Total Phenolic Compounds and Antioxidant Activity During Infrared Drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2016, 41(1), e12734. doi:10.1111/jfpp.12734
407. Zhou X., Pedrow P.D., Tang Z., Bohnet S., Sablani S.S., Tang J. Heating performance of microwave ovens powered by magnetron and solid-state generators. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2023, 83:103240. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103240
408. Zhou X., Wang S. Recent developments in radio frequency drying of food and agricultural products: a review. *Dry Technol*, 2019, 37(3):271–286. https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1452255
409. Zhou, Y.-H., Staniszewska, I., Liu, Z.-L., Zielinska, D., Xiao, H.-W., Pan, Z., Nowak K.W., Zielinska, M. Microwave-vacuum-assisted drying of pretreated cranberries: Drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity. LWT, 2021, 146, 111464. doi:10.1016/j.lwt.2021.111464
410. Zhu K., Li L., Ren G., Duan X., Cao W., Qiu C. Efficient Production of Dried Whole Peanut Fruits Based on Infrared Assisted Spouted Bed Drying. *Foods*, 2021, 10(10), 2383. https://doi.org/10.3390/foods10102383
411. Zia, M.P., Alibas, I. Influence of the drying methods on color, vitamin C, anthocyanin, phenolic compounds, antioxidant activity, and in vitro bioaccessibility of blueberry fruits. *Food Biosci.* 2021, 42, 101179.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Конструктивный расчет СВЧ вакуум-выпарного модуля

Исходные данные к расчету

Температура кипения продукта

$$Tprk := 40\,°C$$

Давление в аппарате

$$Pcur := 0.074\,10^{5}\,Pa$$

Теплофизические свойства и константы

Теплота парообразования, при давлении в модуле

$$rvt := 2400\frac{kJ}{kg}$$

Плотность жидкой фазы в модуле

$$\rho lic := 1200\frac{kg}{m^3}$$

Удельный объем пара при давлении в модуле

$$vudp := 15.38\frac{m^3}{kg}$$

Средний диаметр капли

$$dkap := 0.0006m = 0.6\,mm$$

Плотность пара

$$\rho vap := \frac{1}{vudp} = 0.065\frac{kg}{m^3}$$

Действительная и мнимая диэлектрические проницаемости

$$\varepsilon 1 := 7$$

$$\varepsilon 2 := 10.9$$

Частота СВЧ излучения

$$fmw := 2.45GHz = 2.45 \times 10^{9} \frac{1}{s}$$

Скорость света в вакууме

$$c = 2.998 \times 10^{8} \frac{m}{s}$$

Опорная величина давления

$$P0 := 5kPa$$

Теплота парообразования ацетона (опорная величина)

$$R0 := 525 \frac{kJ}{kg}$$

Паронапряженность паровой камеры сепаратора при атмосферном давлении

$$Watm := 1000 \frac{kg}{m^3 \cdot hr} = 0.278 \frac{kg}{m^3 \cdot s}$$

Поправка паронапряженности на давление в аппарате.

$$f2 := 0.8_8$$

Максимальная скорость пара в сепараторе

$$wp := 2 \frac{m}{s}$$

Расчет чисел подобия

Число энергетического действия

$$Px := \frac{Pcur}{P0} = 1.48$$

$$Rx := \frac{rvt}{R0} = 4.571$$

$$Bu := 1.73 Px^{0.35} \cdot Rx^{-0.2} = 1.464$$

Напряженность парового пространства

$$W0 := Watm \cdot f2 = 0.222 \frac{kg}{m^3 \cdot s}$$

Определение минимальных размеров модуля

Магнетроны с воздушным охлаждением выпускаются номинальной мощностью от 600 до 3000 В т. (400–15000 грн) стоимость резко возрастает на 2 кВт

Установочная мощность

для 700 Вт магнетрона для 1100 Вт магнетрона

$$Nm := 700W \qquad Nm2 := 1100W$$

тогда интенсивность парообразования при данных условиях будет

для 1100 Вт магнетрона

$$Wvtp := \frac{Nm}{Bu \cdot rvt} = 1.992 \times 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

$$Wvtp = 0.717 \frac{kg}{hr}$$

для 700 Вт магнетрона

$$Wvtp2 := \frac{Nm2}{Bu \cdot rvt} = 3.13 \times 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

$$Wvtp2 = 1.127 \frac{kg}{hr}$$

Учитывая глубину проникновения dp, которая при частоте излучения составит

$$fmw = 2.45GHz$$

$$\lambda mw := \frac{c}{fmw} = 122.364mm$$

$$dp := \frac{\lambda mw \cdot \sqrt{\varepsilon 1}}{2\pi \cdot \varepsilon 2} = 15.576mm$$

Размеры модуля лимитируются необходимостью поддержания уровня жидкой фазы над точкой ввода излучения не менее dp и размерами парового сепаратора при напряженности парового пространства

$$W0 = 0.222\frac{kg}{m^3 \cdot s}$$

минимальный объем сепаратора

для 700 Вт магнетрона для 1100 Вт магнетрона

$$Vsep1 := \frac{Wvtp}{W0} = 0.896L \qquad Vsep2 := \frac{Wvtp2}{W0} = 1.409L$$

а минимальный диаметр сепаратора

$$Dsep1 := \sqrt{\frac{Wvtp \cdot vudp}{wp \cdot 0.785}} \qquad Dsep2 := \sqrt{\frac{Wvtp2 \cdot vudp}{wp \cdot 0.785}} = 55.374mm$$

$$Dsep1 = 44.173mm$$

При диаметре модуля 150 мм высота парового пространства составит 51 мм и 80 мм

$$Hsep1 := \frac{4Vsep1}{\pi \cdot Dsepu^2} = 50.722mm \qquad Hsep2 := \frac{4Vsep2}{\pi \cdot Dsepu^2} = 79.707mm$$

а скорость пара

$$wvap1 := \frac{4Wvtp \cdot vudp}{\pi \cdot Dsepu^2} = 0.173\frac{m}{s} \qquad wvap2 := \frac{4Wvtp2 \cdot vudp}{\pi \cdot Dsepu^2} = 0.272\frac{m}{s}$$

что меньше скорости витания

$$wvit1 := \sqrt{\frac{4g \cdot (\rho lic - \rho vap) \cdot dkap}{3\xi 1x \cdot \rho vap}} = 1.952\frac{m}{s}$$

$$\xi 1x := 3\varepsilon$$

при числе Рейонльдса для капли

$$Rekap1 := \frac{wvap1 \cdot dkap \cdot \rho vap}{\mu vap} = 0.639 \qquad Rekap2 := \frac{wvap2 \cdot dkap \cdot \rho vap}{\mu vap} = 1.004$$

коэффициент сопротивления равен

$$\xi 12 := \frac{24}{Rekap1} = 37.567 \qquad \xi 13 := \frac{24}{Rekap2} = 23.906$$

Высота рабочей части модуля составит 114 мм и 140 мм соответственно

Общая высота модуля – 150 мм

При диаметре модуля 100 мм выота парового пространства составит

$$Dsepu2 := 100mm$$

$$Hsep12 := \frac{4Vsep1}{\pi \cdot Dsepu2^2} = 114.125mm \qquad Hsep22 := \frac{4Vsep2}{\pi \cdot Dsepu2^2} = 179.34mm$$

а скорость пара

$$wvap3 := \frac{4Wvtp \cdot vudp}{\pi \cdot Dsepu2^2} = 0.39\frac{m}{s} \qquad wvap4 := \frac{4Wvtp2 \cdot vudp}{\pi \cdot Dsepu2^2} = 0.613\frac{m}{s}$$

Высота рабочей части модуля составит 175 мм и 240 мм соответственно

Общая высота модуля – 250 мм

для 2000 Вт магнетрона для 3000 Вт магнетрона

$$Nm3 := 2000W \qquad Nm4 := 3000W$$

Тогда интенсивность парообразования при данных условиях будет

для 2000 Вт магнетрона для 3000 Вт магнетрона

$$Wvtp3 := \frac{Nm3}{Bu \cdot rvt} = 5.691 \times 10^{-4}\frac{kg}{s} \qquad Wvtp4 := \frac{Nm4}{Bu \cdot rvt} = 8.537 \times 10^{-4}\frac{kg}{s}$$

$$Wvtp3 = 2.049\frac{kg}{hr} \qquad Wvtp4 = 3.073\frac{kg}{hr}$$

Минимальный объем сепаратора

$$Vsep3 := \frac{Wvtp3}{W0} = 2.561L \quad Vsep4 := \frac{Wvtp4}{W0} = 3.841L$$

а минимальный диаметр сепаратора

$$Dsep3 := \sqrt{\frac{Wvtp3 \cdot vudp}{wp \cdot 0.785}} = 74.666mm \qquad Dsep4 := \sqrt{\frac{Wvtp4 \cdot vudp}{wp \cdot 0.785}} = 91.447mm$$

При диаметре модуля 150 мм высота праового пространства составит

$$Hsep3 := \frac{4Vsep3}{\pi \cdot Dsepu^2} = 144.921mm \qquad Hsep4 := \frac{4Vsep4}{\pi \cdot Dsepu^2} = 217.382mm$$

Высота рабочей части модуля составит 205 мм и 280 мм соответственно

При диаметре модуля 200 мм высота парового пространства составит

$$Dsepu := 200mm$$

$$Hsep3 := \frac{4Vsep3}{\pi \cdot Dsepu^2} = 81.518mm \qquad Hsep4 := \frac{4Vsep4}{\pi \cdot Dsepu^2} = 122.277mm$$

Высота рабочей части модуля составит 145 мм и 185 мм соответственно

для 900 Вт магнетрона для 1000 Вт магнетрона

$$Nm5 := 900W \quad Nm6 := 1000W$$

Тогда интенсивность парообразования при данных условиях будет

для 900 Вт магнетрона для 1000 Вт магнетрона

$$Wvtp5 := \frac{Nm5}{Bu \cdot rvt} = 2.561 \times 10^{-4} \frac{kg}{s} \qquad Wvtp6 := \frac{Nm6}{Bu \cdot rvt} = 2.846 \times 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

$$Wvtp5 = 0.922 \frac{kg}{hr} \quad Wvtp6 = 1.024 \frac{kg}{hr}$$

Минимальный объем сепаратора

$$Vsep5 := \frac{Wvtp5}{W0} = 1.152L \qquad Vsep6 := \frac{Wvtp6}{W0} = 1.28L$$

А минимальный диаметр сепаратора

$$Dsep5 := \sqrt{\frac{Wvtp5 \cdot vudp}{wp \cdot 0.785}} = 50.088mm \qquad Dsep6 := \sqrt{\frac{Wvtp6 \cdot vudp}{wp \cdot 0.785}} = 52.797mm$$

При диаметре модуля 150 мм высота парового пространства составит

$$Dsepu := 150mm$$

$$Hsep5 := \frac{4Vsep5}{\pi \cdot Dsepu^2} = 65.214mm \qquad Hsep6 := \frac{4Vsep6}{\pi \cdot Dsepu^2} = 72.461mm$$

Высота рабочей части модуля составит 125 мм и 135 мм соответственно

При диаметре модуля 100 мм высота парового пространства составит

$$Dsepu := 100mm$$

$$Hsep51 := \frac{4Vsep5}{\pi \cdot Dsepu^2} = 146.733mm \qquad Hsep62 := \frac{4Vsep6}{\pi \cdot Dsepu^2}$$

$$Hsep62 = 163.036mm$$

Высота рабочей части модуля составит 210 мм и 225 мм соответственно

Производительность модуля по сырью составит

$$Gx = \frac{Wx \cdot bx}{bx - ax}$$

где ax – начальная концентрация с.в.

bx – конечно концентрация с.в.

Обозначив коэффициент концентрирования kk как

$$kk = \frac{bx}{ax}$$

получим

$$Gx = \frac{Wx \cdot bx}{bx - \frac{bx}{kk}} \text{ simplify } \rightarrow Gx = \frac{Wx \cdot kk}{kk - 1}$$

Тогда производительность одного модуля в зависимости от kk будет

для 700 Вт магнетрона

$$i := 0 .. 13$$

$$kk_i := 1.5 + 0.5 \cdot i$$

$$Gx_i := \frac{Wvtp \cdot kk_i}{kk_i - 1}$$

$$Gk_i := Gx_i - Wvtp$$

для 2000 Вт

$$Wvtp3 := \frac{Nm3}{Bu \cdot rvt}$$

$$Wvtp4 := \frac{Nm4}{Bu \cdot rvt}$$

$$Gx3_i := \frac{Wvtp3 \cdot kk_i}{kk_i - 1}$$

$$Gk3_i := Gx3_i - Wvtp3$$

$$Gx4_i := \frac{Wvtp4 \cdot kk_i}{kk_i - 1}$$

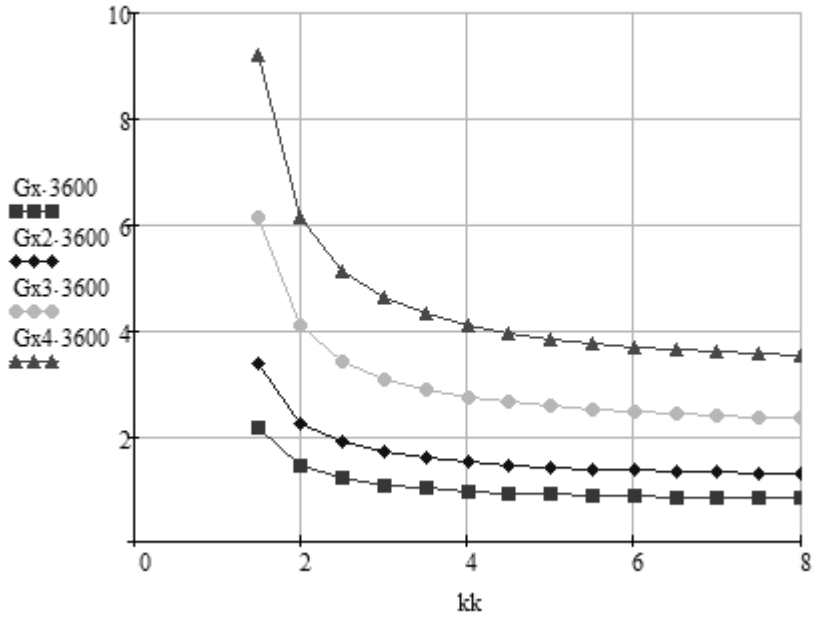
$$Gk4_i := Gx4_i - Wvtp4$$

для 1100 Вт

$$Gx2_i := \frac{Wvtp2 \cdot kk_i}{kk_i - 1}$$

$$Gk2_i := Gx2_i - Wvtp2$$

для 3000 Вт

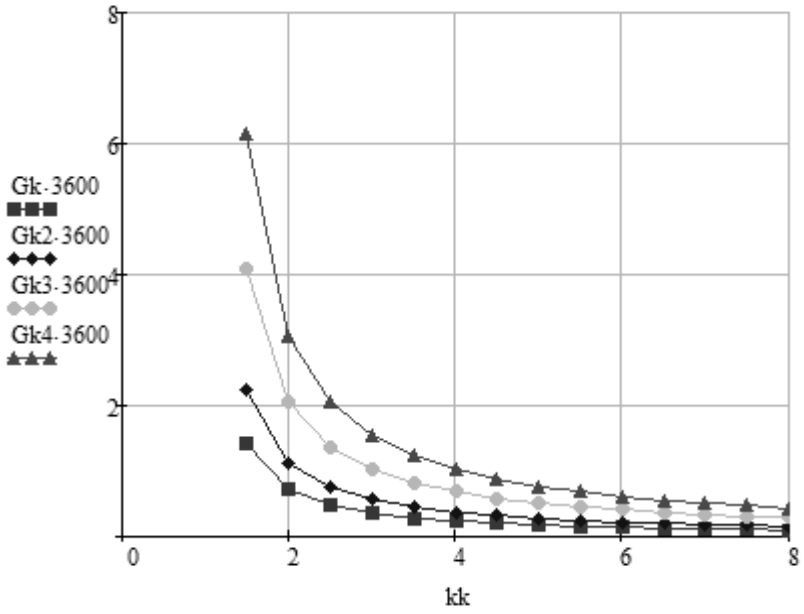


$$Gx_0 = 2.151 \frac{kg}{hr}$$

$$Gx_{13} = 0.82 \frac{kg}{hr}$$

$$Gx2_0 = 3.38 \frac{kg}{hr}$$

$$Gx2_{13} = 1.288 \frac{kg}{hr}$$



для 900 Вт

$$Gx5_i := \frac{Wvtp5 \cdot kk_i}{kk_i - 1}$$

$$Gk5_i := Gx5_i - Wvtp5$$

$$Gx6_i := \frac{Wvtp6 \cdot kk_i}{kk_i - 1}$$

$$Gk6_i := Gx6_i - Wvtp6$$

для 1000 Вт

$$Gk5_0 = 1.844\frac{kg}{hr}$$

$$Gk5_{13} = 0.132\frac{kg}{hr}$$

$$Gk6_0 = 2.049\frac{kg}{hr}$$

$$Gk6_{13} = 0.146\frac{kg}{hr}$$

$$Gx5_0 = 2.766\frac{kg}{hr}$$

$$Gx5_{13} = 1.054\,\frac{kg}{hr}$$

$$Gx6_{0} = 3.073\,\frac{kg}{hr}$$

$$Gx6_{13} = 1.171\,\frac{kg}{hr}$$

$$Gk1000min := Gk6_{0}$$

$$Gk1000max := Gk6_{13}$$

$$Gx1000min := Gx6_{0}$$

$$Gx1000max := Gx6_{13}$$

диаметр подводящего трубопровода

$$dtrp := \sqrt{\frac{4\,Gx_{0}}{\pi \cdot \rho lic1\,\frac{m}{s}}} = 0.796mm$$

диаметр паропровода

$$dpp := \sqrt{\frac{4\,Gx_{0}}{\pi \cdot \rho vap\,10\,\frac{m}{s}}} = 34.208mm$$

Параметры производительности модуля при работе в качестве финишной стадии концентрирования при низких значениях kk

$$i := 0..13$$

$$\frac{8}{6} = 1.333$$

$$kk_{i} := 1.1 + 0.03 \cdot i$$

$$Gx6_{i} := \frac{Wvtp6 \cdot kk_{i}}{kk_{i} - 1}$$

$$Gx_{i} := \frac{Wvtp \cdot kk_{i}}{kk_{i} - 1}$$

$$Gx5_{i} := \frac{Wvtp5 \cdot kk_{i}}{kk_{i} - 1}$$

$$Gk_{i} := Gx_{i} - Wvtp$$

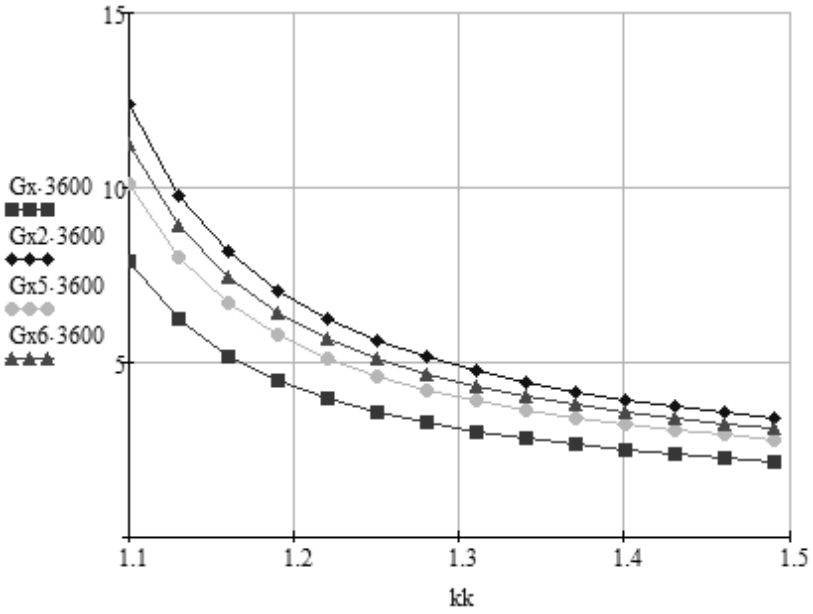
$$Gk6_i := Gx6_i - Wvtp6$$

$$Gk5_i := Gx5_i - Wvtp5$$

$$Gx2_i := \frac{Wvtp2 \cdot kk_i}{kk_i - 1}$$

$$Gk2_i := Gx2_i - Wvtp2$$

$$\frac{Gx_{13}}{Gk_{13}} = 1.49$$



$$Gk_0 = 7.171 \cdot \frac{kg}{hr}$$

$$Gk_{13} = 1.463 \frac{kg}{hr}$$

$$Gk2_0 = 11.268 \frac{kg}{hr}$$

$$Gk2_{13} = 2.3 \cdot \frac{kg}{hr}$$

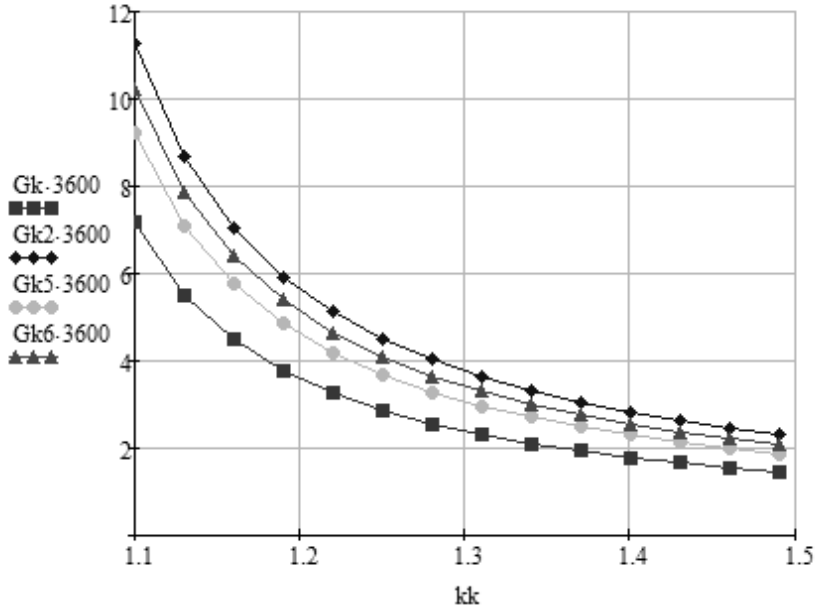
$$Gk5_0 = 9.219 \frac{kg}{hr}$$

$$Gk5_{13} = 1.882 \frac{kg}{hr}$$

$$Gk6_0 = 10.244\frac{kg}{hr}$$

$$Gk6_{13} = 2.091\cdot\frac{kg}{hr}$$

$$kk_{13} = 1.49$$



Экономическая часть

Увеличение установочной мощности в 2 раза с 1000 до 2000 Вт ведет 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.

Количество продукта в модуле и максимальное время цикла для модуля периодического действия

Минимальный уровень жидкости в модуле

$$Hmin := 60mm$$

Модуль диаметром 100 мм и высотой 250 мм

Минимальный объем продукта в модуле

$$Vprmin1 := \frac{\pi\cdot dm1^2}{4}\cdot Hmin = 0.471L$$

700Вт

Максимальный объем продукта в модуле

$$Vprmax1 := \frac{\pi \cdot dm1^2}{4} \cdot (Hm1 - Hsep12) = 1.067L$$

Максимальное время концентрирования

$$\tau max1 := \frac{(Vprmax1 - Vprmin1) \cdot \rho lic}{Wvtp} = 0.997 \cdot hr$$

Максимальный коэффициент концентрирования при периодическом процессе

$$kk1max1 := \frac{Vprmax1}{Vprmin1} = 2.265$$

900Вт

Максимальный объем продукта в модуле

$$Vprmax11 := \frac{\pi \cdot dm1^2}{4} \cdot (Hm1 - Hsep51) = 0.811L$$

Максимальное время концентрирования

$$\tau max11 := \frac{(Vprmax11 - Vprmin1) \cdot \rho lic}{Wvtp5} = 0.442 \cdot hr$$

Максимальный коэффициент концентрирования при периодическом процессе

$$kk1max11 := \frac{Vprmax11}{Vprmin1} = 1.721$$

1000Вт

Максимальный объем продукта в модуле

$$Vprmax12 := \frac{\pi \cdot dm1^2}{4} \cdot (Hm1 - Hsep62) = 0.683L$$

Максимальное время концентрирования

$$\tau max12 := \frac{(Vprmax12 - Vprmin1) \cdot \rho lic}{Wvtp6} = 0.248 \cdot hr$$

Максимальный коэффициент концентрирования при периодическом процессе

$$kk1max12 := \frac{Vprmax12}{Vprmin1} = 1.449$$

1100Вт

Максимальный объем продукта в модуле

$$Vprmax13 := \frac{\pi \cdot dm1^2}{4} \cdot (Hm1 - Hsep22) = 0.555L$$

Максимальное время концентрирования

$$\tau max13 := \frac{(Vprmax13 - Vprmin1) \cdot \rho lic}{Wvtp2} = 0.089hr$$

Максимальный коэффициент концентрирования при периодическом процессе

$$kk1max13 := \frac{Vprmax13}{Vprmin1} = 1.178$$

Модуль диаметром 100 мм и высотой 450 мм

d=100 mm H=450

для пенящихся продуктов и уст. период. действия

$$dm2 := 100mm$$

$$Hm2 := 450mm$$

Минимальный объем продукта в модуле

$$Vprmin2 := \frac{\pi \cdot dm2^2}{4} \cdot Hmin = 0.471L$$

700Вт

Максимальный объем продукта в модуле

$$Vprmax20 := \frac{\pi \cdot dm2^2}{4} \cdot (Hm2 - Hsep12) = 2.638L$$

Максимальное время концентрирования

$$\tau max20 := \frac{(Vprmax20 - Vprmin2) \cdot \rho lic}{Wvtp} = 3.626hr$$

Максимальный коэффициент концентрирования при периодическом процессе

$$kk1max20 := \frac{Vprmax20}{Vprmin2} = 5.598$$

900Вт

Максимальный объем продукта в модуле

$$Vprmax21 := \frac{\pi \cdot dm2^2}{4} \cdot (Hm2 - Hsep51) = 2.382\,L$$

Максимальное время концентрирования

$$\tau max21 := \frac{(Vprmax21 - Vprmin2) \cdot \rho lic}{Wvtp5} = 2.487\,hr$$

Максимальный коэффициент концентрирования при периодическом процессе

$$kk1max21 := \frac{Vprmax21}{Vprmin2} = 5.054$$

1000 Вт

Максимальный объем продукта в модуле

$$Vprmax22 := \frac{\pi \cdot dm2^2}{4} \cdot (Hm2 - Hsep62) = 2.254\,L$$

Максимальное время концентрирования

$$\tau max22 := \frac{(Vprmax22 - Vprmin2) \cdot \rho lic}{Wvtp6} = 2.088\,hr$$

Максимальный коэффициент концентрирования при периодическом процессе

$$kk1max22 := \frac{Vprmax22}{Vprmin2} = 4.783$$

1100 Вт

Максимальный объем продукта в модуле

$$Vprmax23 := \frac{\pi \cdot dm2^2}{4} \cdot (Hm2 - Hsep22) = 2.126\,L$$

Максимальное время концентрирования

$$\tau max23 := \frac{(Vprmax23 - Vprmin2) \cdot \rho lic}{Wvtp2} = 1.762\,hr$$

Максимальный коэффициент концентрирования при периодическом процессе

$$kk1max23 := \frac{Vprmax23}{Vprmin2} = 4.511$$

Модуль диаметром 150 мм и высотой 150 мм

d=150 mm H=150

$$dm3 := 150mm$$

$$Hm3 := 150mm$$

Минимальный объем продукта в модуле

$$Vprmin3 := \frac{\pi \cdot dm3^2}{4} \cdot Hmin = 1.06L$$

700Вт

Максимальный объем продукта в модуле

$$Vprmax30 := \frac{\pi \cdot dm3^2}{4} \cdot (Hm3 - Hsep1) = 1.754L$$

Максимальное время концентрирования

$$\tau max30 := \frac{(Vprmax30 - Vprmin3) \cdot \rho lic}{Wvtp} = 1.162 \cdot hr$$

Максимальный коэффициент концентрирования при периодическом процессе

$$kk1max30 := \frac{Vprmax30}{Vprmin3} = 1.655$$

900Вт

Максимальный объем продукта в модуле

$$Vprmax31 := \frac{\pi \cdot dm3^2}{4} \cdot (Hm3 - Hsep5) = 1.498L$$

Максимальное время концентрирования

$$\tau max31 := \frac{(Vprmax31 - Vprmin3) \cdot \rho lic}{Wvtp5} = 0.57 \cdot hr$$

Максимальный коэффициент концентрирования при периодическом процессе

$$kk1max31 := \frac{Vprmax31}{Vprmin3} = 1.413$$

1000Вт

Максимальный объем продукта в модуле

$$Vprmax32 := \frac{\pi \cdot dm3^2}{4} \cdot (Hm3 - Hsep6) = 1.37L$$

Максимальное время концентрирования

$$\tau max32 := \frac{(Vprmax32 - Vprmin3) \cdot \rho lic}{Wvtp6} = 0.363hr$$

Максимальный коэффициент концентрирования при периодическом процессе

$$kk1max32 := \frac{Vprmax32}{Vprmin3} = 1.292$$

1100Вт

Максимальный объем продукта в модуле

$$Vprmax33 := \frac{\pi \cdot dm3^2}{4} \cdot (Hm3 - Hsep2) = 1.242L$$

Максимальное время концентрирования

$$\tau max33 := \frac{(Vprmax33 - Vprmin3) \cdot \rho lic}{Wvtp2} = 0.194hr$$

Максимальный коэффициент концентрирования при периодическом процессе

$$kk1max33 := \frac{Vprmax33}{Vprmin3} = 1.172$$

Модуль диаметром 150 мм и высотой 300 мм

d=150 mm H=300

$$dm4 := 150mm$$

$$Hm4 := 300mm$$

Минимальный объем продукта в модуле

$$Vprmin4 := \frac{\pi \cdot dm4^2}{4} \cdot Hmin = 1.06L$$

700Вт

Максимальный объем продукта в модуле

$$Vprmax40 := \frac{\pi \cdot dm4^2}{4} \cdot (Hm4 - Hsep1) = 4.405L$$

Максимальное время концентрирования

$$\tau max40 := \frac{(Vprmax40 - Vprmin4)\cdot \rho lic}{Wvtp} = 5.597\cdot hr$$

Максимальный коэффициент концентрирования при периодическом процессе

$$kk1max40 := \frac{Vprmax40}{Vprmin4} = 4.155$$

900Вт

Максимальный объем продукта в модуле

$$Vprmax41 := \frac{\pi \cdot dm4^2}{4}\cdot (Hm4 - Hsep5) = 4.149L$$

Максимальное время концентрирования

$$\tau max41 := \frac{(Vprmax41 - Vprmin4)\cdot \rho lic}{Wvtp5} = 4.02\cdot hr$$

Максимальный коэффициент концентрирования при периодическом процессе

$$kk1max41 := \frac{Vprmax41}{Vprmin4} = 3.913$$

1000Вт

Максимальный объем продукта в модуле

$$Vprmax42 := \frac{\pi \cdot dm4^2}{4}\cdot (Hm4 - Hsep6) = 4.021L$$

Максимальное время концентрирования

$$\tau max42 := \frac{(Vprmax42 - Vprmin4)\cdot \rho lic}{Wvtp6} = 3.468hr$$

Максимальный коэффициент концентрирования при периодическом процессе

$$kk1max42 := \frac{Vprmax42}{Vprmin4} = 3.792$$

1100Вт

Максимальный объем продукта в модуле

$$Vprmax43 := \frac{\pi \cdot dm4^2}{4}\cdot (Hm4 - Hsep2) = 3.893L$$

Максимальное время концентрирования

$$\tau max43 := \frac{(Vprmax43 - Vprmin4)\cdot \rho lic}{Wvtp2} = 3.017\,hr$$

Максимальный коэффициент концентрирования при периодическом процессе

$$kk1max43 := \frac{Vprmax43}{Vprmin4} = 3.672$$

2000Вт

Максимальный объем продукта в модуле

$$Vprmax44 := \frac{\pi \cdot dm4^2}{4}\cdot(Hm4 - Hsep3) = 3.861\,L$$

Максимальное время концентрирования

$$\tau max44 := \frac{(Vprmax44 - Vprmin4)\cdot \rho lic}{Wvtp3} = 1.64\,hr$$

Максимальный коэффициент концентрирования при периодическом процессе

$$kk1max44 := \frac{Vprmax44}{Vprmin4} = 3.641$$

3000Вт

Максимальный объем продукта в модуле

$$Vprmax45 := \frac{\pi \cdot dm4^2}{4}\cdot(Hm4 - Hsep4) = 3.141\,L$$

Максимальное время концентрирования

$$\tau max45 := \frac{(Vprmax45 - Vprmin4)\cdot \rho lic}{Wvtp4} = 0.812\,hr$$

Максимальный коэффициент концентрирования при периодическом процессе

$$kk1max45 := \frac{Vprmax45}{Vprmin4} = 2.962$$

Приложение Б

Зависимость допустимой скорости пара от абсолютного давления

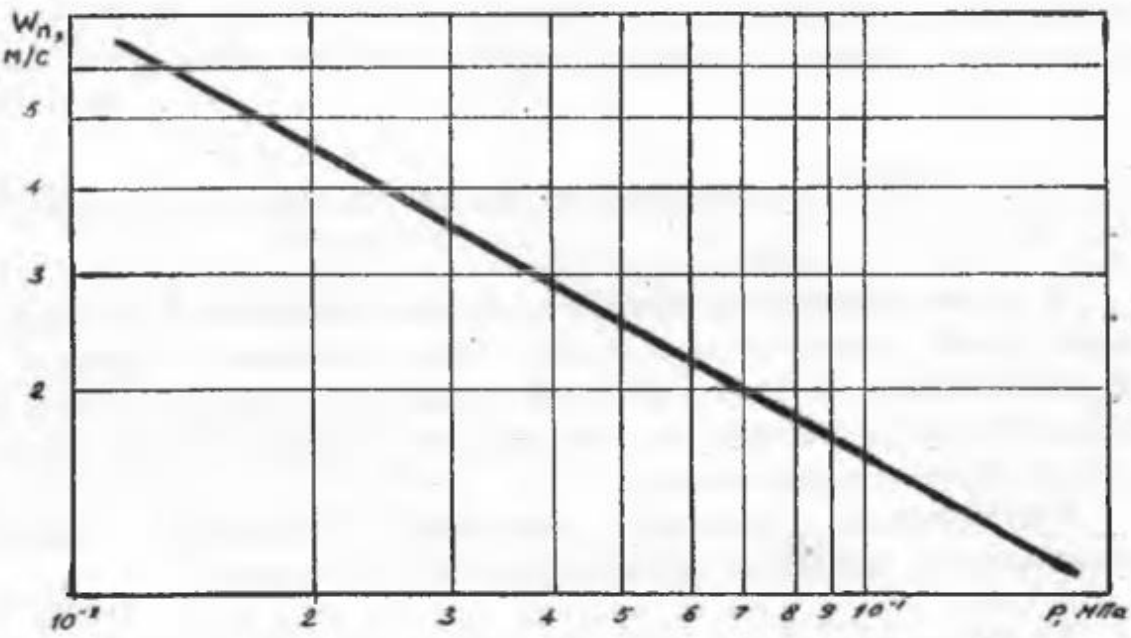


Рисунок 4.2 – Зависимость допустимой скорости пара $W_п$ (в м/с) сепараторе от абсолютного давления

Таблица 4.1 - Значения - f_1 в зависимости от давления

Абсолютное давление, МПа	0,04	0,06	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40
f_1	0,85	0,87	0,92	1,00	1,35	1,70	2,05	2,40	3,10

Приложение В

Определение паросодержания по высоте модуля

(Расчет в программе Mathcad)

$kJ := 1000J$

$\rho vap := \frac{1}{vudp} = 0.065\frac{kg}{m^3}$

$rvt := 2400\frac{kJ}{kg}$

$\sigma l := 69.56\,10^{-3}\cdot\frac{N}{m}$

$Mml := Vml\cdot\rho l = 1.06kg$

температура кипения и перегрев

Паропроизводительность модуля

$Wvtp := 0.615\frac{kg}{hr}$

$Wvtp = 1.708\times 10^{-4}\frac{kg}{s}$

р а з м е р ы м о д у л я

$Dm := 150mm$

$Hl := 60mm$

$Vml := \frac{\pi\cdot Dm^2}{4}\cdot Hl = 1.06L$

с в о й с т в а в о д ы и п а р а

$vudp := 15.38\frac{m^3}{kg}$

$\rho l := 1000\frac{kg}{m^3}$

$\lambda l := 0.635\frac{W}{m\cdot K}$

$cp := 4174\frac{J}{kg\cdot K}$

$al := 15.3 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{m^2}{s}$

$a = \frac{\lambda}{cp \cdot \rho l}$

$\frac{\lambda l}{cp \cdot \rho l} = 1.521 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$

$\mu l := 653 \cdot 10^{-6} \cdot Pa \cdot s$

с к о р о с т ь р о с т а п а р о в о г о п у з ы р ь к а

$Tk := 40°C$

$Tk = 313.15K$

$\Delta t := 5K$

$\frac{dR}{d\tau} = \beta 1 \cdot \frac{a}{R} \cdot Ja^2$

$Ja = \frac{cp \cdot \Delta t}{rv} \cdot \frac{\rho l}{\rho vap}$

$Ja := \frac{cp \cdot \Delta t}{rvt} \cdot \frac{\rho l}{\rho vap} = 133.742$

$\beta 1 = 0.3 .. 2$

$RdR = \beta 1 \cdot a \cdot Ja^2 d\tau$

$\frac{1}{2} R^2 + R0 = \beta 1 \cdot a \cdot Ja^2 \cdot \tau + \tau 0$

$R = \sqrt{2} \sqrt{R0^2 + \beta 1 \cdot a \cdot Ja^2 \cdot \tau}$ радиус парового пузырька

$dpmin := \frac{4Tk \cdot \sigma l}{\rho vap \cdot rvt \cdot \Delta t} = 1.117 \times 10^{-4} m$

$Rpmin := \frac{dpmin}{2} = 5.584 \times 10^{-5} m$

$imax := 592$

$i := 1 .. imax$

$\beta 1 := 1$

$d\tau 0 := 10^{-9} s$

$d\tau_i := d\tau 0 \cdot (i)^2$

$R_{i+1} = R_i + dR = R_i + \beta 1 \cdot \frac{a}{R_i} \cdot Ja^2 \cdot d\tau$

$\tau_i := i \cdot d\tau_i$

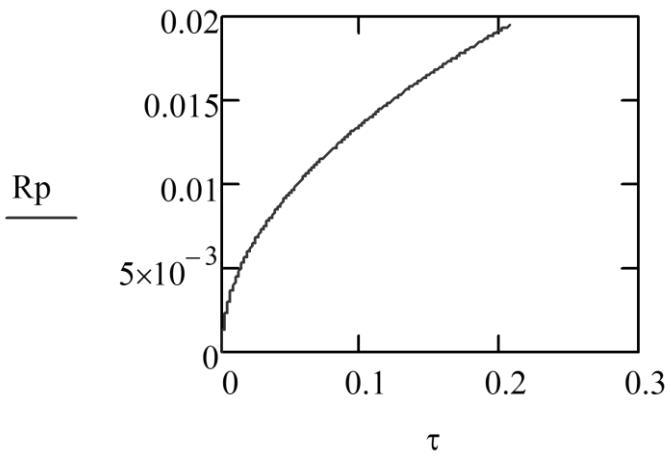
$Hl2_0 := 0m$

$Rp_0 := 0.056mm$

$\tau_0 := 0s$

$Rp_0 = 5.6 \times 10^{-5}\,m$

$Rp_i := Rp_{i-1} + \beta 1 \cdot \frac{al}{Rp_{i-1}} \cdot Ja^2 \cdot d\tau_i$



$dkap_i := 2Rp_i$

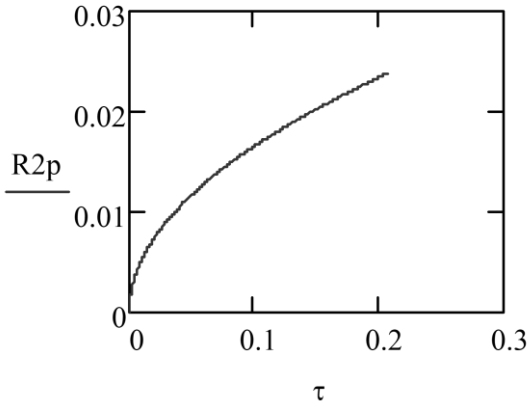
$Arp_i := \frac{(dkap_i)^3 \cdot g \cdot \rho l}{\mu l^2} \cdot (\rho l - \rho vap)$

Вариант обобщенного уравнения

$R2p_i := \sqrt{(Rp_0)^2 + \beta 1 \cdot al \cdot Ja^2 \cdot \tau_i}$

$Ar2(\tau) := \frac{8 \cdot \left[\sqrt{(Rp_0)^2 + \beta 1 \cdot al \cdot Ja^2 \cdot \tau}\right]^3 \cdot g \cdot \rho l}{\mu l^2} \cdot (\rho l - \rho vap)$

$Rp2(\tau) := \sqrt{(Rp_0)^2 + \beta 1 \cdot al \cdot Ja^2 \cdot \tau}$



скоростьдвиженияпузырька

$$wp2_i := \begin{cases} \dfrac{g\cdot\left(2\,Rp_i\right)^2\cdot(\rho l-\rho vap)}{18\cdot\mu l} & \text{if } Arp_i < 36 \\ 5.46\,\dfrac{m^{0.5}}{s}\sqrt{dkap_i\cdot\dfrac{(\rho l-\rho vap)}{\rho l}} & \text{if } Arp_i > 83000 \\ \dfrac{0.78\,\dfrac{m^{0.72}}{s^{1.43}}\cdot\left(dkap_i\right)^{1.14}\cdot(\rho l-\rho vap)^{0.715}}{\rho l^{0.285}\cdot\mu l^{0.43}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Todes equation

$$Re = \frac{Ar}{18+0.575\sqrt{Ar}}$$

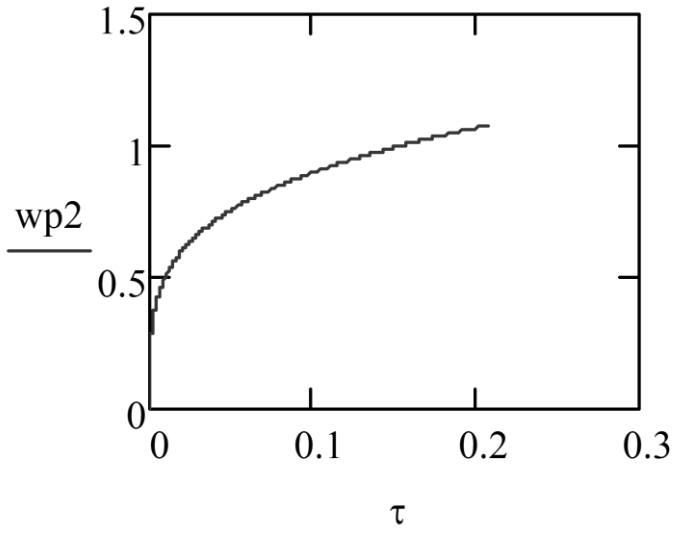
$$wp2 = \frac{Re\cdot\mu}{d\cdot\rho}$$

$$Re2(\tau) := \frac{\dfrac{8\cdot\left[\sqrt{\left(Rp_0\right)^2+\beta1\cdot al\cdot Ja^2\cdot\tau}\right]^3\cdot g\cdot\rho l}{\mu l^2}\cdot(\rho l-\rho vap)}{18+0.575\sqrt{\dfrac{8\cdot\left[\sqrt{\left(Rp_0\right)^2+\beta1\cdot al\cdot Ja^2\cdot\tau}\right]^3\cdot g\cdot\rho l}{\mu l^2}\cdot(\rho l-\rho vap)}}$$

$$wp(\tau) = \frac{4\cdot\left[\sqrt{\left(Rp_0\right)^2+\beta1\cdot a\cdot Ja^2\cdot\tau}\right]^2\cdot g\cdot\left(\rho_{lic}-\rho_{vap}\right)}{\left[18\cdot\mu_{lic}+0.575\sqrt{\left[8\cdot\left[\sqrt{\left(Rp_0\right)^2+\beta1\cdot a\cdot Ja^2\cdot\tau}\right]^3\cdot g\cdot\rho_{lic}\right]\cdot\left(\rho_{lic}-\rho_{vap}\right)}\right]}$$

паропроизводительность пузырька

число пузырьков в смеси



$Hl2_i := Hl2_{i-1} + wp2_i \cdot d\tau_i$

$Hl2_{imax} = 59.864\,mm$

$\tau_{imax} = 0.207\,s$

$dkap_{imax} = 38.998\,mm$

$i23 := 53$

$i13 := 45$

$Hl2_{i23} = 42.131\,mm$

$Hl2_{i13} = 21.974\,mm$

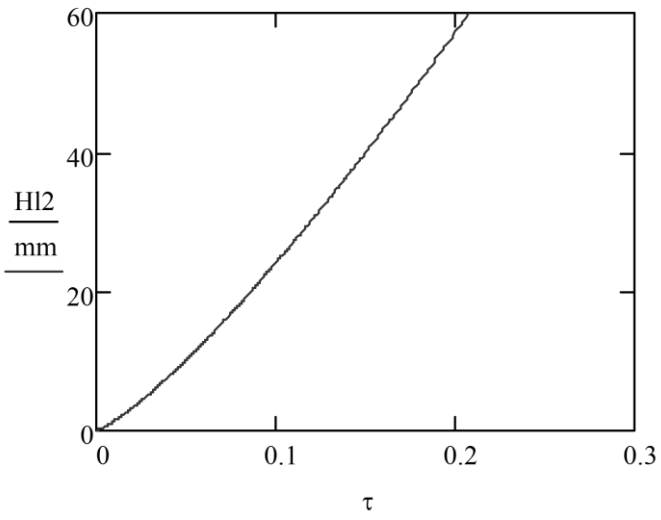
$\tau_{i23} = 0.157\,s$

$\tau_{i13} = 0.093\,s$

$dkap_{i23} = 33.887\,mm$

$dkap_{i13} = 26.122\,mm$

$Vp_i := \frac{4}{3}\pi \cdot \left(Rp_i\right)^3$



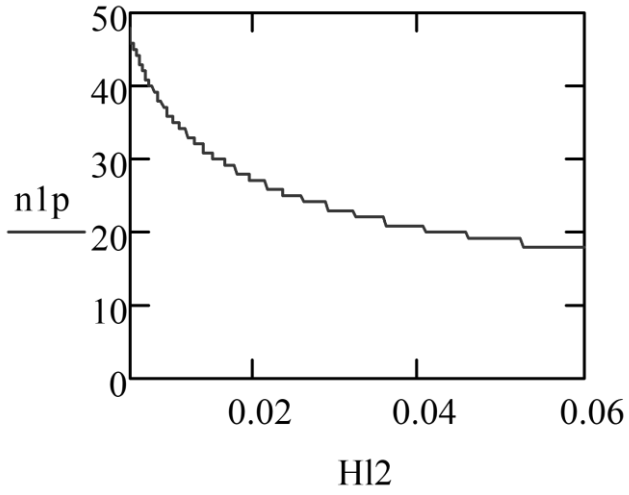
$Vp_0 = 0\,L$

$G1p_i := \frac{Vp_i \cdot \rho vap}{\tau_i}$

$Gp_0 := 0\,\frac{kg}{s}$

$n1p_i := round\left(\frac{Wvtp}{G1p_i}\right)$

$G1p_{imax} = 9.732 \times 10^{-6}\,\frac{kg}{s}$



$n1p_{i23} = 20$

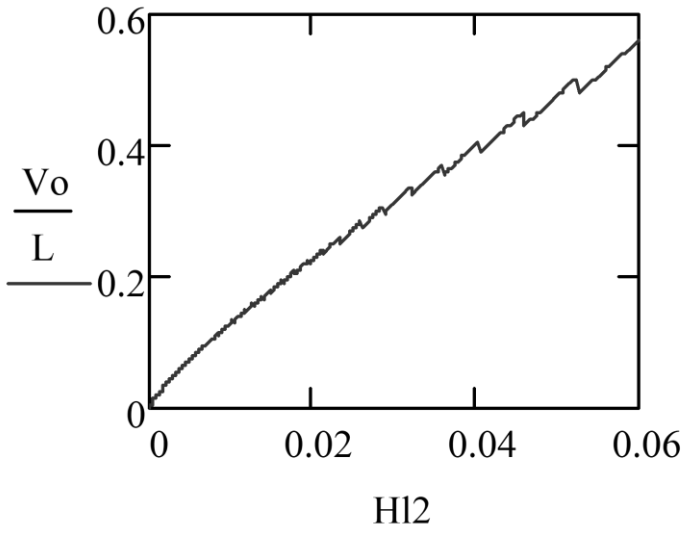
$Vo_i := Vp_i \cdot n1p_i$

число пузырьков в секунду

периодичность зарождения пузырьков

высота центра пузырька

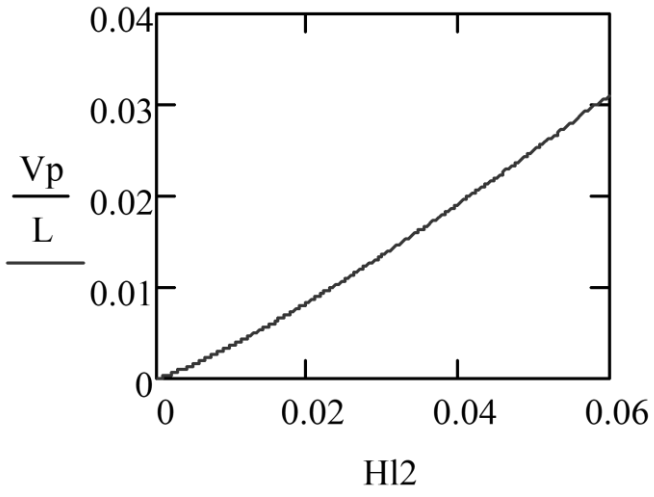
Суммарная площадь газовой фазы в i-м сечении



$$\frac{Wvtp}{Vp_{imax}\cdot\rho vap} = 84.606\frac{1}{s}$$

$$Lmc := \frac{60mm}{n1p_{imax}} = 3.333mm$$

$$j := 1..n1p_{imax}$$



$$\tau mc := \frac{\tau_{imax}}{n1p_{imax}} = 0.012s$$

$$V2p_j := \frac{4}{3}\pi\cdot(Rp2(\tau mc\cdot j))^3$$

$$\sum_j V2p_j = 0.437L$$

$$H3p_j := \left| \begin{array}{l} k \leftarrow 0 \\ \text{while } \tau_k < \tau mc \cdot j \\ \quad k \leftarrow k + 1 \\ Hl2_k \end{array} \right.$$

$$R3p_j := Rp2(\tau mc \cdot j)$$

$$S3_i := \left| \begin{array}{l} k \leftarrow 0 \\ Sx \leftarrow 0 \\ \text{for } k \in j \\ \quad \left| \begin{array}{l} \left[Rx \leftarrow \sqrt{\left(R3p_k\right)^2 - \left(Hl2_i - H3p_k\right)^2} \right] \text{ if } \left[\left(H3p_k + R3p_k\right) > Hl2_i \right] \text{ if } \left(H3p_k < Hl2_i\right) \\ \left[Rx \leftarrow \sqrt{\left(R3p_k\right)^2 - \left(H3p_k - Hl2_i\right)^2} \right] \text{ if } \left[\left(H3p_k - R3p_k\right) < Hl2_i \right] \text{ otherwise} \\ Sx \leftarrow Sx + \pi \cdot Rx^2 \end{array} \right. \\ \text{return } Sx \end{array} \right.$$

$$S3_0 := 0m^2$$

$$S4_0 := \frac{\pi \, (0.15m)^2}{4}$$

$$Z := Hl2 \cdot 100$$

необходимое число пузырьков в зависимости от глубины их зарождения

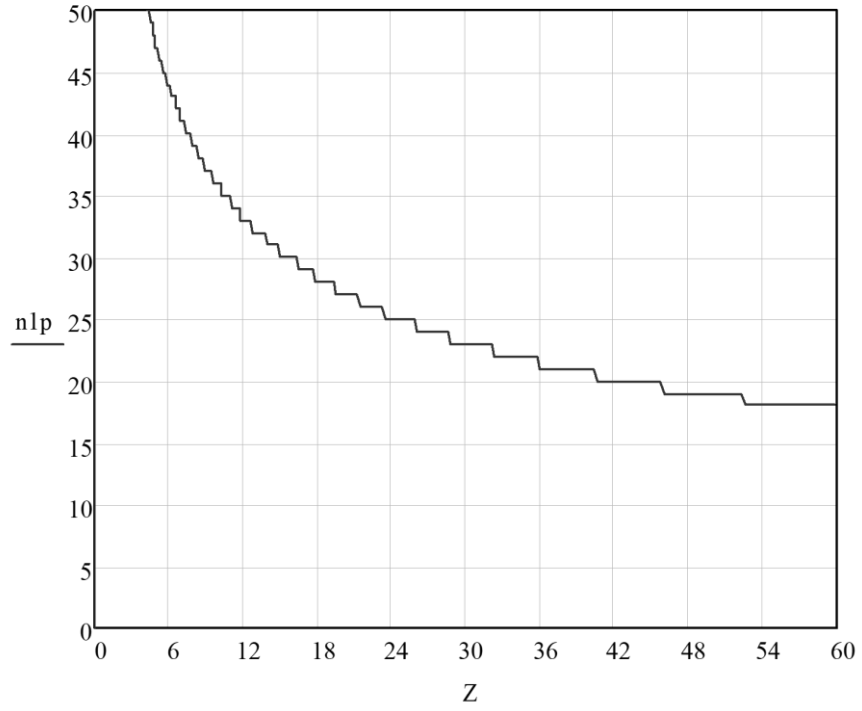
$$S3_i := \text{if}\left(S3_i < S4_0, S3_i, S4_0\right)$$

относительный объём жидкой фазы

$$S5_i := \frac{S3_i}{S4_0}$$

относительный объём паровой фазы

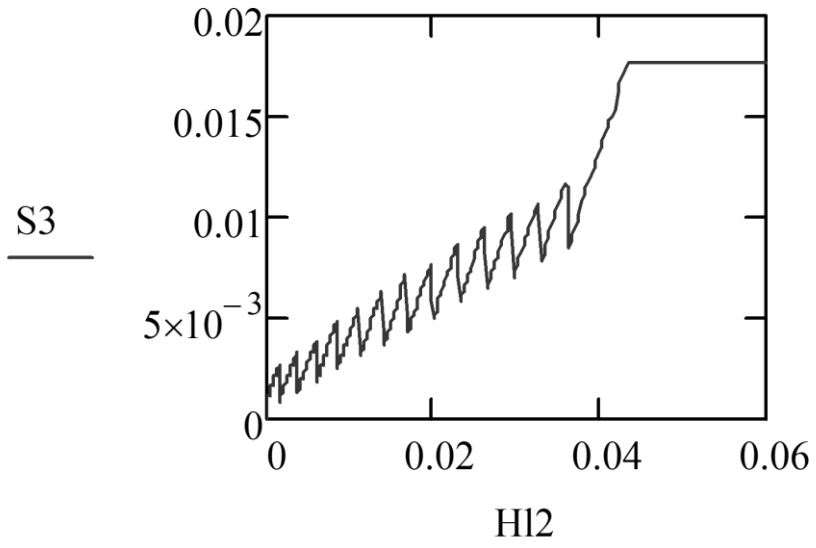
$$S41 := \text{supsmooth}\ (Hl2, S4)$$

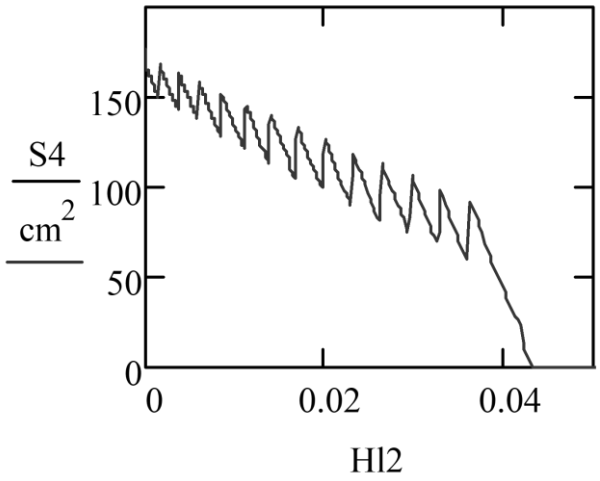


$S4_i := S4_0 - S3_i$

$H4_0 := 0m$

$S6_i := if\left(\frac{S4_0 - S3_i}{S4_0} > 0, \frac{S4_0 - S3_i}{S4_0}, 0\right)$





$S5_i := if\left(S5_i < 1, S5_i, 1\right)$

S61 := supsmooth (Hl2, S6)

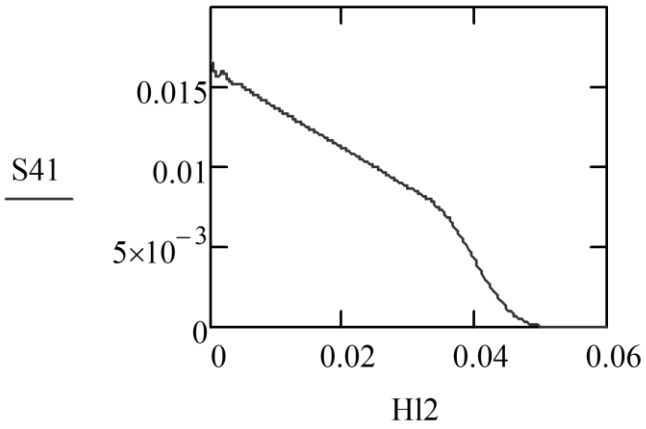
$H4_i := H4_{i-1} + \left(Hl2_i - Hl2_{i-1}\right)\cdot S6_i$

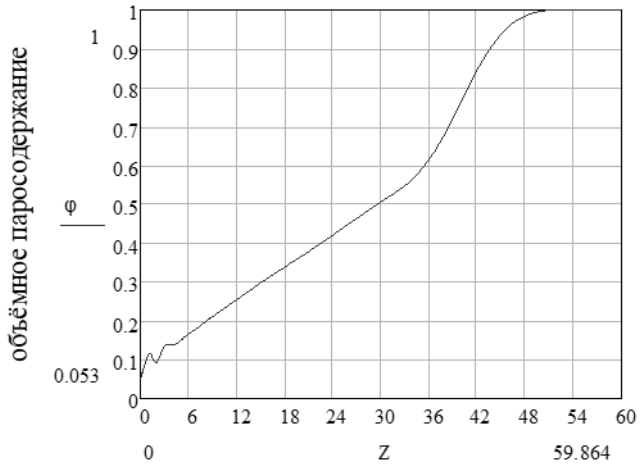
Z1 := H4·100

S31 := supsmooth (Hl2, S3)

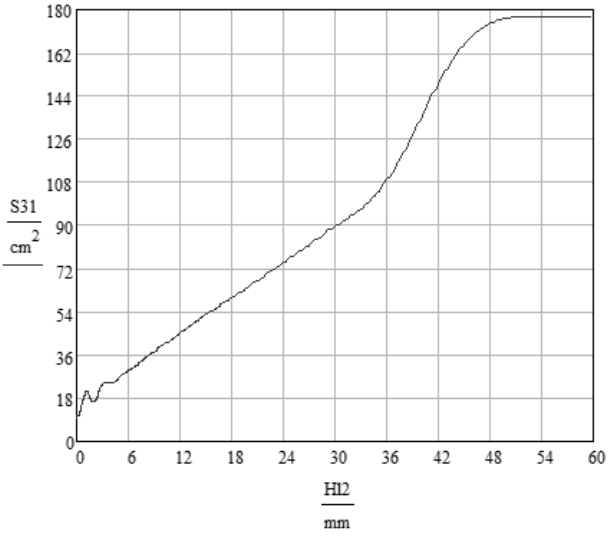
φ := supsmooth (Hl2, S5)

суммарная площадь паровой фазы в сечении модуля

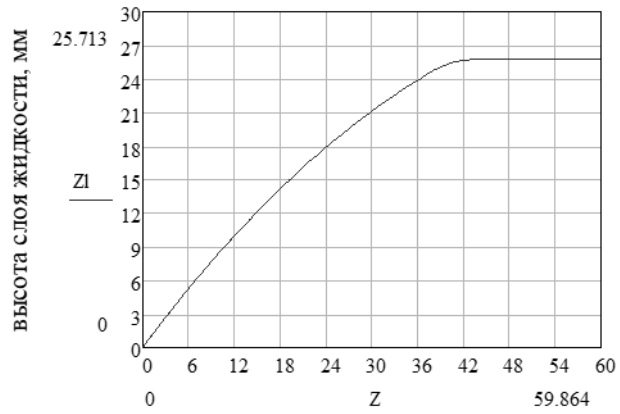




высота над уровнем зарождения



$H4_{imax} = 0.026m$



высота над уровнем зарождения, мм

Программа позволяет рассчитать распределение объемного паросодержания парожидкостной смеси и суммарную высоту слоя жидкости при кипении продукта в условиях объемного подвода энергии при заданных значениях паропроизводительности и геометрических размеров модуля.

Приложение Г.1

Сводка экспериментальных данных по сушке яблок на ленточной СВЧ-ИК сушке

Мощность, Вт	Толщина слоя, мм	Прям	Скорость ленты, мм/с	№ цикла	Брутто, гр	Тара, гр	Нетто, гр	Tпр С	dm, гр	Влажность, %	Масса влаги, гр	Время общее, с	Время, мин	Скорость, %/мин	wtr	speed g/min	Затраты энергии, Дж	Удельные затраты, Дж/кг
170	3	слайс	0,5	0	118,3	68,3	50	20	0	83,3	41,7	0	0	0	8330		0	#ДЕЛ/0!
170	3	слайс	0,5	1	112,7	68,3	44,4	35	5,6	81,19	36,1	1120	19	0,11	8119		190400	34
170	3	слайс	0,5	2	108	68,3	39,7	35	4,7	78,97	31,4	2240	37	0,12	7897		380800	37
170	3	слайс	0,5	3	103,8	68,3	35,5	35	4,2	76,48	27,2	3360	56	0,13	7648		571200	39
170	3	слайс	0,5	4	99,7	68,3	31,4	35	4,1	73,41	23,1	4480	75	0,16	7341		761600	41
170	3	слайс	0,5	5	96,1	68,3	27,8	35	3,6	69,96	19,5	5600	93	0,18	6996		952000	43
170	3	слайс	0,5	6	92	68,3	23,7	35	4,1	64,77	15,4	6720	112	0,28	6477		1142400	43
170	3	слайс	0,5	7	88,4	68,3	20,1	35	3,6	58,46	11,8	7840	131	0,34	5846		1332800	45
170	3	слайс	0,5	8	84,8	68,3	16,5	35	3,6	49,39	8,2	8960	149	0,49	4939		1523200	45
170	3	слайс	0,5	9	81,6	68,3	13,3	35	3,2	37,22	5,0	10080	168	0,65	3722		1713600	47
170	3	слайс	0,5	10	79,1	68,3	10,8	35	2,5	22,69	2,5	11200	187	0,78	2269		1904000	49
170	10	соломка	0,5	0	139,7	82,5	57,2	20	0	83,3	47,6	0	0	0	8330		0	#ДЕЛ/0!
170	10	соломка	0,5	1	134,9	82,5	52,4	21	4,8	81,77	42,8	1120	19	0,08	8177		190400	40
170	10	соломка	0,5	2	129,3	82,5	46,8	22	5,6	79,59	37,2	2240	37	0,12	7959		380800	37
170	10	соломка	0,5	3	124	82,5	41,5	23	5,3	76,98	31,9	3360	56	0,14	7698		571200	36
170	10	соломка	0,5	4	119,3	82,5	36,8	45	4,7	74,04	27,2	4480	75	0,16	7404		761600	37
170	10	соломка	0,5	5	114,9	82,5	32,4	46	4,4	70,52	22,8	5600	93	0,19	7052		952000	38
170	10	соломка	0,5	6	110,4	82,5	27,9	47	4,5	65,76	18,3	6720	112	0,25	6576		1142400	39
170	10	соломка	0,5	7	106,4	82,5	23,9	48	4	60,03	14,3	7840	131	0,31	6003		1332800	40
170	10	соломка	0,5	8	102,6	82,5	20,1	48	3,8	52,48	10,5	8960	149	0,40	5248		1523200	41
170	10	соломка	0,5	9	98,8	82,5	16,3	48	3,8	41,40	6,7	10080	168	0,59	4140		1713600	42
170	10		35	0	119,5	69,4	50,1	16	0	83,3	41,7	0	0	0	8330		0	#ДЕЛ/0!
170	10		35	5	119,3	69,4	49,9	20	0,2	83,23	41,5	80	1	0,05	8323		13600	68
170	10		35	10	119,1	69,4	49,7	25	0,2	83,17	41,3	160	3	0,05	8317		27200	68
170	10		35	20	118,8	69,4	49,4	30	0,3	83,06	41,0	320	5	0,04	8306		54400	78
170	10		35	30	118,4	69,4	49	32	0,4	82,93	40,6	480	8	0,05	8293		81600	74
170	10		35	40	118,1	69,4	48,7	33	0,3	82,82	40,3	640	11	0,04	8282		108800	78
170	10		35	50	117,7	69,4	48,3	35	0,4	82,68	39,9	800	13	0,05	8268		136000	76
170	10		35	60	117,2	69,4	47,8	36	0,5	82,50	39,4	960	16	0,07	8250		163200	71
170	10		35	70	116,6	69,4	47,2	37	0,6	82,27	38,8	1120	19	0,08	8227		190400	66
170	10		35	80	116	69,4	46,6	37	0,6	82,05	38,2	1280	21	0,09	8205		217600	62
170	10		35	90	115,6	69,4	46,2	38	0,4	81,89	37,8	1440	24	0,06	8189		244800	63
170	10		35	100	115,1	69,4	45,7	38	0,5	81,69	37,3	1600	27	0,07	8169		272000	62
170	10		35	110	114,4	69,4	45	38	0,7	81,41	36,6	1760	29	0,11	8141		299200	59
170	10		35	120	113,9	69,4	44,5	38	0,5	81,20	36,1	1920	32	0,08	8120		326400	58
170	10		35	130	113,5	69,4	44,1	38	0,4	81,03	35,7	2080	35	0,06	8103		353600	59
570	10		35	0	110,6	69,4	41,2		0	81,03	33,4	0	0	0	8103		0	#ДЕЛ/0!
570	10		35	10	109,4	69,4	40		1,2	80,46	32,2	160	3	0,21	8046		91200	76
570	10		35	20	109,1	69,4	39,7		0,3	80,31	31,9	320	5	0,06	8031		182400	122
570	10		35	30	108	69,4	38,6		1,1	79,75	30,8	480	8	0,21	7975		273600	105
570	10		35	40	107	69,4	37,6		1	79,21	29,8	640	11	0,20	7921		364800	101
570	10		35	50	106	69,4	36,6		1	78,64	28,8	800	13	0,21	7864		456000	99
570	10		35	60	104,7	69,4	35,3	45	1,3	77,86	27,5	960	16	0,29	7786		547200	93
570	10		35	70	103,8	69,4	34,4		0,9	77,28	26,6	1120	19	0,22	7728		638400	94
570	10		35	80	102,6	69,4	33,2		1,2	76,46	25,4	1280	21	0,31	7646		729600	91
570	10		35	90	101,7	69,4	32,3		0,9	75,80	24,5	1440	24	0,25	7580		820800	92
570	10		35	100	100,7	69,4	31,3	59	1	75,03	23,5	1600	27	0,29	7503		912000	92
570	10		35	110	99,5	69,4	30,1		1,2	74,03	22,3	1760	29	0,37	7403		1003200	90
570	10		35	120	98,7	69,4	29,3	60	0,8	73,32	21,5	1920	32	0,27	7332		1094400	92
570	10		35	130	97,8	69,4	28,4		0,9	72,48	20,6	2080	35	0,32	7248		1185600	93

570	10		35	140	96,9	69,4	27,5		0,9	71,58	19,7	2240	37	0,34	7158	1276800	93
570	10		35	150	96,2	69,4	26,8		0,7	70,83	19,0	2400	40	0,28	7083	1368000	95
570	10		35	160	95,2	69,4	25,8		1	69,70	18,0	2560	43	0,42	6970	1459200	95
570	10		35	170	94	69,4	24,6		1,2	68,23	16,8	2720	45	0,55	6823	1550400	93
570	10		35	180	92,9	69,4	23,5		1,1	66,74	15,7	2880	48	0,56	6674	1641600	93
570	10		35	190	91,7	69,4	22,3		1,2	64,95	14,5	3040	51	0,67	6495	1732800	92
170	10		35	0	130	82,9	47,1	16	0	83,3	39,2	0	0	0	8330	0	#ДЕЛ/0!
170	10		35	10	129,8	82,9	46,9		0,2	83,23	39,0	160	3	0,03	8323	27200	136
170	10		35	20	129,4	82,9	46,5		0,4	83,08	38,6	320	5	0,05	8308	54400	91
170	10		35	30	129,1	82,9	46,2		0,3	82,97	38,3	480	8	0,04	8297	81600	91
170	10		35	40	128,6	82,9	45,7		0,5	82,79	37,8	640	11	0,07	8279	108800	78
570	10		35	0	127,1	82,9	44,2		1,5	82,20	36,3	0	0	0	8220	0	#ДЕЛ/0!
570	10		35	10	126,2	82,9	43,3		0,9	81,83	35,4	160	3	0,14	8183	91200	101
570	10		35	20	125,3	82,9	42,4		0,9	81,45	34,5	320	5	0,14	8145	182400	101
570	10		35	30	123,8	82,9	40,9		1,5	80,77	33,0	480	8	0,26	8077	273600	83
570	10		35	40	122,5	82,9	39,6		1,3	80,14	31,7	640	11	0,24	8014	364800	79
570	10		35	50	121,2	82,9	38,3		1,3	79,46	30,4	800	13	0,25	7946	456000	77
570	10		35	60	119,8	82,9	36,9		1,4	78,68	29,0	960	16	0,29	7868	547200	75
570	10		35	70	118,4	82,9	35,5	54	1,4	77,84	27,6	1120	19	0,32	7784	638400	73
570	10		35	80	117,2	82,9	34,3		1,2	77,07	26,4	1280	21	0,29	7707	729600	74
570	10		35	90	115,8	82,9	32,9		1,4	76,09	25,0	1440	24	0,37	7609	820800	73
570	10		35	100	114,4	82,9	31,5		1,4	75,03	23,6	1600	27	0,40	7503	912000	72
570	10		35	110	113	82,9	30,1		1,4	73,87	22,2	1760	29	0,44	7387	1003200	71
570	10		35	120	111,8	82,9	28,9		1,2	72,78	21,0	1920	32	0,41	7278	1094400	72
570	10		35	130	110,7	82,9	27,8		1,1	71,71	19,9	2080	35	0,40	7171	1185600	72
570	10		35	140	109,6	82,9	26,7	55	1,1	70,54	18,8	2240	37	0,44	7054	1276800	73
570	10		35	150	108,4	82,9	25,5		1,2	69,15	17,6	2400	40	0,52	6915	1368000	73
570	10		35	160	107,2	82,9	24,3	59	1,2	67,63	16,4	2560	43	0,57	6763	1459200	73
570	10		35	170	106,1	82,9	23,2		1,1	66,10	15,3	2720	45	0,58	6610	1550400	74
570	10		35	180	105,1	82,9	22,2		1	64,57	14,3	2880	48	0,57	6457	1641600	75
570	10		35	190	104,3	82,9	21,4	65	0,8	63,24	13,5	3040	51	0,50	6324	1732800	76
570	10		35	200	104	82,9	21,1		0,3	62,72	13,2	3200	53	0,20	6272	1824000	79
435	3		20	0	98,8	69,4	29,4	18	0	83,3	24,5	0	0	0	8330	0	#ДЕЛ/0!
435	3	слайсы	20	10	97,7	69,4	28,3	38	1,1	82,65	23,4	280	5	0,14	8265	121800	111
435	3	слайсы	20	20	96,7	69,4	27,3	41	1	82,02	22,4	560	9	0,14	8202	243600	116
435	3	слайсы	20	30	95,4	69,4	26	31	1,3	81,12	21,1	840	14	0,19	8112	365400	107
435	3	слайсы	20	40	93,6	69,4	24,2	40	1,8	79,71	19,3	1120	19	0,30	7971	487200	94
435	3	слайсы	20	50	92,3	69,4	22,9	33	1,3	78,56	18,0	1400	23	0,25	7856	609000	94
435	3	слайсы	20	60	89,9	69,4	20,5	28	2,4	76,05	15,6	1680	28	0,54	7605	730800	82
435	3	слайсы	20	70	88,6	69,4	19,2	24	1,3	74,43	14,3	1960	33	0,35	7443	852600	84
435	3	слайсы	20	80	87,4	69,4	18	48	1,2	72,72	13,1	2240	37	0,37	7272	974400	85
435	3	слайсы	20	90	86	69,4	16,6	30	1,4	70,42	11,7	2520	42	0,49	7042	1096200	86
435	3	слайсы	20	100	85	69,4	15,6	30	1	68,53	10,7	2800	47	0,41	6853	1218000	88
435	3	слайсы	20	110	84	69,4	14,6	41	1	66,37	9,7	3080	51	0,46	6637	1339800	91
435	3	слайсы	20	120	82,6	69,4	13,2	45	1,4	62,80	8,3	3360	56	0,76	6280	1461600	90
435	3	слайсы	20	130	81,9	69,4	12,5	37	0,7	60,72	7,6	3640	61	0,45	6072	1583400	94
435	3	слайсы	20	140	80,9	69,4	11,5	51	1	57,31	6,6	3920	65	0,73	5731	1705200	95
435	3	слайсы	20	150	80,3	69,4	10,9	52	0,6	54,96	6,0	4200	70	0,50	5496	1827000	99
435	3	слайсы	20	160	79,5	69,4	10,1	42	0,8	51,39	5,2	4480	75	0,76	5139	1948800	101
435	3	слайсы	20	170	79	69,4	9,6	79	0,5	48,86	4,7	4760	79	0,54	4886	2070600	105
435	3	слайсы	20	180	78,4	69,4	9	55	0,6	45,45	4,1	5040	84	0,73	4545	2192400	107
435	3	слайсы	20	190	78	69,4	8,6	50	0,4	42,91	3,7	5320	89	0,54	4291	2314200	111
435	3	слайсы	20	200	77,5	69,4	8,1	47	0,5	39,39	3,2	5600	93	0,76	3939	2436000	114
435	3	слайсы	20	210	77,1	69,4	7,7	45	0,4	36,24	2,8	5880	98	0,67	3624	2557800	118

435	3	слайсы	20	220	76,8	69,4	7,4	51	0,3	33,65	2,5	6160	103	0,55	3365		2679600	122
435	3	слайсы	20	230	76,6	69,4	7,2	47	0,2	31,81	2,3	6440	107	0,39	3181		2801400	126
435	3	слайсы	20	240	76,4	69,4	7	45	0,2	29,86	2,1	6720	112	0,42	2986		2923200	131
435	3	слайсы	20	250	76,1	69,4	6,7	51	0,3	26,72	1,8	7000	117	0,67	2672		3045000	134
435	3	слайсы	20	260	75,9	69,4	6,5	50	0,2	24,46	1,6	7280	121	0,48	2446		3166800	138
425	3	слайсы	15	0	99,8	69,4	30,4	15	0	83,3	25,3	0	0	0	8330		0	#ДЕЛ/0!
425	3	слайсы	15	10	97,8	69,4	28,4	20	2	82,12	23,3	373	6	0,19	8212		158667	79
425	3	слайсы	15	20	94,5	69,4	25,1	55	3,3	79,77	20,0	747	12	0,38	7977		317333	60
425	3	слайсы	15	30	90,8	69,4	21,4	17	3,7	76,28	16,3	1120	19	0,56	7628		476000	53
425	3	слайсы	15	40	88	69,4	18,6	28	2,8	72,71	13,5	1493	25	0,57	7271		634667	54
425	3	слайсы	15	50	85,1	69,4	15,7	38	2,9	67,66	10,6	1867	31	0,81	6766		793333	54
425	3	слайсы	15	60	83,3	69,4	13,9	33	1,8	63,48	8,8	2240	37	0,67	6348		952000	58
425	3	слайсы	15	70	81,8	69,4	12,4	55	1,5	59,06	7,3	2613	44	0,71	5906		1110667	62
425	3	слайсы	15	80	80,3	69,4	10,9	48	1,5	53,42	5,8	2987	50	0,91	5342		1269333	65
425	3	слайсы	15	90	79,4	69,4	10	54	0,9	49,23	4,9	3360	56	0,67	4923		1428000	70
425	3	слайсы	15	100	78,6	69,4	9,2	44	0,8	44,82	4,1	3733	62	0,71	4482		1586667	75
425	3	слайсы	15	110	77,8	69,4	8,4	63	0,8	39,56	3,3	4107	68	0,84	3956		1745333	79
425	3	слайсы	15	120	77	69,4	7,6	81	0,8	33,20	2,5	4480	75	1,02	3320		1904000	84
425	3	слайсы	15	130	76,5	69,4	7,1	83	0,5	28,50	2,0	4853	81	0,76	2850		2062667	89
425	3	слайсы	15	140	76	69,4	6,6	80	0,5	23,08	1,5	5227	87	0,87	2308		2221333	93
425	3	слайсы	15	150	75,7	69,4	6,3	95	0,3	19,42	1,2	5600	93	0,59	1942		2380000	99
425	3	слайсы	15	160	75,6	69,4	6,2	98	0,1	18,12	1,1	5973	100	0,21	1812		2538667	105
425	3	слайсы	10	0	98,2	69,5	28,7	13	0	83,3	23,9	0	0	0	8330		0	#ДЕЛ/0!
425	3	слайсы	10	5	96,4	69,5	26,9	62	1,8	82,18	22,1	280	5	0,24	8218		119000	66
425	3	слайсы	10	10	93,4	69,5	23,9	56	3	79,95	19,1	560	9	0,48	7995		238000	50
425	3	слайсы	10	15	90,4	69,5	20,9	57	3	77,07	16,1	840	14	0,62	7707		357000	46
425	3	слайсы	10	20	87,7	69,5	18,2	47	2,7	73,67	13,4	1120	19	0,73	7367		476000	45
425	3	слайсы	10	25	84,4	69,5	14,9	49	3,3	67,83	10,1	1400	23	1,25	6783		595000	43
425	3	слайсы	10	30	81,9	69,5	12,4	57	2,5	61,35	7,6	1680	28	1,39	6135		714000	44
425	3	слайсы	10	35	79,5	69,5	10	50	2,4	52,07	5,2	1960	33	1,99	5207		833000	45
425	3	слайсы	10	40	78,3	69,5	8,8	51	1,2	45,54	4,0	2240	37	1,40	4554		952000	48
425	3	слайсы	10	45	76,9	69,5	7,4	69	1,4	35,23	2,6	2520	42	2,21	3523		1071000	50
425	3	слайсы	10	50	76,1	69,5	6,6	68	0,8	27,38	1,8	2800	47	1,68	2738		1190000	54
425	3	слайсы	10	55	75,2	69,5	5,7	70	0,9	15,91	0,9	3080	51	2,46	1591		1309000	57
425	3	слайсы	10	60	74,9	69,5	5,4	78	0,3	11,24	0,6	3360	56	1,00	1124		1428000	61
425	3	слайсы	10	65	74,7	69,5	5,2	75	0,2	7,83	0,4	3640	61	0,73	783		1547000	66
425	3	слайсы	10	70	74,7	69,5	5,2	75	0	7,83	0,4	3920	65	0,00	783		1666000	71
425	3	слайсы	10	75	74,7	69,5	5,2	75	0	7,83	0,4	4200	70	0,00	783		1785000	76
425	3	слайсы	5	0	114,4	82,5	31,9		0	86	27,4	0	0	0	8600		0	#ДЕЛ/0!
425	3	слайсы	5	1	113,4	82,5	30,9		1	85,55	26,4	112	2	0,24	8555		47600	48
425	3	слайсы	5	2	112,6	82,5	30,1		0,8	85,16	25,6	224	4	0,21	8516		95200	53
425	3	слайсы	5	3	111,4	82,5	28,9		1,2	84,55	24,4	336	6	0,33	8455		142800	48
425	3	слайсы	5	4	110	82,5	27,5		1,4	83,76	23,0	448	7	0,42	8376		190400	43
425	3	слайсы	5	5	107,5	82,5	25		2,5	82,14	20,5	560	9	0,87	8214		238000	34
425	3	слайсы	5	6	105,6	82,5	23,1		1,9	80,67	18,6	672	11	0,79	8067		285600	32
425	3	слайсы	5	7	104,3	82,5	21,8		1,3	79,51	17,3	784	13	0,62	7951		333200	33
425	3	слайсы	5	8	103	82,5	20,5		1,3	78,21	16,0	896	15	0,70	7821		380800	33
425	3	слайсы	5	9	101,9	82,5	19,4		1,1	76,98	14,9	1008	17	0,66	7698		428400	34
425	3	слайсы	5	10	100,7	82,5	18,2		1,2	75,46	13,7	1120	19	0,81	7546		476000	35
425	3	слайсы	5	11	99,4	82,5	16,9		1,3	73,57	12,4	1232	21	1,01	7357		523600	35
425	3	слайсы	5	12	98,2	82,5	15,7		1,2	71,55	11,2	1344	22	1,08	7155		571200	35
425	3	слайсы	5	13	97	82,5	14,5		1,2	69,20	10,0	1456	24	1,26	6920		618800	36
425	3	слайсы	5	14	95,9	82,5	13,4		1,1	66,67	8,9	1568	26	1,35	6667		666400	36
425	3	слайсы	5	15	94,6	82,5	12,1		1,3	63,09	7,6	1680	28	1,92	6309		714000	36

425	3	слайсы	5	16	93,8	82,5	11,3	0,8	60,48	6,8	1792	30	1,40	6048		761600	37
425	3	слайсы	5	17	92,8	82,5	10,3	1	56,64	5,8	1904	32	2,06	5664		809200	37
425	3	слайсы	5	18	91,9	82,5	9,4	0,9	52,49	4,9	2016	34	2,22	5249		856800	38
425	3	слайсы	5	19	91,1	82,5	8,6	0,8	48,07	4,1	2128	35	2,37	4807		904400	39
425	3	слайсы	5	20	90,4	82,5	7,9	0,7	43,47	3,4	2240	37	2,47	4347		952000	40
425	3	слайсы	5	21	89,8	82,5	7,3	0,6	38,82	2,8	2352	39	2,49	3882		999600	41
425	3	слайсы	5	22	89,2	82,5	6,7	0,6	33,34	2,2	2464	41	2,93	3334		1047200	42
425	3	слайсы	5	23	88,9	82,5	6,4	0,3	30,22	1,9	2576	43	1,67	3022		1094800	43
425	3	слайсы	5	24	88,4	82,5	5,9	0,5	24,31	1,4	2688	45	3,17	2431		1142400	44
425	3	слайсы	5	25	88,1	82,5	5,6	0,3	20,25	1,1	2800	47	2,17	2025		1190000	45
425	3	слайсы	5	26	87,9	82,5	5,4	0,2	17,30	0,9	2912	49	1,58	1730		1237600	47
425	3	слайсы	5	27	87,6	82,5	5,1	0,3	12,43	0,6	3024	50	2,61	1243		1285200	48
425	3	слайсы	5	28	87,5	82,5	5	0,1	10,68	0,5	3136	52	0,94	1068		1332800	50
425	3	слайсы	5	29	87,2	82,5	4,7	0,3	4,98	0,2	3248	54	3,05	498		1380400	51
425	3	слайсы	5	30	87,2	82,5	4,7	0	4,98	0,2	3360	56	0,00	498		1428000	53
425	3	слайсы	5	31	87,1	82,5	4,6	0,1	2,91	0,1	3472	58	1,11	291		1475600	54
425	3	слайсы	5	32	87,1	82,5	4,6	0	2,91	0,1	3584	60	0,00	291		1523200	56
425	3	слайсы	5	33	87	82,5	4,5	0,1	0,76	0,0	3696	62	1,16	76		1570800	57
425	3	слайсы	5	34	87	82,5	4,5	0	0,76	0,0	3808	63	0,00	76		1618400	59
425	3	слайсы	5	35	87	82,5	4,5	0	0,76	0,0	3920	65	0,00	76		1666000	61
300	3	слайсы	5	0	118,5	82,5	36	0	86	31,0	0	0	0	8600		0	#ДЕЛ/0!
300	3	слайсы	5	1	118,4	82,5	35,9	0,1	85,96	30,9	112	2	0,02	8596	0,053571429	33600	336
300	3	слайсы	5	2	117,8	82,5	35,3	0,6	85,72	30,3	224	4	0,13	8572	0,321428571	67200	96
300	3	слайсы	5	3	116,8	82,5	34,3	1	85,31	29,3	336	6	0,22	8531	0,535714286	100800	59
300	3	слайсы	5	4	116,1	82,5	33,6	0,7	85,00	28,6	448	7	0,16	8500	0,375	134400	56
300	3	слайсы	5	5	115,2	82,5	32,7	0,9	84,59	27,7	560	9	0,22	8459	0,482142857	168000	51
300	3	слайсы	5	6	114,3	82,5	31,8	0,9	84,15	26,8	672	11	0,23	8415	0,482142857	201600	48
300	3	слайсы	5	7	113,5	82,5	31	0,8	83,74	26,0	784	13	0,22	8374	0,428571429	235200	47
300	3	слайсы	5	8	112,5	82,5	30	1	83,20	25,0	896	15	0,29	8320	0,535714286	268800	45
300	3	слайсы	5	9	111,6	82,5	29,1	0,9	82,68	24,1	1008	17	0,28	8268	0,482142857	302400	44
300	3	слайсы	5	10	110,8	82,5	28,3	0,8	82,19	23,3	1120	19	0,26	8219	0,428571429	336000	44
300	3	слайсы	5	11	109,7	82,5	27,2	1,1	81,47	22,2	1232	21	0,39	8147	0,589285714	369600	42
300	3	слайсы	5	12	108,7	82,5	26,2	1	80,76	21,2	1344	22	0,38	8076	0,535714286	403200	41
300	3	слайсы	5	13	107,4	82,5	24,9	1,3	79,76	19,9	1456	24	0,54	7976	0,696428571	436800	39
300	3	слайсы	5	14	106,5	82,5	24	0,9	79,00	19,0	1568	26	0,41	7900	0,482142857	470400	39
300	3	слайсы	5	15	105,8	82,5	23,3	0,7	78,37	18,3	1680	28	0,34	7837	0,375	504000	40
300	3	слайсы	5	16	104,1	82,5	21,6	1,7	76,67	16,6	1792	30	0,91	7667	0,910714286	537600	37
300	3	слайсы	5	17	103,6	82,5	21,1	0,5	76,11	16,1	1904	32	0,30	7611	0,267857143	571200	38
300	3	слайсы	5	18	102,5	82,5	20	1,1	74,80	15,0	2016	34	0,70	7480	0,589285714	604800	38
300	3	слайсы	5	19	101,6	82,5	19,1	0,9	73,61	14,1	2128	35	0,64	7361	0,482142857	638400	38
300	3	слайсы	5	20	101	82,5	18,5	0,6	72,76	13,5	2240	37	0,46	7276	0,321428571	672000	38
300	3	слайсы	5	21	99,6	82,5	17,1	1,4	70,53	12,1	2352	39	1,19	7053	0,75	705600	37
300	3	слайсы	5	22	99,2	82,5	16,7	0,4	69,82	11,7	2464	41	0,38	6982	0,214285714	739200	38
300	3	слайсы	5	23	98,7	82,5	16,2	0,5	68,89	11,2	2576	43	0,50	6889	0,267857143	772800	39
300	3	слайсы	5	24	98,1	82,5	15,6	0,6	67,69	10,6	2688	45	0,64	6769	0,321428571	806400	40
300	3	слайсы	5	25	97,5	82,5	15	0,6	66,40	10,0	2800	47	0,69	6640	0,321428571	840000	40
300	3	слайсы	5	26	96,9	82,5	14,4	0,6	65,00	9,4	2912	49	0,75	6500	0,321428571	873600	40
300	3	слайсы	5	27	96,2	82,5	13,7	0,7	63,21	8,7	3024	50	0,96	6321	0,375	907200	41
300	3	слайсы	5	28	95,7	82,5	13,2	0,5	61,82	8,2	3136	52	0,75	6182	0,267857143	940800	41
300	3	слайсы	5	29	95,1	82,5	12,6	0,6	60,00	7,6	3248	54	0,97	6000	0,321428571	974400	42
300	3	слайсы	5	30	94,5	82,5	12	0,6	58,00	7,0	3360	56	1,07	5800	0,321428571	1008000	42
300	3	слайсы	5	31	93,3	82,5	10,8	1,2	53,33	5,8	3472	58	2,50	5333	0,642857143	1041600	41
300	3	слайсы	5	32	92,8	82,5	10,3	0,5	51,07	5,3	3584	60	1,21	5107	0,267857143	1075200	42
300	3	слайсы	5	33	92,4	82,5	9,9	0,4	49,09	4,9	3696	62	1,06	4909	0,214285714	1108800	42

300	3	слайсы	5	34	92	82,5	9,5		0,4	46,95	4,5	3808	63	1,15	4695	0,214285714	1142400	43
300	3	слайсы	5	35	91,7	82,5	9,2		0,3	45,22	4,2	3920	65	0,93	4522	0,160714286	1176000	44
300	3	слайсы	5	36	91,4	82,5	8,9		0,3	43,37	3,9	4032	67	0,99	4337	0,160714286	1209600	45
300	3	слайсы	5	37	91	82,5	8,5		0,4	40,71	3,5	4144	69	1,43	4071	0,214285714	1243200	45
300	3	слайсы	5	38	90	82,5	7,5		1	32,80	2,5	4256	71	4,24	3280	0,535714286	1276800	45
300	3	слайсы	5	39	89,8	82,5	7,3		0,2	30,96	2,3	4368	73	0,99	3096	0,107142857	1310400	46
300	3	слайсы	5	40	89,5	82,5	7		0,3	28,00	2,0	4480	75	1,59	2800	0,160714286	1344000	46
300	3	слайсы	5	41	89,4	82,5	6,9		0,1	26,96	1,9	4592	77	0,56	2696	0,053571429	1377600	47
300	3	слайсы	5	42	89,3	82,5	6,8		0,1	25,88	1,8	4704	78	0,58	2588	0,053571429	1411200	48
300	3	слайсы	5	43	89,1	82,5	6,6		0,2	23,64	1,6	4816	80	1,20	2364	0,107142857	1444800	49
300	3	слайсы	5	44	88,9	82,5	6,4		0,2	21,25	1,4	4928	82	1,28	2125	0,107142857	1478400	50
300	3	слайсы	5	45	88,7	82,5	6,2		0,2	18,71	1,2	5040	84	1,36	1871	0,107142857	1512000	51
300	3	слайсы	5	46	88,6	82,5	6,1		0,1	17,38	1,1	5152	86	0,71	1738	0,053571429	1545600	52
300	3	слайсы	5	47	88,5	82,5	6		0,1	16,00	1,0	5264	88	0,74	1600	0,053571429	1579200	53
300	3	слайсы	5	48	88,3	82,5	5,8		0,2	13,10	0,8	5376	90	1,55	1310	0,107142857	1612800	53
300	3	слайсы	5	49	88,2	82,5	5,7		0,1	11,58	0,7	5488	91	0,82	1158	0,053571429	1646400	54
300	3	слайсы	5	50	88,1	82,5	5,6		0,1	10,00	0,6	5600	93	0,85	1000	0,053571429	1680000	55
300	3	слайсы	5	51	88,1	82,5	5,6		0	10,00	0,6	5712	95	0,00	1000	0	1713600	56
300	3	слайсы	5	52	88	82,5	5,5		0,1	8,36	0,5	5824	97	0,88	836	0,053571429	1747200	57
300	3	слайсы	5	53	87,9	82,5	5,4		0,1	6,67	0,4	5936	99	0,91	667	0,053571429	1780800	58
300	3	слайсы	5	54	87,9	82,5	5,4		0	6,67	0,4	6048	101	0,00	667	0	1814400	59
300	3	слайсы	5	55	87,9	82,5	5,4		0	6,67	0,4	6160	103	0,00	667	0	1848000	60
300	3	слайсы	5	56	87,8	82,5	5,3		0,1	4,91	0,3	6272	105	0,94	491	0,053571429	1881600	61
300	3	слайсы	5	57	87,7	82,5	5,2		0,1	3,08	0,2	6384	106	0,98	308	0,053571429	1915200	62
300	3	слайсы	5	58	87,7	82,5	5,2		0	3,08	0,2	6496	108	0,00	308	0	1948800	63
300	3	слайсы	5	59	87,7	82,5	5,2		0	3,08	0,2	6608	110	0,00	308	0	1982400	64
300	1		1	0	108,4	82,5	25,9	20	0	86	22,3	0	0	0	8600	0,200792978	0	#ДЕЛ/0!
300	1	слайсы	1	1	103,7	82,5	21,2	48	4,7	82,90	17,6	560	9	0,33	8290	0,503571429	168000	36
300	1	слайсы	1	2	99,1	82,5	16,6	41	4,6	78,16	13,0	1120	19	0,51	7816	0,492857143	336000	36
300	1	слайсы	1	3	96,2	82,5	13,7	39	2,9	73,53	10,1	1680	28	0,50	7353	0,310714286	504000	41
300	1	слайсы	1	4	93,3	82,5	10,8	48	2,9	66,43	7,2	2240	37	0,76	6643	0,310714286	672000	45
300	1	слайсы	1	5	89,4	82,5	6,9	48	3,9	47,45	3,3	2800	47	2,03	4745	0,417857143	840000	44
300	1	слайсы	1	6	87,3	82,5	4,8	65	2,1	24,46	1,2	3360	56	2,46	2446	0,225	1008000	48
300	1	слайсы	1	7	86,5	82,5	4	70	0,8	9,35	0,4	3920	65	1,62	935	0,085714286	1176000	54
300	1	слайсы	1	8	86,15	82,5	3,65	70	0,35	0,66	0,0	4480	75	0,93	66	0,0375	1344000	60
300	1	слайсы	1	0	100,6	69,5	31,1	20	0	86	26,7	0	0	0	8600	0,357883929	0	#ДЕЛ/0!
300	1	слайсы	1	1	97,1	69,5	27,6	58	3,5	84,22	23,2	560	9	0,19	8422	0,375	168000	48
300	1	слайсы	1	2	90,4	69,5	20,9	52	6,7	79,17	16,5	1120	19	0,54	7917	0,717857143	336000	33
300	1	слайсы	1	3	80	69,5	10,5	48	10,4	58,53	6,1	1680	28	2,21	5853	1,114285714	504000	24
300	1	слайсы	1	4	78	69,5	8,5	42	2	48,78	4,1	2240	37	1,05	4878	0,214285714	672000	30
300	1	слайсы	1	5	76,4	69,5	6,9	52	1,6	36,90	2,5	2800	47	1,27	3690	0,171428571	840000	35
300	1	слайсы	1	6	75,1	69,5	5,6	74	1,3	22,25	1,2	3360	56	1,57	2225	0,139285714	1008000	40
300	1	слайсы	1	7	74,6	69,5	5,1	70	0,5	14,63	0,7	3920	65	0,82	1463	0,053571429	1176000	45
300	1	слайсы	1	8	74	69,5	4,5	88	0,6	3,24	0,1	4480	75	1,22	324	0,064285714	1344000	51

Приложение Г.2

Сводка экспериментальных данных по сушке моркови на ленточной СВЧ-ИК сушке

Затраты энергии, Дж	Удельные затраты, Дж/кг	Удельные затраты, кДж/кг	MR	MR*10000	Deff	Des*E11	Ff	betta m/s	Bu	Pe	St	N	m/P*1000000	Влагосодержание
0	#ДЕЛ/0!		1,00	10000		0	3,33E-02						50	5,67
121800	81200	81	0,92	9194	-4,1E-10	-41	3,33E-02	3,1E-07	0,22	14,29	1,57E-05		47	5,21
243600	128211	128	0,90	8979	-1,67E-10	-17	3,33E-02	8,4E-08	0,22	14,29	4,18E-06		46	5,09
365400	117871	118	0,83	8335	-3,02E-11	-3	3,33E-02	2,5E-07	0,22	14,29	1,25E-05		43	4,72
487200	108267	108	0,76	7583	5,432E-11	5	3,33E-02	2,9E-07	0,22	14,29	1,46E-05		40	4,30
609000	108750	109	0,70	6992	9,63E-11	10	3,33E-02	2,3E-07	0,22	14,29	1,15E-05		37	3,96
730800	109075	109	0,64	6401	1,282E-10	13	3,33E-02	2,3E-07	0,22	14,29	1,15E-05		35	3,63
852600	107924	108	0,58	5756	1,593E-10	16	3,33E-02	2,5E-07	0,22	14,29	1,25E-05		32	3,26
974400	107077	107	0,51	5111	1,877E-10	19	3,33E-02	2,5E-07	0,22	14,29	1,25E-05		29	2,90
1096200	104400	104	0,44	4359	2,244E-10	22	3,33E-02	2,9E-07	0,22	14,29	1,46E-05		26	2,47
1218000	105913	106	0,38	3822	2,448E-10	24	3,33E-02	2,1E-07	0,22	14,29	1,04E-05		24	2,17
1339800	108048	108	0,33	3339	2,626E-10	26	3,33E-02	1,9E-07	0,22	14,29	9,40E-06		22	1,89
1461600	109075	109	0,28	2802	2,883E-10	29	3,33E-02	2,1E-07	0,22	14,29	1,04E-05		20	1,59
1583400	112298	112	0,24	2425	3,023E-10	30	3,33E-02	1,5E-07	0,22	14,29	7,31E-06		18	1,37
1705200	113680	114	0,19	1942	3,324E-10	33	3,33E-02	1,9E-07	0,22	14,29	9,40E-06		16	1,10
1827000	117871	118	0,17	1673	3,425E-10	34	3,33E-02	1E-07	0,22	14,29	5,22E-06		15	0,95
1948800	118109	118	0,11	1136	3,999E-10	40	3,33E-02	2,1E-07	0,22	14,29	1,04E-05		12	0,64
2070600	123250	123	0,10	975	4,057E-10	41	3,33E-02	6,3E-08	0,22	14,29	3,13E-06		12	0,55
2192400	126728	127	0,07	706	4,415E-10	44	3,33E-02	1E-07	0,22	14,29	5,22E-06		11	0,40
2314200	131489	131	0,05	545	4,626E-10	46	3,33E-02	6,3E-08	0,22	14,29	3,13E-06		10	0,31
2436000	135333	135	0,03	330	5,211E-10	52	3,33E-02	8,4E-08	0,22	14,29	4,18E-06		9	0,19
2557800	140538	141	0,02	223	5,573E-10	56	3,33E-02	4,2E-08	0,22	14,29	2,09E-06		9	0,13
2679600	146426	146	0,02	169	5,728E-10	57	3,33E-02	2,1E-08	0,22	14,29	1,04E-06		8	0,10
2801400	153082	153	0,02	169	5,479E-10	55	3,33E-02	0	0,22	14,29	0,00E+00		8	0,10
2923200	158870	159	0,01	115	5,769E-10	58	3,33E-02	2,1E-08	0,22	14,29	1,04E-06		8	0,07
3045000	165489	165	0,01	115	5,538E-10	55	3,33E-02	0	0,22	14,29	0,00E+00		8	0,07
3166800	172109	172	0,01	115	5,325E-10	53	3,33E-02	0	0,22	14,29	0,00E+00		8	0,07
0	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	1,00	10000		0	0,03333333	1,4E-07	0,215	14,29	9,40E-06		49	5,67
158667	63467	63	0,86	8593	-1,43E-10	-14	3,33E-02	3,9E-07	0,215	14,29	2,61E-05		43	4,87
317333	57697	58	0,69	6904	1,96E-10	20	3,33E-02	4,7E-07	0,215	14,29	3,13E-05		36	3,91
476000	55349	55	0,52	5159	3,679E-10	37	3,33E-02	4,9E-07	0,215	14,29	3,24E-05		29	2,92
634667	56165	56	0,36	3639	4,89E-10	49	3,33E-02	4,2E-07	0,215	14,29	2,82E-05		23	2,06
793333	58333	58	0,23	2344	6,06E-10	61	3,33E-02	3,6E-07	0,215	14,29	2,40E-05		17	1,33
952000	63893	64	0,16	1613	6,573E-10	66	3,33E-02	2E-07	0,215	14,29	1,36E-05		14	0,91
1110667	69853	70	0,10	1050	7,132E-10	71	3,33E-02	1,6E-07	0,215	14,29	1,04E-05		12	0,59
1269333	76929	77	0,07	712	7,426E-10	74	3,33E-02	9,4E-08	0,215	14,29	6,27E-06		10	0,40
1428000	84000	84	0,04	431	7,966E-10	80	3,33E-02	7,8E-08	0,215	14,29	5,22E-06		9	0,24
1586667	91188	91	0,02	205	8,977E-10	90	3,33E-02	6,3E-08	0,215	14,29	4,18E-06		8	0,12
1745333	99733	100	0,01	149	8,871E-10	89	3,33E-02	1,6E-08	0,215	14,29	1,04E-06		8	0,08
1904000	108800	109	0,01	149	8,132E-10	81	3,33E-02	0	0,215	14,29	0,00E+00		8	0,08
2062667	116535	117	0,00	37	1,015E-09	101	3,33E-02	3,1E-08	0,215	14,29	2,09E-06		8	0,02
2221333	125499	125	0,00	37	9,422E-10	94	3,33E-02	0	0,215	14,29	0,00E+00		8	0,02

2380000	134463	134	0,00	37	8,794E-10	88	3,33E-02	0	0,215	14,29	0,00E+00	8	0,02
2538667	143427	143	0,00	37	8,245E-10	82	3,33E-02	0	0,215	14,29	0,00E+00	8	0,02
0	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	1,00	10000		0	3,33E-02	1,8E-07	0,215	14,29	1,82E-05	52	5,25
119000	56667	57	0,89	8874	-2,95E-10	-29	3,33E-02	4,4E-07	0,215	14,29	4,39E-05	47	4,66
238000	46667	47	0,73	7265	1,783E-10	18	3,33E-02	6,3E-07	0,215	14,29	6,27E-05	40	3,81
357000	43012	43	0,55	5549	4,114E-10	41	3,33E-02	6,7E-07	0,215	14,29	6,68E-05	33	2,91
476000	45769	46	0,44	4423	4,932E-10	49	3,33E-02	4,4E-07	0,215	14,29	4,39E-05	28	2,32
595000	45420	45	0,30	2975	6,528E-10	65	3,33E-02	5,6E-07	0,215	14,29	5,64E-05	21	1,56
714000	48571	49	0,21	2117	7,287E-10	73	3,33E-02	3,3E-07	0,215	14,29	3,34E-05	18	1,11
833000	51420	51	0,13	1313	8,47E-10	85	3,33E-02	3,1E-07	0,215	14,29	3,13E-05	14	0,69
952000	56000	56	0,09	884	9,022E-10	90	3,33E-02	1,7E-07	0,215	14,29	1,67E-05	12	0,46
1071000	60508	61	0,05	508	1,002E-09	100	3,33E-02	1,5E-07	0,215	14,29	1,46E-05	11	0,27
1190000	66111	66	0,03	347	1,026E-09	103	3,33E-02	6,3E-08	0,215	14,29	6,27E-06	10	0,18
1309000	71530	72	0,02	187	1,117E-09	112	3,33E-02	6,3E-08	0,215	14,29	6,27E-06	9	0,10
1428000	77609	78	0,01	133	1,115E-09	112	3,33E-02	2,1E-08	0,215	14,29	2,09E-06	9	0,07
1547000	83622	84	0,01	79	1,159E-09	116	3,33E-02	2,1E-08	0,215	14,29	2,09E-06	9	0,04
1666000	90054	90	0,01	79	1,076E-09	108	3,33E-02	0	0,215	14,29	0,00E+00	9	0,04
1785000	96486	96	0,01	79	1,004E-09	100	3,33E-02	0	0,215	14,29	0,00E+00	9	0,04
0	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	1,00	10000		0	3,33E-02	2,5E-07	0,215	14,29	4,96E-05	49	6,14
47600	20696	21	0,87	8720	-5,95E-10	-60	3,33E-02	1,2E-06	0,215	14,29	2,40E-04	44	5,36
95200	29750	30	0,82	8220	-5,68E-11	-6	3,33E-02	4,7E-07	0,215	14,29	9,40E-05	42	5,05
142800	34000	34	0,77	7663	1,523E-10	15	3,33E-02	5,2E-07	0,215	14,29	1,04E-04	39	4,71
190400	35259	35	0,70	6996	2,998E-10	30	3,33E-02	6,3E-07	0,215	14,29	1,25E-04	36	4,30
238000	29750	30	0,55	5549	6,17E-10	62	3,33E-02	1,4E-06	0,215	14,29	2,72E-04	30	3,41
285600	30063	30	0,47	4715	7,354E-10	74	3,33E-02	7,8E-07	0,215	14,29	1,57E-04	27	2,90
333200	32667	33	0,43	4325	7,306E-10	73	3,33E-02	3,7E-07	0,215	14,29	7,31E-05	25	2,66
380800	34618	35	0,39	3880	7,498E-10	75	3,33E-02	4,2E-07	0,215	14,29	8,35E-05	23	2,38
428400	36615	37	0,35	3491	7,622E-10	76	3,33E-02	3,7E-07	0,215	14,29	7,31E-05	22	2,14
476000	38387	38	0,31	3101	7,823E-10	78	3,33E-02	3,7E-07	0,215	14,29	7,31E-05	20	1,90
523600	40277	40	0,28	2767	7,954E-10	80	3,33E-02	3,1E-07	0,215	14,29	6,27E-05	19	1,70
571200	42311	42	0,25	2489	8,01E-10	80	3,33E-02	2,6E-07	0,215	14,29	5,22E-05	17	1,53
618800	44518	45	0,23	2267	7,981E-10	80	3,33E-02	2,1E-07	0,215	14,29	4,18E-05	16	1,39
666400	45959	46	0,19	1933	8,337E-10	83	3,33E-02	3,1E-07	0,215	14,29	6,27E-05	15	1,19
714000	47919	48	0,17	1710	8,445E-10	84	3,33E-02	2,1E-07	0,215	14,29	4,18E-05	14	1,05
761600	50105	50	0,15	1543	8,44E-10	84	3,33E-02	1,6E-07	0,215	14,29	3,13E-05	13	0,95
809200	52545	53	0,14	1432	8,302E-10	83	3,33E-02	1E-07	0,215	14,29	2,09E-05	13	0,88
856800	54228	54	0,12	1210	8,605E-10	86	3,33E-02	2,1E-07	0,215	14,29	4,18E-05	12	0,74

904400	56881	57	0,12	1154	8,354E-10	84	3,33E-02	5,2E-08	0,215	14,29	1,04E-05	12	0,71
952000	58405	58	0,09	931	8,808E-10	88	3,33E-02	2,1E-07	0,215	14,29	4,18E-05	11	0,57
999600	60217	60	0,08	764	9,155E-10	92	3,33E-02	1,6E-07	0,215	14,29	3,13E-05	10	0,47
1047200	62707	63	0,07	709	9,018E-10	90	3,33E-02	5,2E-08	0,215	14,29	1,04E-05	10	0,44
1094800	64400	64	0,05	542	9,576E-10	96	3,33E-02	1,6E-07	0,215	14,29	3,13E-05	9	0,33
1142400	66419	66	0,04	431	9,957E-10	100	3,33E-02	1E-07	0,215	14,29	2,09E-05	9	0,26
1190000	68786	69	0,04	375	1,001E-09	100	3,33E-02	5,2E-08	0,215	14,29	1,04E-05	8	0,23
1237600	70720	71	0,03	264	1,073E-09	107	3,33E-02	1E-07	0,215	14,29	2,09E-05	8	0,16
1285200	73440	73	0,03	264	1,033E-09	103	3,33E-02	0	0,215	14,29	0,00E+00	8	0,16
1332800	75727	76	0,02	208	1,065E-09	106	3,33E-02	5,2E-08	0,215	14,29	1,04E-05	8	0,13
1380400	77989	78	0,02	152	1,116E-09	112	3,33E-02	5,2E-08	0,215	14,29	1,04E-05	8	0,09
1428000	80225	80	0,01	97	1,202E-09	120	3,33E-02	5,2E-08	0,215	14,29	1,04E-05	7	0,06
1475600	82436	82	0,00	41	1,387E-09	139	3,33E-02	5,2E-08	0,215	14,29	1,04E-05	7	0,03
1523200	85573	86	0,01	97	1,127E-09	113	3,33E-02	-5,2E-08	0,215	14,29	-1,04E-05	7	0,06
1570800	87754	88	0,00	41	1,303E-09	130	3,33E-02	5,2E-08	0,215	14,29	1,04E-05	7	0,03
1618400	90413	90	0,00	41	1,265E-09	127	3,33E-02	0	0,215	14,29	0,00E+00	7	0,03
0	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	1,00	10000		0	3,33E-02	2,7E-07	0,152	14,29	5,32E-05	69	5,25
33600	67200	67	0,97	9712	-1,47E-09	-147	3,33E-02	2,6E-07	0,152	14,29	5,22E-05	67	5,10
67200	56000	56	0,93	9310	-5,64E-10	-56	3,33E-02	3,7E-07	0,152	14,29	7,31E-05	65	4,89
100800	45818	46	0,87	8735	-2,03E-10	-20	3,33E-02	5,2E-07	0,152	14,29	1,04E-04	62	4,59
134400	44800	45	0,83	8275	-4,2E-11	-4	3,33E-02	4,2E-07	0,152	14,29	8,35E-05	59	4,34
168000	44211	44	0,78	7815	5,956E-11	6	3,33E-02	4,2E-07	0,152	14,29	8,35E-05	56	4,10
201600	42000	42	0,72	7239	1,534E-10	15	3,33E-02	5,2E-07	0,152	14,29	1,04E-04	53	3,80
235200	42000	42	0,68	6779	2,078E-10	21	3,33E-02	4,2E-07	0,152	14,29	8,35E-05	50	3,56
268800	42667	43	0,64	6377	2,442E-10	24	3,33E-02	3,7E-07	0,152	14,29	7,31E-05	48	3,35
302400	42592	43	0,59	5917	2,848E-10	28	3,33E-02	4,2E-07	0,152	14,29	8,35E-05	45	3,11
336000	35000	35	0,45	4479	4,83E-10	48	3,33E-02	1,3E-06	0,152	14,29	2,61E-04	37	2,35
369600	36960	37	0,42	4249	4,781E-10	48	3,33E-02	2,1E-07	0,152	14,29	4,18E-05	36	2,23
403200	38400	38	0,40	3961	4,858E-10	49	3,33E-02	2,6E-07	0,152	14,29	5,22E-05	34	2,08
436800	39351	39	0,36	3616	5,055E-10	51	3,33E-02	3,1E-07	0,152	14,29	6,27E-05	32	1,90
470400	40904	41	0,34	3386	5,076E-10	51	3,33E-02	2,1E-07	0,152	14,29	4,18E-05	31	1,78
504000	40976	41	0,29	2926	5,53E-10	55	3,33E-02	4,2E-07	0,152	14,29	8,35E-05	28	1,54
537600	42000	42	0,26	2639	5,711E-10	57	3,33E-02	2,6E-07	0,152	14,29	5,22E-05	26	1,39
571200	43273	43	0,24	2409	5,812E-10	58	3,33E-02	2,1E-07	0,152	14,29	4,18E-05	25	1,26
604800	44471	44	0,22	2179	5,943E-10	59	3,33E-02	2,1E-07	0,152	14,29	4,18E-05	24	1,14
638400	46261	46	0,21	2063	5,863E-10	59	3,33E-02	1E-07	0,152	14,29	2,09E-05	23	1,08
672000	48345	48	0,20	2006	5,685E-10	57	3,33E-02	5,2E-08	0,152	14,29	1,04E-05	23	1,05

705600	49690	50	0,18	1833	5,763E-10	58	3,33E-02	1,6E-07	0,152	14,29	3,13E-05	22	0,96
739200	50979	51	0,17	1661	5,867E-10	59	3,33E-02	1,6E-07	0,152	14,29	3,13E-05	21	0,87
772800	52571	53	0,15	1546	5,866E-10	59	3,33E-02	1E-07	0,152	14,29	2,09E-05	20	0,81
806400	53760	54	0,14	1373	6,023E-10	60	3,33E-02	1,6E-07	0,152	14,29	3,13E-05	19	0,72
840000	54902	55	0,12	1201	6,219E-10	62	3,33E-02	1,6E-07	0,152	14,29	3,13E-05	18	0,63
873600	56361	56	0,11	1086	6,295E-10	63	3,33E-02	1E-07	0,152	14,29	2,09E-05	17	0,57
907200	57783	58	0,10	971	6,4E-10	64	3,33E-02	1E-07	0,152	14,29	2,09E-05	17	0,51
940800	59544	60	0,09	913	6,349E-10	63	3,33E-02	5,2E-08	0,152	14,29	1,04E-05	16	0,48
974400	60522	61	0,07	741	6,718E-10	67	3,33E-02	1,6E-07	0,152	14,29	3,13E-05	15	0,39
1008000	62222	62	0,07	683	6,713E-10	67	3,33E-02	5,2E-08	0,152	14,29	1,04E-05	15	0,36
1041600	63902	64	0,06	626	6,727E-10	67	3,33E-02	5,2E-08	0,152	14,29	1,04E-05	15	0,33
1075200	65164	65	0,05	511	7,034E-10	70	3,33E-02	1E-07	0,152	14,29	2,09E-05	14	0,27
1108800	67200	67	0,05	511	6,821E-10	68	3,33E-02	0	0,152	14,29	0,00E+00	14	0,27
1142400	68407	68	0,04	396	7,231E-10	72	3,33E-02	1E-07	0,152	14,29	2,09E-05	13	0,21
1176000	69586	70	0,03	281	7,824E-10	78	3,33E-02	1E-07	0,152	14,29	2,09E-05	13	0,15
1209600	71574	72	0,03	281	7,606E-10	76	3,33E-02	0	0,152	14,29	0,00E+00	13	0,15
1243200	73129	73	0,02	223	7,905E-10	79	3,33E-02	5,2E-08	0,152	14,29	1,04E-05	12	0,12
1276800	74667	75	0,02	166	8,336E-10	83	3,33E-02	5,2E-08	0,152	14,29	1,04E-05	12	0,09
1310400	76632	77	0,02	166	8,122E-10	81	3,33E-02	0	0,152	14,29	0,00E+00	12	0,09
1344000	78596	79	0,02	166	7,919E-10	79	3,33E-02	0	0,152	14,29	0,00E+00	12	0,09
1377600	80561	81	0,02	166	7,726E-10	77	3,33E-02	0	0,152	14,29	0,00E+00	12	0,09
1411200	82526	83	0,02	166	7,542E-10	75	3,33E-02	0	0,152	14,29	0,00E+00	12	0,09
1444800	84000	84	0,01	108	8,174E-10	82	3,33E-02	5,2E-08	0,152	14,29	1,04E-05	12	0,06
1478400	85953	86	0,01	108	7,988E-10	80	3,33E-02	0	0,152	14,29	0,00E+00	12	0,06
0	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	1,00	10000		0	3,33E-02	2,1E-07	0,086	14,29	4,16E-05	0	-1,00
47600	33374	33	0,92	9194	-4,1E-10	-41	3,33E-02	3E-07	0,086	14,29	5,96E-05	0	-1,00
95200	52695	53	0,90	8979	-1,67E-10	-17	3,33E-02	7,9E-08	0,086	14,29	1,59E-05	0	-1,00
142800	48446	48	0,83	8335	-3,02E-11	-3	3,33E-02	2,4E-07	0,086	14,29	4,77E-05	0	-1,00
190400	44498	44	0,76	7583	5,432E-11	5	3,33E-02	2,8E-07	0,086	14,29	5,56E-05	0	-1,00
238000	44697	45	0,70	6992	9,63E-11	10	3,33E-02	2,2E-07	0,086	14,29	4,37E-05	0	-1,00
285600	44830	45	0,64	6401	1,282E-10	13	3,33E-02	2,2E-07	0,086	14,29	4,37E-05	0	-1,00
333200	44358	44	0,58	5756	1,593E-10	16	3,33E-02	2,4E-07	0,086	14,29	4,77E-05	0	-1,00
380800	44009	44	0,51	5111	1,877E-10	19	3,33E-02	2,4E-07	0,086	14,29	4,77E-05	0	-1,00
428400	42909	43	0,44	4359	2,244E-10	22	3,33E-02	2,8E-07	0,086	14,29	5,56E-05	0	-1,00
476000	43531	44	0,38	3822	2,448E-10	24	3,33E-02	2E-07	0,086	14,29	3,97E-05	0	-1,00
523600	44409	44	0,33	3339	2,626E-10	26	3,33E-02	1,8E-07	0,086	14,29	3,57E-05	0	-1,00
571200	44830	45	0,28	2802	2,883E-10	29	3,33E-02	2E-07	0,086	14,29	3,97E-05	0	-1,00

618800	46155	46	0,24	2425	3,023E-10	30	3,33E-02	1,4E-07	0,086	14,29	2,78E-05	0	-1,00
666400	46723	47	0,19	1942	3,324E-10	33	3,33E-02	1,8E-07	0,086	14,29	3,57E-05	0	-1,00
714000	48446	48	0,17	1673	3,425E-10	34	3,33E-02	9,9E-08	0,086	14,29	1,99E-05	0	-1,00
761600	48544	49	0,11	1136	3,999E-10	40	3,33E-02	2E-07	0,086	14,29	3,97E-05	0	-1,00
809200	50657	51	0,10	975	4,057E-10	41	3,33E-02	6E-08	0,086	14,29	1,19E-05	0	-1,00
856800	52086	52	0,07	706	4,415E-10	44	3,33E-02	9,9E-08	0,086	14,29	1,99E-05	0	-1,00
904400	54043	54	0,05	545	4,626E-10	46	3,33E-02	6E-08	0,086	14,29	1,19E-05	0	-1,00
952000	55623	56	0,03	330	5,211E-10	52	3,33E-02	7,9E-08	0,086	14,29	1,59E-05	0	-1,00
999600	57762	58	0,02	223	5,573E-10	56	3,33E-02	4E-08	0,086	14,29	7,94E-06	0	-1,00
1047200	60182	60	0,02	169	5,728E-10	57	3,33E-02	2E-08	0,086	14,29	3,97E-06	0	-1,00
1094800	62918	63	0,02	169	5,479E-10	55	3,33E-02	0	0,086	14,29	0,00E+00	0	-1,00
1142400	65297	65	0,01	115	5,769E-10	58	3,33E-02	2E-08	0,086	14,29	3,97E-06	0	-1,00
1190000	68017	68	0,01	115	5,538E-10	55	3,33E-02	0	0,086	14,29	0,00E+00	0	-1,00
1237600	70738	71	0,01	115	5,325E-10	53	3,33E-02	0	0,086	14,29	0,00E+00	0	-1,00
0	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	1,00	10000		0	1,11E-02	1,2E-07	0,152	4,762	1,16E-04	55	8,09
168000	336000	336	0,97	9660	-3,17E-11	-3	1,11E-02	5,2E-08	1,364	4,762	5,22E-05	53	7,82
336000	112000	112	0,80	7957	1,674E-12	0	1,11E-02	2,6E-07	1,364	4,762	2,61E-04	45	6,44
504000	100800	101	0,66	6595	1,244E-11	1	1,11E-02	2,1E-07	1,364	4,762	2,09E-04	38	5,34
672000	97391	97	0,53	5301	1,921E-11	2	1,11E-02	2E-07	1,364	4,762	1,98E-04	32	4,29
840000	95455	95	0,40	4007	2,549E-11	3	1,11E-02	2E-07	1,364	4,762	1,98E-04	26	3,24
1008000	90000	90	0,24	2373	3,704E-11	4	1,11E-02	2,5E-07	1,364	4,762	2,51E-04	18	1,92
1176000	90462	90	0,11	1147	5,053E-11	5	1,11E-02	1,9E-07	1,364	4,762	1,88E-04	12	0,93
1344000	95319	95	0,04	398	6,814E-11	7	1,11E-02	1,1E-07	1,364	4,762	1,15E-04	8	0,32
1512000	103208	103	0,00	24	1,172E-10	12	1,11E-02	5,7E-08	1,364	4,762	5,74E-05	6	0,02
0	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	1,00	10000		0	1,11E-02	2,9E-07	1,364	4,762	2,91E-04	93	9,00
168000	52500	53	0,87	8726	-1,33E-11	-1	1,11E-02	3,3E-07	1,364	4,762	3,34E-04	82	7,85
336000	37333	37	0,64	6416	2,115E-11	2	1,11E-02	6,1E-07	1,364	4,762	6,06E-04	63	5,77
504000	29302	29	0,32	3150	5,7E-11	6	1,11E-02	8,6E-07	1,364	4,762	8,56E-04	36	2,84
672000	33939	34	0,21	2115	6,078E-11	6	1,11E-02	2,7E-07	1,364	4,762	2,72E-04	27	1,90
840000	38182	38	0,12	1239	6,798E-11	7	1,11E-02	2,3E-07	1,364	4,762	2,30E-04	20	1,11
1008000	42000	42	0,04	442	8,772E-11	9	1,11E-02	2,1E-07	1,364	4,762	2,09E-04	13	0,40
1176000	47229	47	0,01	84	1,182E-10	12	1,11E-02	9,4E-08	1,364	4,762	9,40E-05	10	0,08
1344000	53546	54	0,00	4	1,723E-10	17	1,11E-02	2,1E-08	1,364	4,762	2,09E-05	9	0,00

Приложение Д

Экономика

Продукт	Цена, руб/кг	Цена сырья руб/кг	Выход на 1кг	Себестоимость в сырье, руб/кг	Стоимость энергии, руб/кг	Дельта, руб/кг
Свекла сушеная кубик 5*5	350	9	0,12	75	35	240
Картофель сушеный	170	14	0,21	66	36,5	68
Марковь сушеная 2–4	260	10	0,15	67	43	150
Яблоко сушеное кольцо без кожуры	440	40	0,11	364	34	42
Яблоко сушеное (Кубики) 5–7мм	285	40	0,15	267	34	-16
Яблоко сушеное	70	5	0,2	25	34	11
а стограммовой упаковки ассорти из фруктовых чипсов – 390 рублей.	3900	40	0,08	500	35	3365
Лук сушеный	110	14	0,2	70	35	5

Приложение Е

Акт производственных испытаний ленточной установки для обезвоживания растительного сырья в электромагнитном поле в ООО «БОРИС-АГРО»

"БОРИС-АГРО"
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

295021, РК, г. Симферополь, ул. Севастопольская, 114, к.104
тел. (3652) 44 -10 -98; 54-16-01
р /сч 40702810540130000037 в РНКБ (ПАО), БИК 043510607
ИНН 9109002098, КПП 910201001, ОГРН 1149102044783
e-mail:boragro@yandex.ru

УТВЕРЖДАЮ
Директор
ООО «Борис-Агро»
Передрий В.З.
«25» сентября 2023г.

Акт
производственных испытаний ленточной установки
для обезвоживания растительного сырья в электромагнитном поле

Производственные испытания ленточной установки для обезвоживания растительного сырья электромагнитным полем проводили на экспериментальной установке в присутствии комиссии в составе:
Дубинин Владимир Владимирович, главный инженер ООО «Борис-Агро» (председатель комиссии);
Павлова Наталья Константиновна, заведующая током ООО «Борис-Агро» (член комиссии);
Гербер Юрий Борисович (зам. директора Института «Агротехнологическая академия», заведующий кафедрой технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства, д.т.н., проф., член комиссии);
Дударев Дмитрий Петрович (зам. директора по научной работе Института «Агротехнологическая академия», к.с.-х.н., доц., член комиссии);
Гаврилов Александр Викторович (доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства, к.т.н., доц., член комиссии).

Экспериментальная опытно-промышленная ленточная установка для обезвоживания растительного сырья электромагнитным полем МВ и ИК (рисунок 1) предназначена для реализации непрерывного процесса сушки плодов и овощей.

Установка представляет собой ленточный транспортер, на котором размещены СВЧ и ИК модули. СВЧ модуль (1) состоит из магнетрона, волновода, резонаторной камеры, вентилятора и высоковольтного трансформатора. Модуль решает задачи передачи энергии продукту и отвода водяных паров из внутреннего пространства сушилки. Модуль ИК-обработки (2) содержит два кварцевых ИК-излучателя, расположенных на расстоянии 13 см от поверхности ленты транспортера. Мощность излучателей регулируется тиристорными регуляторами напряжения в диапазоне от 0 до 1100 Вт.

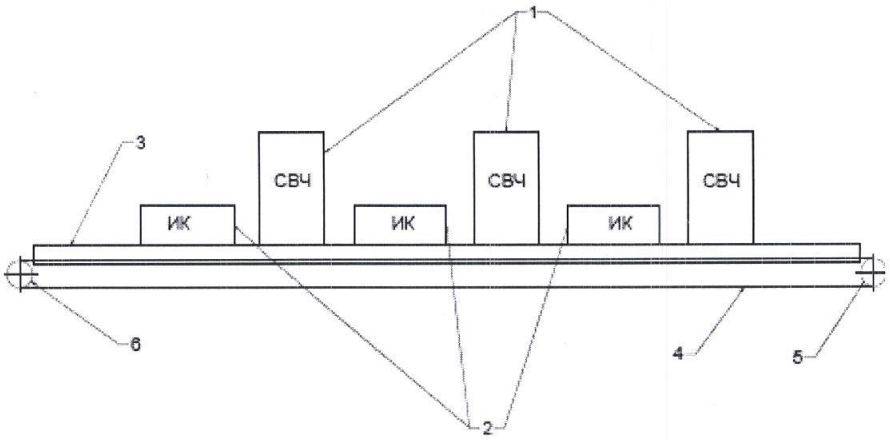


Рис. 1. Экспериментальная опытно-промышленная ленточная сушилка.
1 – СВЧ-модули, 2 – ИК-модули, 3 – радионепрозрачный канал, 4 – лента, 5 – приводной барабан, 6 –натяжной барабан.

Лента приводится в движение электродвигателем Oriental Motor 6 – 90 W, с регулируемым количеством оборотов, что позволяет изменять скорость движения ленты в широком диапазоне от 0 до 35 мм/с.

Конструкция канала, выполненного в виде запредельного волновода, обеспечивает отсутствие СВЧ-излучения снаружи установки через места загрузки и разгрузки продукта

Особенностью ленточной сушилки является то, что нагрев подвижного слоя сырья осуществляется за счет воздействия микроволнового и инфракрасного электромагнитного поля на влагу находящуюся в материале. Удаление влаги, которая улетучивается с поверхности зерновки вследствие микроволнового и инфракрасного нагрева, производится при помощи воздушного потока, транспортирующего влагу за пределы сушильных камер.

Благодаря особенностям микроволнового нагрева (объемность, избирательность, скорость) обеспечивается высокая производительность, а также сохранение полезных качеств и биологических характеристик сырья.

Расчетная производительность экспериментальной установки 5-8 кг/час, при понижении влажности с 25 до 14%. Перед началом каждого испытания устанавливается заданный режим работы: мощность извлечения для каждой из шести камер, производительность установки и скорость движения ленты конвейера. В ходе испытаний контролировалась температура зернового слоя во избежание повышения предельно допустимых для зерна температур – 45 ^{0}С. Испытания проводились на подсолнечнике и кукурузе.

Результаты испытаний экспериментальной ленточной установки для обезвоживания растительного сырья в электромагнитном поле показывают, что применение микроволнового и инфракрасного сушильного оборудования позволит получить высокопроизводительный экологически чистый технологический процесс, гарантирующий высокое сохранение исходных качественных характеристик высушенного сырья при сравнительных показателях энергоемкости процесса.

Таблица 1 – Результаты испытаний на ленточной сушилке

№	Продукт	Тип энергоподвода	Рекомендуемые параметры			Энергозатраты МДж/кг	Влагосодержание	
			Мощность, кВт/м^2	Загрузка ленты кг/м^2	Скорость ленты м/с		Начальное, %	Конечное, %
1	Кукуруза	ИК	27,51	3,96	0,0071	2,92	21,1	13,9
		СВЧ	7,5	3,96	0,025	2,82	21,1	12,6
2	Подсолнечник	ИК	7,33	3,6	0,025	2,96	21,0	13,1
		СВЧ	7,5	3,6	0,025	3,08	21,0	13,2

Решение комиссии

Разработанную ленточную установку для обезвоживания растительного сырья электромагнитным полем принять к внедрению. Установка при допустимых затратах энергии на процесс сушки обеспечивает высокое качество обрабатываемого продукта при сохранении его экологической чистоты.

Председатель комиссии _____ В.В. Дубинин

Члены комиссии: _____ Н.К. Павлова

_____ Ю.Б. Гербер

_____ Д.П. Дударев

_____ А.В. Гаврилов

Приложение Ж

Акт производственных испытаний ленточной установки для обезвоживания растительного сырья в электромагнитном поле в ИП КФХ «Шаботенко А.А.»

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель
ИП КФХ «Шаботенко А.А.»
Шаботенко А.А.
«31» 08 2022 г.

АКТ

производственных испытаний ленточной установки
для обезвоживания растительного сырья в электромагнитном поле

Производственные испытания ленточной установки для обезвоживания растительного сырья электромагнитным полем проводили на экспериментальной установке в присутствии комиссии в составе:
Шаботенко Александр Владимирович, главный инженер (председатель комиссии);
Белый Александр Николаевич, тракторист (член комиссии);
Гербер Юрий Борисович (зам. директора Института «Агротехнологическая академия», заведующий кафедрой технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства, д.т.н., проф., член комиссии);
Дударев Дмитрий Петрович (зам. директора по научной работе Института «Агротехнологическая академия», к.с.-х.н., доц., член комиссии);
Гаврилов Александр Викторович (доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства, к.т.н., доц., член комиссии).

Экспериментальная опытно-промышленная ленточная установка для обезвоживания растительного сырья электромагнитным полем МВ и ИК (рисунок 1) предназначена для реализации непрерывного процесса сушки плодов и овощей.

Установка представляет собой ленточный транспортер, на котором размещены СВЧ и ИК модули. СВЧ модуль (1) состоит из магнетрона, волновода, резонаторной камеры, вентилятора и высоковольтного трансформатора. Модуль решает задачи передачи энергии продукту и отвода водяных паров из внутреннего пространства сушилки. Модуль ИК-обработки (2) содержит два кварцевых ИК-излучателя, расположенных на расстоянии 13 см от поверхности ленты транспортера. Мощность излучателей регулируется тиристорными регуляторами напряжения в диапазоне от 0 до 1100 Вт.

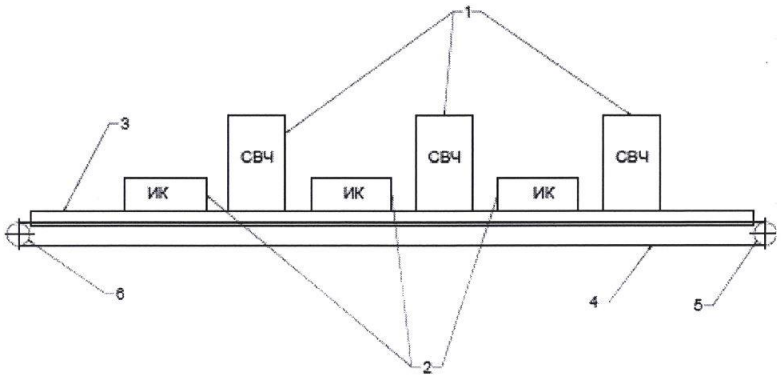


Рис. 1. Экспериментальная опытно-промышленная ленточная сушилка.
1 – СВЧ-модули, 2 – ИК-модули, 3 – радионепрозрачный канал, 4 – лента, 5 – приводной барабан, 6 –натяжной барабан.

Лента приводится в движение электродвигателем Oriental Motor 6 – 90 W, с регулируемым количеством оборотов, что позволяет изменять скорость движения ленты в широком диапазоне от 0 до 35 мм/с.

Конструкция канала, выполненного в виде запредельного волновода, обеспечивает отсутствие СВЧ-излучения снаружи установки через места загрузки и разгрузки продукта

Особенностью ленточной сушилки является то, что нагрев подвижного слоя сырья осуществляется за счет воздействия микроволнового и инфракрасного электромагнитного поля на влагу находящуюся в материале. Удаление влаги, которая улетучивается с поверхности зерновки вследствие микроволнового и инфракрасного нагрева, производится при помощи воздушного потока, транспортирующего влагу за пределы сушильных камер.

Расчетная производительность экспериментальной установки 5 кг/ч, при снижении влажности с 85 до 12%. Перед началом каждого испытания устанавливается заданный режим работы: мощность извлечения для каждой из шести камер, производительность установки, скорость движения ленты конвейера. В ходе испытаний контролировалась температура слоя продукта во избежание повышения предельно допустимых температур. Испытания проводились в линии производства сушеных яблок (моркови, картофеля, свеклы, тыквы, лука).

Результаты испытаний экспериментальной ленточной установки для обезвоживания растительного сырья в электромагнитном поле показывают, что применение микроволнового и инфракрасного сушильного оборудования позволит получить высокопроизводительный экологически чистый технологический процесс, гарантирующий высокое сохранение исходных качественных характеристик высушенного сырья при показателях энергоемкости процесса около 4 МДж/кг удаленной влаги.

Таблица 1 – Результаты испытаний на ленточной сушилке

№	Продукт	Тип энергии	Рекомендованные параметры			Энерго затраты МДж/кг	Влажность	
			Мощность, кВт	Производи-тельность, кг/с	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					

Решение комиссии

Разработанную ленточную установку для обезвоживания растительного сырья электромагнитным полем принять к внедрению. Установка при допустимых затратах энергии на процесс сушки обеспечивает высокое качество обрабатываемого продукта при сохранении его экологической чистоты.

Председатель комиссии _____ Шаботенко А.В.

Члены комиссии: _____ Белый А.Н.

_____ Ю.Б. Гербер

_____ Д.П. Дударев

_____ А.В. Гаврилов

Приложение И

Акт производственных испытаний ленточной установки для обезвоживания растительного сырья в электромагнитном поле в ООО «Сады Бахчисарая»

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Сады Бахчисарая»
Кезик Е.В.
«02» мая 2023 г.

АКТ

производственных испытаний ленточной установки
для обезвоживания растительного сырья в электромагнитном поле

Производственные испытания ленточной установки для обезвоживания растительного сырья электромагнитным полем проводили на экспериментальной установке в присутствии комиссии в составе:
Чернов Александр Борисович, (главный инженер, председатель комиссии);
Вокуев Денис Алексеевич, (главный агроном, член комиссии);
Климчук Юрий Владимирович, (инженер-мелиоратор, член комиссии);
Гербер Юрий Борисович (зам. директора Института «Агротехнологическая академия», заведующий кафедрой технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства, д.т.н., проф., член комиссии);
Дударев Дмитрий Петрович (зам. директора по научной работе Института «Агротехнологическая академия», к.с.-х.н., доц., член комиссии);
Гаврилов Александр Викторович (доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства, к.т.н., доц., член комиссии);
Омельчук Владимир Иванович (доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства, к.с.-х.н., доц., член комиссии).

Экспериментальная опытно-промышленная ленточная установка для обезвоживания растительного сырья электромагнитным полем МВ и ИК (рисунок 1) предназначена для реализации непрерывного процесса сушки плодов и овощей.

Установка представляет собой ленточный транспортер, на котором размещены СВЧ и ИК модули. СВЧ модуль (1) состоит из магнетрона, волновода, резонаторной камеры, вентилятора и высоковольтного трансформатора. Модуль решает задачи передачи энергии продукту и отвода водяных паров из внутреннего пространства сушилки. Модуль ИК-обработки (2) содержит два кварцевых ИК-излучателя, расположенных на расстоянии 13 см от поверхности ленты транспортера. Мощность излучателей регулируется тиристорными регуляторами напряжения в диапазоне от 0 до 1100 Вт.

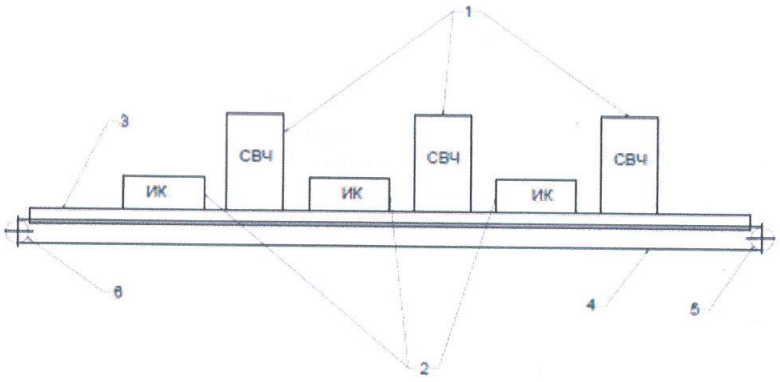


Рис. 1. Экспериментальная опытно-промышленная ленточная сушилка.
1 – СВЧ-модули, 2 – ИК-модули, 3 – радионепрозрачный канал, 4 – лента, 5 – приводной барабан, 6 –натяжной барабан.

Лента приводится в движение электродвигателем Oriental Motor 6 – 90 W, с регулируемым количеством оборотов, что позволяет изменять скорость движения ленты в широком диапазоне от 0 до 35 мм/с.

Конструкция канала, выполненного в виде запредельного волновода, обеспечивает отсутствие СВЧ-излучения снаружи установки через места загрузки и разгрузки продукта

Особенностью ленточной сушилки является то, что нагрев подвижного слоя сырья осуществляется за счет воздействия микроволнового и инфракрасного электромагнитного поля на влагу находящуюся в материале. Удаление влаги, которая улетучивается с поверхности зерновки вследствие микроволнового и инфракрасного нагрева, производится при помощи воздушного потока, транспортирующего влагу за пределы сушильных камер.

Расчетная производительность экспериментальной установки 5 кг/ч, при снижении влажности с 85 до 12%. Перед началом каждого испытания устанавливается заданный режим работы: мощность извлечения для каждой из шести камер, производительность установки, скорость движения ленты конвейера. В ходе испытаний контролировалась температура слоя продукта во избежание повышения предельно допустимых температур. Испытания проводились в линии производства сушеных яблок (моркови, картофеля, свеклы, тыквы, лука).

Результаты испытаний экспериментальной ленточной установки для обезвоживания растительного сырья в электромагнитном поле показывают, что применение микроволнового и инфракрасного сушильного оборудования позволит получить высокопроизводительный экологически чистый технологический процесс, гарантирующий высокое сохранение исходных качественных характеристик высушенного сырья при показателях энергоемкости процесса около 4 МДж/кг удаленной влаги.

Таблица 1 – Результаты испытаний на ленточной сушилке

№	Продукт	Тип энергии	Рекомендованные параметры			Энерго затраты МДж/кг	Влажность	
			Мощность, кВт	Производи-тельность, кг/с	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					

Решение комиссии

Разработанную ленточную установку для обезвоживания растительного сырья электромагнитным полем принять к внедрению. Установка при допустимых затратах энергии на процесс сушки обеспечивает высокое качество обрабатываемого продукта при сохранении его экологической чистоты.

Председатель комиссии _____ А.Б. Чернов

Члены комиссии:

_____ Д.А. Вокуев

_____ Ю.В. Климчук

_____ Ю.Б. Гербер

_____ Д.П. Дударев

_____ А.В. Гаврилов

_____ В.И. Омельчук

Приложение К

Акт производственных испытаний ленточной установки для обезвоживания растительного сырья в электромагнитном поле в АО «Крымская фруктовая компания»

УТВЕРЖДАЮ:
Исполнительный директор
Акционерного общества
«КРЫМСКАЯ ФРУКТОВАЯ КОМПАНИЯ»
_____ А.В. Берегельская-Фещук
«___» _____ 2023 г.

АКТ

производственных испытаний ленточной установки
для обезвоживания растительного сырья в электромагнитном поле

Производственные испытания ленточной установки для обезвоживания растительного сырья электромагнитным полем проводили на экспериментальной установке в присутствии комиссии в составе:
Потужный Александр Николаевич, главный инженер (председатель комиссии);
Нагорная Елена Николаевна, заведующий складом сортировки и хранения (член комиссии);
Слюсарь Евгений Анатольевич, технолог (член комиссии);
Гербер Юрий Борисович (зам. директора Института «Агротехнологическая академия», заведующий кафедрой технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства, д.т.н., проф., член комиссии);
Дударев Дмитрий Петрович (зам. директора по научной работе Института «Агротехнологическая академия», к.с.-х.н., доц., член комиссии);
Гаврилов Александр Викторович (доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства, к.т.н., доц., член комиссии).

Экспериментальная опытно-промышленная ленточная установка для обезвоживания растительного сырья электромагнитным полем МВ и ИК (рисунок 1) предназначена для реализации непрерывного процесса сушки плодов и овощей.

Установка представляет собой ленточный транспортер, на котором размещены СВЧ и ИК модули. СВЧ модуль (1) состоит из магнетрона, волновода, резонаторной камеры, вентилятора и высоковольтного трансформатора. Модуль решает задачи передачи энергии продукту и отвода водяных паров из внутреннего пространства сушилки. Модуль ИК-обработки (2) содержит два кварцевых ИК-излучателя, расположенных на расстоянии 13 см от поверхности ленты транспортера. Мощность излучателей регулируется тиристорными регуляторами напряжения в диапазоне от 0 до 1100 Вт.

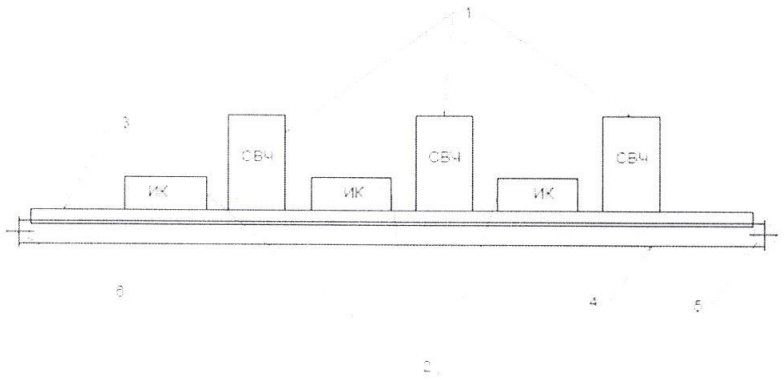


Рис. 1. Экспериментальная опытно-промышленная ленточная сушилка.
1 – СВЧ-модули, 2 – ИК-модули, 3 – радионепрозрачный канал, 4 – лента, 5 – приводной барабан, 6 –натяжной барабан.

Лента приводится в движение электродвигателем Oriental Motor 6 – 90 W, с регулируемым количеством оборотов, что позволяет изменять скорость движения ленты в широком диапазоне от 0 до 35 мм/с.

Конструкция канала, выполненного в виде запредельного волновода, обеспечивает отсутствие СВЧ-излучения снаружи установки через места загрузки и разгрузки продукта

Особенностью ленточной сушилки является то, что нагрев подвижного слоя сырья осуществляется за счет воздействия микроволнового и инфракрасного электромагнитного поля на влагу находящуюся в материале. Удаление влаги, которая улетучивается с поверхности зерновки вследствие микроволнового и инфракрасного нагрева, производится при помощи воздушного потока, транспортирующего влагу за пределы сушильных камер.

Расчетная производительность экспериментальной установки 5 кг/ч, при снижении влажности с 85 до 12%. Перед началом каждого испытания устанавливается заданный режим работы: мощность извлечения для каждой из шести камер, производительность установки, скорость движения ленты конвейера. В ходе испытаний контролировалась температура слоя продукта во избежание повышения предельно допустимых температур. Испытания проводились в линии производства сушеных яблок (моркови, картофеля, свеклы, тыквы, лука).

Результаты испытаний экспериментальной ленточной установки для обезвоживания растительного сырья в электромагнитном поле показывают, что применение микроволнового и инфракрасного сушильного оборудования позволит получить высокопроизводительный экологически чистый технологический процесс, гарантирующий высокое сохранение исходных качественных характеристик высушенного сырья при показателях энергоемкости процесса около 4 МДж/кг удаленной влаги.

Таблица 1 – Результаты испытаний на ленточной сушилке

№	Продукт	Тип энергии	Рекомендованные параметры			Энерго затраты МДж/кг	Влажность	
			Мощность, кВт	Производи-тельность, кг/с	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					

Решение комиссии

Разработанную ленточную установку для обезвоживания растительного сырья электромагнитным полем принять к внедрению. Установка при допустимых затратах энергии на процесс сушки обеспечивает высокое качество обрабатываемого продукта при сохранении его экологической чистоты.

Председатель комиссии _____ А.Н. Потужный

Члены комиссии: _____ Е.Н. Нагорная

_____ Е.А. Слюсарь

_____ Ю.Б. Гербер

_____ Д.П. Дударев

_____ А.В. Гаврилов

Приложение Л

Акт производственных испытаний микроволновой вакуум-выпарной установки в ООО «ЮГ-МОЛОКО»

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ЮГ МОЛОКО»
296200, Республика Крым, Раздольненский район, пгт. Раздольное, ул. Л.Рябики, дом 10/13, литер. Н, каб. 35
ИНН 9102222288, КПП 910601001, Р/С 40702810700001015253, АО «БАНК ЧБРР»
г. Симферополь, БИК 043510101, корр/сч 30101810035100000101

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «ЮГ МОЛОКО»
_____Димитров В.И.
МП «__11__» _____**марта**_____ 2022__ г.

АКТ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ МИКРОВОЛНОВОЙ ВАКУУМ ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ

Мы, нижеподписавшиеся, представители ООО «ЮГ МОЛОКО»: Председатель комиссии - Шаповалова Л.Р. , члены комиссии: начальник лаборатории Шаталова В.А. , мастер цеха по производству сухого молока Билык Д.Т., механик цеха СОМ Гурин О.Л. аппаратчик ваккум-выпарной установки цеха СОМ Чуприна О.С. и представители Института «Агротехнологическая академия: **Гербер Юрий Борисович** (зам. директора, заведующий кафедрой технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства, д.т.н., проф., член комиссии); **Дударев Дмитрий Петрович** (зам. директора по научной работе, к.с.-х.н., доц., член комиссии); **Гаврилов Александр Викторович** (доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства, к.т.н., доц., член комиссии) составили этот акт о том, что с __31.01.2022_____ по ____10.03.2022_____ года на предприятия была проведена промышленная апробация (были проведены производственные испытания) опытного образца микроволновой вакуум-выпарной установки.

Разработанная микроволновая вакуум-выпарная установка имеет модульную структуру, основным элементом которой являются типовые модули с микроволновым генератором. Количество и компоновка модулей подбирается в соответствии с заданной производительностью и степенью концентрирования продукта.

Основой конструкции модуля является цилиндрический корпус (3) изготовленный из радионепроницаемого металла. В корпусе имеется специальное окно для магнетрона (6), микроволновая энергия которого воздействует на сырье через радиопрозрачный корпус (5), выполненный из тефлона. 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).

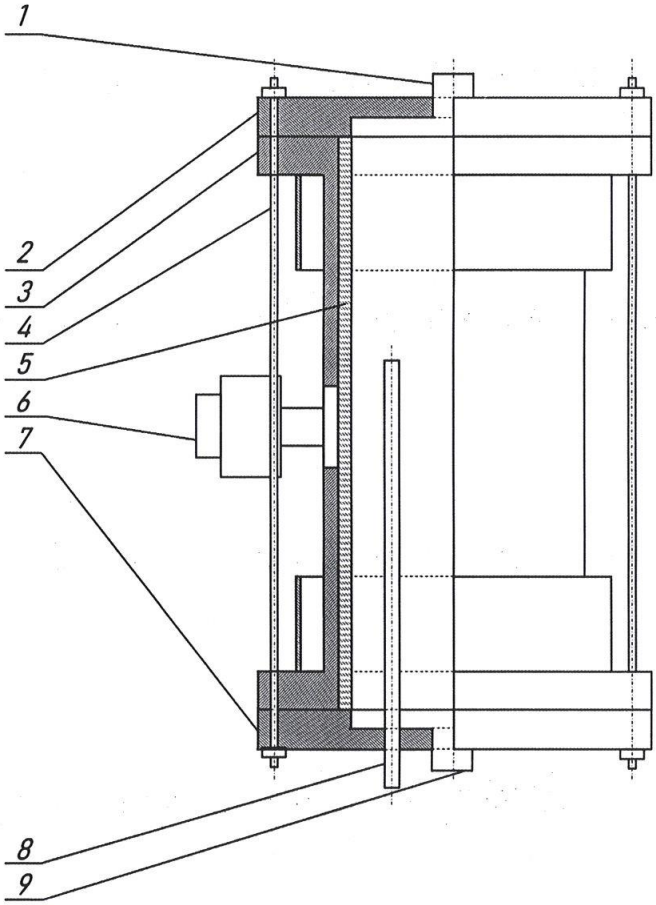


Рис. 1. – Схема конструкции микроволнового вакуум-выпарного модуля

Для производственных испытаний была реализована схема, состоящая из 10 модулей и обеспечивающая 3х кратное повышение концентрации сухих веществ в продукте (рис. 2).

Установка содержит накопительную емкость, вакуум-насос, патрубок подачи раствора 3, систему электромагнитных вентилей 4, емкость для сбора концентрата 5. Сами модули собраны группами в двух горизонтальных уровнях. На первом уровне обеспечивается 2х кратное увеличение концентрации. Производительность по сырью устанавливается количеством модулей первого уровня. Для испытаний на первом уровне было установлено 8 модулей М2У-10 суммарной производительностью 16,4 кг/ч. На втором уровне установлено еще 2 модуля М2У-09.

Для конденсации вторичного пара установка снабжена поверхностным конденсатором площадью 1,5 м^2 и ёмкостью для сбора конденсата (на схеме не показаны).

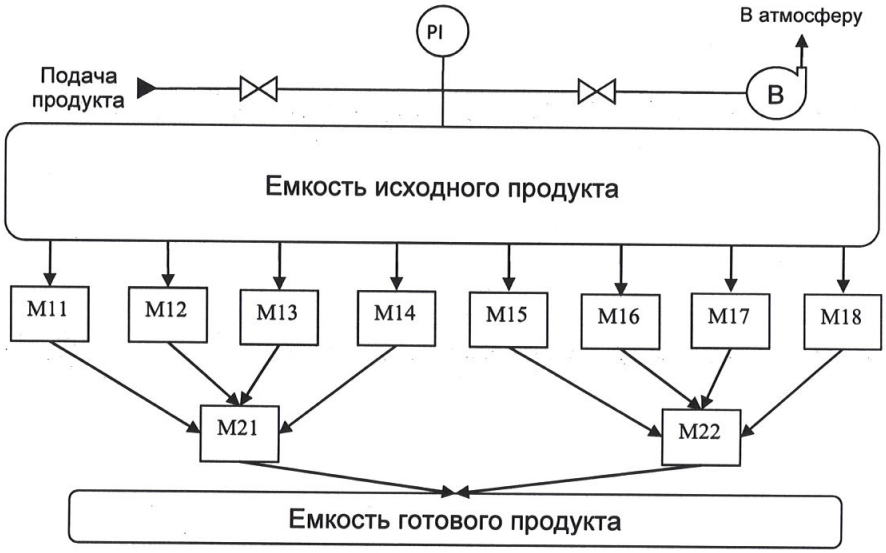


Рис. 2. Принципиальная схема вакуум-выпарной установки с микроволновыми модулями с равными мощностями генераторов

1. Основания для проведения работы.

Программа и методика исследований.

Руководство по эксплуатации.

2. Цель проведения исследований.

Отработка режимов, обеспечивающих создание функционального продукта с заданными показателями. Подтверждение возможности использования разработанного оборудования для технологии производства концентрированного сгущенного молока. Проверка удельных затрат энергии на выпаривание в исследуемом оборудовании.

3. Назначение оборудования.

Микроволновая вакуумная выпарная установка предназначена для удаления влаги из растворов.

4. Основные технические характеристики вакуумной сушилки.

Таблица 1. Основные технические характеристики установки

	Параметр	**Значение**
1	Потребляемая мощность, кВт	9,8
2	Количество модулей, шт.	10
3	Паропроизводительность, кг/ч	10
4	Давление в камере, кПа	5 - 15
5	Температура охлаждающей воды, ^{0}C	4 - 20

5. Контроль технологического процесса.

В процессе проведения испытаний температуру контролировали с помощью измерительно-вычислительного комплекса. Вакуум в системе контролируется образцовым вакуумметром. Массовая паропроизводительность фиксировалась по весу удаленного конденсата.

6. Проведение испытаний

В соответствии с программой испытаний было концентрировано 100 кг молока до конечной концентрации 33%. Масса концентрированного молока составила 39,4 кг. Удельные энергозатраты на производство концентрированного молока составили 1,55 кВт·ч/кг. Испытания проводились при максимальном уровне подводимой мощности и минимальном давлении (10 кПа) Температура продукта в процессе концентрирования не превышала 60 °С. В течение всего процесса поддерживался постоянный уровень продукта в модулях.

7. Выводы и рекомендации.

В результате проведенных испытаний показана возможность использования разработанного оборудования для производства концентрированного сгущенного молока. Доказана возможность организации объемного подвода энергии в процессе выпаривания.

Целесообразно рассмотреть возможность использования микроволновой вакуумной установки для производства сухого молока.

Председатель комиссии: _____ Шаповалова Л.Р.

Члены комиссии:

_____ / Шаталова В.А.

_____ / Билык Д.Т.

_____ / Гурин О.Л.

_____ / Чуприна О.С.

_____ / Гербер Ю.Б.

_____ / Дударев Д.П.

_____ / Гаврилов А.В.

Приложение М

Акт производственных испытаний микроволновой вакуум-выпарной установки в ООО «ДК «Мегатрейд-Юг»

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель (зам. руководителя)
ООО «ДК «Мегатрейд-Юг»
Оболенцев Ю.Г.
МП «__» ____ 2023 г.

АКТ

ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ МИКРОВОЛНОВОЙ ВАКУУМ ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ

Мы, нижеподписавшиеся, представители ООО «ДК «Мегатрейд-Юг»: Устинов Юрий Иванович, начальник производства (в промышленности) завода ООО «ДК «Мегатрейд-Юг» (председатель комиссии); Гончаров Александр Николаевич, главный механик завода ООО «ДК «Мегатрей-Юг», и представители Института «Агротехнологическая академия: **Гербер Юрий Борисович** (зам. директора, заведующий кафедрой технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства, д.т.н., проф., член комиссии); **Гаврилов Александр Викторович** (доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства, к.т.н., доц., член комиссии) составили этот акт о том, что на предприятии была проведена промышленная апробация (были проведены производственные испытания) опытного образца микроволновой вакуум-выпарной установки.

Разработанная микроволновая вакуум-выпарная установка имеет модульную структуру основным элементом которой являются типовые модули с микроволновым генератором. Количество и компоновка модулей подбирается в соответствии с заданной производительностью и степенью концентрирования продукта (рис. 1).

Основой конструкции модуля является цилиндрический корпус (3) изготовленный из радионепроницаемого металла. В корпусе имеется специальное окно для магнетрона (6), микроволновая энергия которого воздействует на сырье через радиопрозрачный корпус (5), выполненный из тефлона. 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).

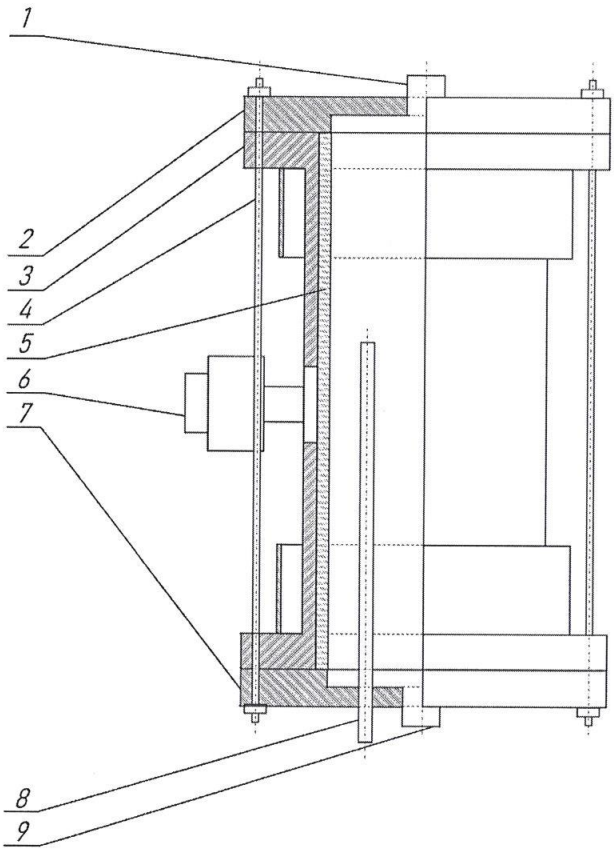


Рис. 1. – Схема конструкции микроволнового вакуум-выпарного модуля

Для производственных испытаний была реализована схема, состоящая из 10 модулей и обеспечивающая 2х кратное повышение концентрации сухих веществ в продукте (рис. 2).

Установка содержит накопительную емкость, вакуум-насос, патрубок подачи раствора 3, систему электромагнитных вентилей 4, емкость для сбора концентрата 5. Сами модули собраны группами в двух горизонтальных уровнях. На первом уровне обеспечивается 1,7 кратное увеличение концентрации. Производительность по сырью устанавливается количеством модулей первого уровня. Для испытаний на первом уровне было установлено 8 модулей М2У-10 суммарной производительностью 20,48 кг/ч. На втором уровне установлено еще 2 модуля М2У-10.

Для конденсации вторичного пара установка снабжена поверхностным конденсатором площадью 1,5 м^2 и ёмкостью для сбора конденсата (на схеме не показаны).

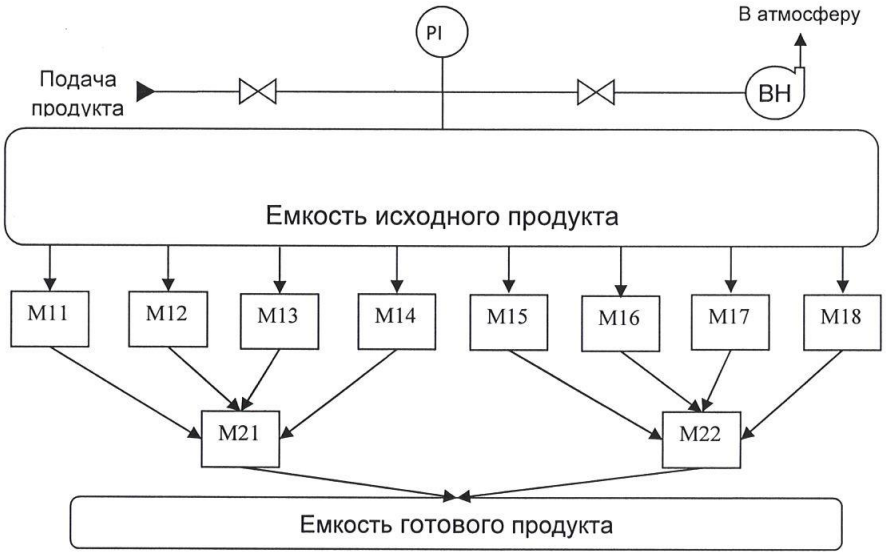


Рис. 2. Принципиальная схема вакуум-выпарной установки с микроволновыми модулями с равными мощностями генераторов

1. Основания для проведения работы.

Программа и методика исследований.

Руководство по эксплуатации.

2. Цель проведения исследований:

Отработка режимов, обеспечивающих создание функционального продукта с заданными показателями. Подтверждение возможности использования разработанного оборудования для технологии производства концентрированного сгущенного молока. Проверка удельных затрат энергии на выпаривание в исследуемом оборудовании.

3. Назначение оборудования.

Микроволновая вакуумная выпарная установка предназначена для удаления влаги из растворов.

4. Основные технические характеристики вакуумной сушилки.

Таблица 1. Основные технические характеристики установки

	Параметр	**Значение**
1	Потребляемая мощность, кВт	9,8
2	Количество модулей, шт.	10

3	Паропроизводительность, кг/ч	10
4	Давление в камере, кПа	5 - 15
5	Температура охлаждающей воды, ^{0}C	4 - 20

5. Контроль технологического процесса.

В процессе проведения испытаний температуру контролировали с помощью измерительно-вычислительного комплекса. Вакуум в системе контролируется образцовым вакуумметром. Массовая паропроизводительность по фиксировалась по весу удаленного конденсата.

6. Проведение испытаний

В соответствии с программой испытаний за смену было концентрировано 164 кг молока до конечной концентрации 26%. Масса сгущенного молока составила 42 кг. Удельные энергозатраты на производство сгущенного молока составили 1,6 кВт·ч/кг. Испытания проводились при максимальном уровне подводимой мощности и минимальном давлении (10 кПа) Температура продукта в процессе концентрирования не превышала 60 °С. В течение всего процесса поддерживался постоянный уровень продукта в модулях.

7. Выводы и рекомендации.

В результате проведенных испытаний показана возможность использования разработанного оборудования для производства сгущенного молока.

Доказана возможность организации объемного подвода энергии в процессе выпаривания.

Целесообразно рассмотреть возможность использования микроволновой вакуумной установки для производства сухого молока.

Председатель комиссии _____ Ю.И. Устинов

Члены комиссии: _____ А.Н. Гончаров

_____ Ю.Б. Гербер

_____ А.В. Гаврилов

Приложение Н

Техническое задание на изготовление сверхвысокочастотной вакуум-выпарной установки непрерывного действия производительностью 20 кг/ч СВЧ ВВУ-20

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»
(ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»)

Институт «Агротехнологическая академия»

СОГЛАСОВАНО
Директор Института
«Агротехнологическая академия»

_____Рогозенко А.В.

«25» 06 2024 г.

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной деятельности
ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»

_____Любомирский Н.В.

«27» 06 2024 г.

РАЗРАБОТАНО
Институт «Агротехнологическая академия»

_____Гербер Ю.Б.

_____Гаврилов А. В.

Сверхвысокочастотная вакуум-выпарная установка непрерывного действия производительностью 20 кг/ч СВЧ ВВУ – 20

Техническое задание

(на 13 листах)

Симферополь 2024

1. НАИМЕНОВАНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ.

1.1. Сверхвысокочастотная вакуум-выпарная установка непрерывного действия производительностью 20 кг/ч (именуемая в дальнейшем – установка) предназначается для осуществления операции выпаривания пищевых растворов и применяется на заводах, производящих пищевые концентраты.

1.2. По техническому уровню установка должна соответствовать мировому уровню в области устройств для выпаривания растворов в пищевой промышленности.

2. ОСНОВАНИЕ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ.

2.1. Разработка установки ведется на основании Плана научно-исследовательской работы, выполняемой на инициативной основе факультета механизации и пищевых технологий на 2020-2024 гг.

Направление НИР факультета: 4 Научные основы и инновационные решения в механизации и роботизации производства и технологиях переработки сельскохозяйственной продукции.

3. ЦЕЛЬ И НАЗНАЧЕНИЕ РАЗРАБОТКИ.

3.1. Цель разработки – создание установки, позволяющей проводить технологические операции выпаривания пищевых растворов на современном техническом уровне и с меньшими затратами времени, энергетических и материальных ресурсов.

3.2. Данная установка разрабатывается впервые.

4. ИСТОЧНИКИ РАЗРАБОТКИ.

4.1. Разработка ведется с учетом:

1) результатов научно-исследовательских работ, проведенных в Институте «Агротехнологическая академия» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» в 2017-2024 г.г.

2) отчета о патентных исследованиях ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского, 2024 г.

5 ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ.

5.1.Установка должна соответствовать требованиям ГОСТ 26582-85 «Машины и оборудование продовольственные. Общие технические требования», ГОСТ 12.2.124-2013 «Оборудование продовольственное. Общие требования безопасности» и указанным ниже требованиям.

5.2. Состав изделия и требования к конструктивному устройству.

5.2.1. Установка должна состоять из следующих изделий:

1) резонаторной шахты.....1 шт.;

2) радиопрозрачного реактора.....1 шт.;

3) электромагнитных аппликаторов микроволнового диапазона.....6 шт.;

4) верхнего фланца со штуцером для вакуумирования и выхода вторичного пара.....1 шт.;

5) нижнего фланца с двумя штуцерами для подачи исходного сырья и выгрузки конечного продукта.....1 шт.;

6) конденсатора-охладителя.....1 шт.;

7) водоохладителя.....1 шт.;

8) насоса для подачи охлаждающей воды в конденсатор-охладитель.....1 шт.;

9) компрессорно-конденсационной установки.....1 шт.;

10) вакуум-насоса.....1 шт.;

11) резервуара для исходного сырья.....1 шт.;

12) резервуара для готового продукта.....1 шт.;

13) резервуара для гидролата.....1 шт.;

14) системы трубопроводов с арматурой.....1 комплект;

15) системы управления, контроля и сигнализации.....1 комплект.

Схема условного обозначения установки:

- XXX XXX - X

- величина производительности по готовому продукту, 20 кг/ч
- условное обозначение установки СВЧ – сверхвысокочастотная,
- ВВ – вакуум-выпарная,
- У – установка.

5.2.2. Резонаторная шахта предназначена для предотвращения утечки электромагнитного поля в процессе выпаривания.

5.2.3. Радиопрозрачный реактор предназначен для проведения процесса выпаривания.

5.3.4. Электромагнитные аппликаторы микроволнового диапазона предназначены для генерации электромагнитной энергии в пределах резонаторной шахты с целью организации процесса выпаривания.

5.3.5. Верхний и нижний фланцы предназначены для обеспечения герметизации в радиопрозрачном реакторе. Штуцер верхнего фланца предназначен для отвода воздуха при вакуумировании системы и вторичного пара в ходе процесса выпаривания. Первый штуцер нижнего фланца предназначен для подачи исходного сырья в радиопрозрачный реактор, второй штуцер – для выгрузки готового продукта в резервуар для готового продукта.

5.3.6. Конденсатор-охладитель предназначен для конденсации вторичного пара, отводящегося из радиопрозрачного реактора в процессе выпаривания.

5.3.7. Водоохладитель предназначен для обеспечения конденсатора-охладителя холодной водой.

5.3.8. Насос предназначен для обеспечения циркуляции холодной воды в системе конденсации паров.

5.3.9. Компрессорно-конденсационная установка предназначена для поддержания необходимой температуры воды в водоохладителе.

5.3.10. Вакуум-насос предназначен для откачки газов из вакуум-выпарной установки перед началом процесса выпаривания.

5.3.11. Резервуар для исходного сырья предназначен для обеспечения радиопрозрачного реактора исходным сырьем.

5.3.12. Резервуар для готового продукта предназначен для приема готового продукта из радиопрозрачного реактора после процесса выпаривания.

5.2.13. Конструкция установки должна быть удобна для очистки и санитарной обработки. Расположение сливных отверстий должно обеспечивать полное удаление продукта и моющих растворов после окончания работы и мойки.

5.2.14. Покрытия металлических поверхностей установки должны быть устойчивы к пищевым продуктам, моющим и дезинфицирующим средствам, применяемым для обработки технологического оборудования на пищевых предприятиях.

5.2.15. Корпуса резервуаров, радиопрозрачного реактора и конденсатора-охладителя должны быть герметичными.

5.2.16. При поставке потребителю установка должна быть укомплектована набором запасных частей, обеспечивающих ее работу до первого капитального ремонта.

5.3 Показатели назначения и экономного использования сырья, вспомогательных материалов, топлива и энергии.

5.3.1..Показатели назначения установки должны соответствовать следующим параметрам:

5.3.1.1 Производительность, кг/ч, не более..... 20

5.3.1.2. Массовая доля сухих веществ в конечном продукте,

%, не более.....95

5.3.1.3. Общая мощность электромагнитных аппликаторов, кВт..... 7,2

5.3.1.4. Температура процесса выпаривания, °С, не менее.....30

5.3.1.5. Занимаемая площадь, $м^2$, не более..... 4

5.3.1.6. Габаритные размеры, мм, не более:

длина..... 1500

ширина..... 1500

высота.....2000

5.3.1.7. Расход воды на ежедневную мойку, $м^3$, не более.....0,02

5.3.1.8. Подача насоса для циркуляции холодной воды, $м^3/ч$,

не менее.....0,5

5.3.1.9. Давление насоса для циркуляции холодной воды, МПа,

не более.....0,6

5.3.1.10. Вместимость резервуаров, $дм^3$, не менее..... 150

5.3.1.11. Масса, кг, не более.....400

5.3.2.Показатели экономного использования сырья, материалов, топлива, энергии:

5.3.2.1. Удельное потребление электроэнергии,

(кВт*ч)/(кг/ч), не более..... 7,2

5.3.2.2. Производительность установки на единицу занимаемой площади, $(кг/ч)/м^2$, не менее..... 5

5.4. Требования к назначению.

5.4.1. Установка предназначена для выпаривания пищевых растворов в условиях электромагнитного поля.

5.4.2. Основной технический показатель – производительность

установки, кг/ч, не более.....20

5.5. Требования к надежности.

5.5.1. Установленная безотказная наработка, ч, не менее.....400

5.5.2. Установленный ресурс до капитального ремонта,

ч, не менее..... 10000

5.5.3. Средний срок службы до списания, лет, не менее.....15

5.5.4. Среднее время восстановления работоспособного состояния,

ч, не более.....2,0

5.5. Требования к технологичности и метрологическому обеспечению производства и эксплуатации.

5.5.1. Конструкция установки должна удовлетворять требованиям изготовления, эксплуатации и ремонта наиболее производительными и экономичными способами.

5.5.2. Проведение метрологической экспертизы технической документации, аттестация средств измерительной техники и контроль параметров продукции должны проводиться в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.1034-2023 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическая экспертиза технической документации. Основные положения».

5.5.3. Контролируемые параметры, методы и средства их измерения.

5.5.3.1. Контролируемыми параметрами являются:

1) подача насоса для циркуляции охлаждающей воды, $м^3/ч$;

2) расход сырья, продукта и гидролата, кг/ч;

3) массовая доля сухих веществ в исходном сырье, %;

4) массовая доля сухих веществ в конечном продукте, %.

5.5.3.2. Методы и средства измерения контролируемых параметров:

1) Подача насоса для циркуляции охлаждающей воды определяется по методике изложенной в ГОСТ 17335-79.

2) Расход сырья, продукта и гидролата определяются по показаниям тензометрических датчиков под соответствующими резервуарами.

3) Массовая доля сухих веществ в исходном сырье и конечном продукте определяется по ГОСТ 15113.4-2021, ГОСТ ISO 2173-2013, ГОСТ 3626-73.

5.5.4. Качество сварных швов сборочных деталей контролируется внешним осмотром и измерением размеров. Методы и условия контроля по ГОСТ 3242-79.

5.6. Требования к дизайну, эргономике и технической эстетике.

5.6.1. Художественная выразительность, рациональность формы и стилистические соответствия дизайну, принятому в пищевой промышленности, должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 56274-2014.

5.6.2. Эргономические требования к рабочему месту при выполнении работ в положении сидя и стоя согласно ГОСТ 12.2.032-78 и ГОСТ 12.2.033-78.

5.6.3. Органы управления, контроля и сигнализации должны располагаться в удобных и легко доступных местах.

5.7. Требования к уровню стандартизации и унификации.

5.7.1. Конструкция установки должна обеспечивать возможность компоновки из стандартных и унифицированных частей.

5.7.1.1. Коэффициент применяемости должен быть не менее..... 10%.

5.7.1.2. Коэффициент повторяемости должен быть не ниже..... 30%.

Окончательные значения показателей, указанных в п.п. 5.2 и 5.7 уточняются в процессе разработки конструкторской документации.

5.8. Требования безопасности и требования по охране природы.

5.8.1. Установка должна соответствовать требованиям «Правил устройства электроустановок».

5.8.2. Установка при изготовлении, эксплуатации и ремонте не должна оказывать вредных воздействий на окружающую среду.

5.8.3. В соответствии с ГОСТ 12.0.003-2015 установка не является источником вредных химических, биологических и психофизических факторов.

5.8.4. Предельно допустимые уровни или предельно допустимые концентрации опасного и вредного производственного фактора не должны превышать значений, указанных в соответствующих стандартах.

5.8.5. Производственные процессы и оборудование должны соответствовать требованиям СП 2.2.2.1327-03 и ГОСТ 12.3.002-2014;

5.8.6. Все движущиеся части установки должны иметь ограждения в соответствии с ГОСТ 12.2.003-91;

5.8.7. Уровни звука и звукового давления на постоянном рабочем месте не должны превышать 80 дБ «А» согласно ГОСТ 12.1.003-2014;

5.8.8. Эквивалентные корректированные уровни общей вибрации на рабочем месте не должны превышать 92 дБ согласно ГОСТ 12.1.012-2004.

5.8.9. Электрооборудование установки должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.020-76, «Правил устройства электроустановок» и «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей».

5.9. Установка должна быть патентно чистой по РФ идр. странам.

5.10. Требования к составным частям изделия, сырью, исходным и эксплуатационным материалам.

5.10.1. Отделка поверхностей и применяемые лакокрасочные покрытия должны соответствовать характеру воздействия климатических факторов, моющих и производственных сред.

5.10.2. Система смазки должна исключать возможность попадания смазочных материалов в продукт.

5.10.3. Поверхности деталей установки, изготовленных из черных металлов, должны быть защищены от коррозии.

5.10.4. Эксплуатационные материалы.

1) Пищевые растворы согласно соответствующим ГОСТам.

2) Вода питьевая по ГОСТ Р 51232-98.

5.10.5. Температура рабочих сред, °С:

1) пищевых растворов.....30-120

2) охлаждающей воды.....3-10

5.11. Условия эксплуатации (использования), требования к техническому обслуживанию и ремонту.

5.11.1. Установка должна быть изготовлена в климатическом исполнении «У», категория размещения 3.1. по ГОСТ 15160-69.

5.11.2. Время подготовки установки к использованию после транспортирования не лимитируется.

5.11.3. Режим работы установки - непрерывный. Норма обслуживания - 1 человек в смену. Квалификация обслуживающего персонала - рабочий IV разряда. Вид обслуживания постоянный.

5.11.4. Специальные требования к смежному оборудованию и дополнительные требования к установке не предъявляются.

5.11.5. Эксплуатационная документация согласовывается и утверждается на приемочных испытаниях.

5.12. Требования к маркировке и упаковке.

5.12.1. На каждом изделии установки должна быть прикреплена табличка маркировки изделия, изготовленная по чертежу завода-изготовителя по ГОСТ 12969-67 и ГОСТ 12971-67. Требования к маркировке - по ГОСТ 26828-86.

Надпись, наносимая на табличку, должна быть рельефной (выпуклой или вогнутой). Качество маркировки должно обеспечивать её сохранность в течение срока хранения и эксплуатации.

5.12.2. Маркировка транспортной тары должна соответствовать ГОСТ 14192-96 и содержать манипуляционные знаки: «Место строповки», «Верх, не кантовать», «Центр тяжести».

5.12.3. Перед упаковкой установка должна консервироваться в соответствии с ГОСТ 9.014-78 для условий хранения 5 (ОЖ4) по ГОСТ 15150-69, для группы изделий П-1. Для комплектующих сборочных единиц и деталей вариант защиты ВЗ-1, а вариант внутренней упаковки ВУ-0; для запчастей и табличек вариант защиты ВЗ-1 с вариантом внутренней упаковки ВУ-1.

5.12.4. Составные части установки упаковываются в ящик по ГОСТ 10198-78, либо в полиэтиленовые пакеты, а запчасти в ящик по ГОСТ 2991-85, либо в полиэтиленовый пакет, который должен быть помещен в один из основных ящиков или пакетов и закреплен в них.

5.12.5. Способы расконсервации должны исключать необходимость разборки составных частей изделия.

5.13. Требования к монтажу, транспортированию и хранению.

5.13.1. Монтажная технологичность оборудования установки должна соответствовать ГОСТ 24444-87.

5.13.2. Установка должна транспортироваться всеми видами транспорта.

5.13.3.....Условия транспортирования и хранения 5 (ОЖ4) по ГОСТ 15150-69.

5.13.4. . Условия транспортирования в части воздействия механических факторов легкие (Л) ГОСТ 23170-78.

5.13.5. Упаковка и консервация должны обеспечить сохранность установки при транспортировании и хранении.

5.15.6. Установка оборудования установки должна производиться без специальных фундаментов.

6. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ.

6.1. Ориентировочная потребность в установках (по РФ) по годам:

- 2028 г. - 10 шт.
- 2029 г. - 10 шт.
- 2030 г. - 16 шт.
- 2031 г. - 20 шт.
- 2032 г. - 20 шт.

6.2. Экономический эффект от внедрения в производство одной установки, тыс. руб..... 231,7

7. СТАДИИ И ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ.

7.1. .Техническое задание - разработка, согласование и утверждение - июль 2024 г.

7.2. Разработка конструкторской документации - 2025 г.

7.3. Изготовление опытного образца установки - 2026 г.

7.4. Испытание опытного образца установки - 2027 г.

7.5. Корректировка конструкторской документации и организация серийного производства - 2028 г.

8. ПОРЯДОК КОНТРОЛЯ И ПРИЕМКИ.

8.1. Требования к согласованию и утверждению технической документации в соответствии с ГОСТ Р 15.301-2016.

8.2. Испытания и приемка - на соответствие требованиям ТЗ на установку в соответствии с требованиями ГОСТ Р 15.301-2016.

8.3. Комиссия для проведения приемочных испытаний должна состоять из представителей:

- ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского,
- предприятия-разработчика конструкторской документации,
- предприятия-изготовителя, предприятия-потребителя,
- органов, осуществляющих контроль за безопасностью и здоровьем.

8.4. Установка должна пройти следующие виды испытаний:

- предварительные заводские,
- предварительные,
- приемочные.

8.4.1. Предварительные заводские испытания проводят на предприятии-изготовителе.

8.4.2. Цель предварительных заводских испытаний - определить возможность отправки изделия на предприятие-потребитель для подготовки к предварительным и приемочным испытаниям на предприятии-потребителе.

8.4.3. Цель предварительных испытаний на предприятии-потребителе - определить соответствие опытного образца требованиям технического задания и конструкторской документации для представления на приемочные испытания.

8.4.4. Цель приемочных испытаний - определение соответствия установки требованиям ТЗ, стандартов и технической документации, приемка изделия в эксплуатацию и постановка на серийное производство.

8.5. Согласованию и утверждению подлежат следующие документы:

8.5.1. Техническое задание согласовывают с организацией-разработчиком конструкторской документации, утверждает ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского.

8.5.2. Технический проект согласовывают с ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского и предприятием - заказчиком.

8.5.3. Технические условия согласовывают с ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского и предприятием-заказчиком.

8.5.4. Программу и методику испытаний согласовывают с предприятием-заказчиком, утверждает ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского.

Приложение П

Техническое задание на изготовление комбинированной ленточной сверхвысокочастотно-инфракрасной сушильной установки производительностью 100 кг/ч СВЧ-ИК СУ-100

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»
(ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»)

Институт «Агротехнологическая академия»

СОГЛАСОВАНО
Директор Института
«Агротехнологическая академия»
_____Рогозенко А.В.
«__» _____2024 г.

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной деятельности
ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»
_____Любомирский Н.В.
«05» 06 2024 г.

РАЗРАБОТАНО
Институт «Агротехнологическая академия»
_____Гербер Ю.Б.
_____Гаврилов А. В.

Комбинированная ленточная сверхвысокочастотно-инфракрасная сушильная установка производительностью 100 кг/ч СВЧ-ИК СУ – 100

Техническое задание

(на 12 листах)

Симферополь 2024

1. НАИМЕНОВАНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ.

1.1. Комбинированная ленточная сверхвысокочастотно-инфракрасная сушильная установка производительностью 100 кг/ч (именуемая в дальнейшем – установка) предназначается для осуществления операции сушки растительного сырья и применяется на заводах, производящих пищевые концентраты.

1.2. По техническому уровню установка должна соответствовать мировому уровню в области устройств для сушки растительного сырья в пищевой промышленности.

2. ОСНОВАНИЕ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ.

2.1. Разработка установки ведется на основании Плана научно-исследовательской работы, выполняемой на инициативной основе факультета механизации и пищевых технологий на 2020-2024 гг.

Направление НИР факультета: 4 Научные основы и инновационные решения в механизации и роботизации производства и технологиях переработки сельскохозяйственной продукции.

3. ЦЕЛЬ И НАЗНАЧЕНИЕ РАЗРАБОТКИ.

3.1. Цель разработки – создание установки, позволяющей проводить технологические операции сушки растительного сырья на современном техническом уровне и с меньшими затратами времени, энергетических и материальных ресурсов.

3.2. Данная установка разрабатывается впервые.

4. ИСТОЧНИКИ РАЗРАБОТКИ.

4.1. Разработка ведется с учетом:

1) результатов научно-исследовательских работ, проведенных в Институте «Агротехнологическая академия» Федерального государственного

автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» в 2017-2024 г.г.

2) отчета о патентных исследованиях ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского, 2024 г.

5 ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ.

5.1.Установка должна соответствовать требованиям ГОСТ 26582-85 «Машины и оборудование продовольственные. Общие технические требования», ГОСТ 12.2.124-2013 «Оборудование продовольственное. Общие требования безопасности» и указанным ниже требованиям.

5.2. Состав изделия и требования к конструктивному устройству.

5.2.1. Установка должна состоять из следующих изделий:

1) корпуса..... 1 шт.;

2) ленты конвейерной..... 6 м;

3) мотора-редуктора..... 1шт.;

4) приводного барабана..... 1 шт.;

5) натяжного барабана..... 1 шт.;

6) радионепроницаемого канала..... 1 шт.;

7) электромагнитных аппликаторов микроволнового диапазона.....3 шт.;

8) электромагнитных аппликаторов инфракрасного диапазона..... 3 шт.;

9) вытяжных вентиляторов..... 3 шт.;

10) загрузочного бункера.....1 шт.;

11) бункера-приемника..... 1 шт.;

12) системы управления, контроля и сигнализации..... 1 комплект.

Схема условного обозначения установки:

- XXX-XX XX - XXX

- величина производительности по готовому продукту, 100 кг/ч

- условное обозначение установки СВЧ – сверхвысокочастотная,

- ИК – инфракрасная,

- С – сушильная,

- У – установка.

5.2.2. Корпус выполняет роль станины, на которой размещаются все составные части оборудования, образуя при этом полноценную конструкцию установки.

5.2.3. Лента конвейерная предназначена для транспортировки высушиваемого сырья от загрузочного бункера к бункеру-приемнику через модули СВЧ и ИК диапазона.

5.2.4. Мотор-редуктор предназначен для передачи вращательного движения приводному барабану посредством передаточного механизма.

5.2.5. Приводной барабан предназначен для приведения в движение ленты конвейерной.

5.2.6. Натяжной барабан предназначен для натяжения ленты конвейерной.

5.2.7. Радионепроницаемый канал предназначен для предотвращения утечки электромагнитного поля в процессе сушки.

5.3.8. Электромагнитные аппликаторы микроволнового диапазона предназначены для генерации электромагнитной энергии в пределах резонаторной шахты с целью удаления влаги из середины сырья на его поверхность.

5.3.9. Электромагнитные аппликаторы инфракрасного диапазона предназначены для генерации инфракрасной энергии в пределах резонаторной шахты с целью удаления влаги с поверхности сырья в окружающую среду.

5.3.10. Вытяжные вентиляторы предназначены для отведения из радионепроницаемого канала удаленной из сырья влаги.

5.3.11. Загрузочный бункер предназначен для подачи исходного сырья на ленту установки.

5.3.12. Бункер-приемник предназначен для сбора готовой продукции.

5.2.13. Конструкция установки должна быть удобна для очистки и санитарной обработки. Расположение сточных каналов должно обеспечивать

полное удаление продукта и моющих растворов после окончания работы и мойки.

5.2.14. Покрытия металлических поверхностей установки должны быть устойчивы к пищевым продуктам, моющим и дезинфицирующим средствам, применяемым для обработки технологического оборудования на пищевых предприятиях.

5.2.15. При поставке потребителю установка должна быть укомплектована набором запасных частей, обеспечивающих ее работу до первого капитального ремонта.

5.3. Показатели назначения и экономного использования сырья, вспомогательных материалов, топлива и энергии.

5.3.1. Показатели назначения установки должны соответствовать следующим параметрам:

5.3.1.1. Производительность, кг/ч, не более..... 100

5.3.1.2. Массовая доля влаги в конечном продукте, %, не менее..... 5

5.3.1.3. Общая мощность электромагнитных аппликаторов МВ диапазона, кВт..... 7,2

5.3.1.4. Общая мощность электромагнитных аппликаторов ИК диапазона, кВт..... 9

5.3.1.5. Температура процесса сушки, °С, не менее..... 30

5.3.1.6. Занимаемая площадь, $м^2$, не более..... 7

5.3.1.7. Габаритные размеры, мм, не более:

длина..... 7000

ширина..... 1000

высота..... 1200

5.3.1.8. Расход воды на ежедневную мойку, $м^3$, не более..... 0,02

5.3.1.9. Вместимость бункеров, $дм^3$, не менее..... 50

5.3.1.10. Масса, кг, не более..... 400

5.3.2.Показатели экономного использования сырья, материалов, топлива, энергии:

5.3.2.1. Удельное потребление электроэнергии,

(кВт*ч)/(кг/ч), не более..... 16,2

5.3.2.2. Производительность установки на единицу занимаемой площади, (кг/ч)/м^2, не менее..... 14,3

5.4. Требования к назначению.

5.4.1. Установка предназначена для сушки растительного сырья в условиях электромагнитного поля.

5.4.2. Основной технический показатель – производительность

установки, кг/ч, не более.....100

5.5. Требования к надежности.

5.5.1. Установленная безотказная наработка, ч, не менее.....400

5.5.2. Установленный ресурс до капитального ремонта,

ч, не менее..... 10000

5.5.3. Средний срок службы до списания, лет, не менее.....15

5.5.4. Среднее время восстановления работоспособного состояния,

ч, не более.....2,0

5.5. Требования к технологичности и метрологическому обеспечению производства и эксплуатации.

5.5.1. Конструкция установки должна удовлетворять требованиям изготовления, эксплуатации и ремонта наиболее производительными и экономичными способами.

5.5.2. Проведение метрологической экспертизы технической документации, аттестация средств измерительной техники и контроль параметров продукции должны проводиться в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.1034-2023 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическая экспертиза технической документации. Основные положения».

5.5.3. Контролируемые параметры, методы и средства их измерения.

5.5.3.1. Контролируемыми параметрами являются:

1) расход сырья, кг/ч;

2) массовая доля влаги в исходном сырье, %;

3) массовая доля влаги в конечном продукте, %.

5.5.3.2. Методы и средства измерения контролируемых параметров:

1) Расход сырья, продукта и гидролата определяются по показаниям тензометрических датчиков под соответствующими резервуарами.

2) Массовая доля сухих веществ в исходном сырье и конечном продукте определяется по ГОСТ 15113.4-2021.

5.5.4. Качество сварных швов сборочных деталей контролируется внешним осмотром и измерением размеров. Методы и условия контроля по ГОСТ 3242-79.

5.6. Требования к дизайну, эргономике и технической эстетике.

5.6.1. Художественная выразительность, рациональность формы и стилистические соответствия дизайну, принятому в пищевой промышленности, должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 56274-2014.

5.6.2. Эргономические требования к рабочему месту при выполнении работ в положении сидя и стоя согласно ГОСТ 12.2.032-78 и ГОСТ 12.2.033-78.

5.6.3. Органы управления, контроля и сигнализации должны располагаться в удобных и легко доступных местах.

5.7. Требования к уровню стандартизации и унификации.

5.7.1. Конструкция установки должна обеспечивать возможность компоновки из стандартных и унифицированных частей.

5.7.1.1. Коэффициент применяемости должен быть не менее..... 10%.

5.7.1.2. Коэффициент повторяемости должен быть не ниже..... 30%.

Окончательные значения показателей, указанных в п.п. 5.2 и 5.7 уточняются в процессе разработки конструкторской документации.

5.8. Требования безопасности и требования по охране природы.

5.8.1. Установка должна соответствовать требованиям «Правил устройства электроустановок».

5.8.2. Установка при изготовлении, эксплуатации и ремонте не должна оказывать вредных воздействий на окружающую среду.

5.8.3. В соответствии с ГОСТ 12.0.003-2015 установка не является источником вредных химических, биологических и психофизических факторов.

5.8.4. Предельно допустимые уровни или предельно допустимые концентрации опасного и вредного производственного фактора не должны превышать значений, указанных в соответствующих стандартах.

5.8.5. Производственные процессы и оборудование должны соответствовать требованиям СП 2.2.2.1327-03 и ГОСТ 12.3.002-2014;

5.8.6. Все движущиеся части установки должны иметь ограждения в соответствии с ГОСТ 12.2.003-91;

5.8.7. Уровни звука и звукового давления на постоянном рабочем месте не должны превышать 80 дБ «А» согласно ГОСТ 12.1.003-2014;

5.8.8. Эквивалентные корректированные уровни общей вибрации на рабочем месте не должны превышать 92 дБ согласно ГОСТ 12.1.012-2004.

5.8.9. Электрооборудование установки должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.020-76, «Правил устройства электроустановок» и «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей».

5.9. Установка должна быть патентно чистой по РФ и др. странам.

5.10. Требования к составным частям изделия, сырью, исходным и эксплуатационным материалам.

5.10.1. Отделка поверхностей и применяемые лакокрасочные покрытия должны соответствовать характеру воздействия климатических факторов, моющих и производственных сред.

5.10.2. Система смазки должна исключать возможность попадания смазочных материалов в продукт.

5.10.3. Поверхности деталей установки, изготовленных из черных металлов, должны быть защищены от коррозии.

5.10.4. Эксплуатационные материалы.

1) Пищевое растительное сырье согласно соответствующим ГОСТам.

5.11. Условия эксплуатации (использования), требования к техническому обслуживанию и ремонту.

5.11.1. Установка должна быть изготовлена в климатическом исполнении «У», категория размещения 3.1. по ГОСТ 15160-69.

5.11.2. Время подготовки установки к использованию после транспортирования не лимитируется.

5.11.3. Режим работы установки - непрерывный. Норма обслуживания - 1 человек в смену. Квалификация обслуживающего персонала - рабочий IV разряда. Вид обслуживания постоянный.

5.11.4. Специальные требования к смежному оборудованию и дополнительные требования к установке не предъявляются.

5.11.5. Эксплуатационная документация согласовывается и утверждается на приемочных испытаниях.

5.12. Требования к маркировке и упаковке.

5.12.1. На каждом изделии установки должна быть прикреплена табличка маркировки изделия, изготовленная по чертежу завода-изготовителя по ГОСТ 12969-67 и ГОСТ 12971-67. Требования к маркировке - по ГОСТ 26828-86.

Надпись, наносимая на табличку, должна быть рельефной (выпуклой или вогнутой). Качество маркировки должно обеспечивать её сохранность в течение срока хранения и эксплуатации.

5.12.2. Маркировка транспортной тары должна соответствовать ГОСТ 14192-96 и содержать манипуляционные знаки: «Место строповки», «Верх, не кантовать», «Центр тяжести».

5.12.3. Перед упаковкой установка должна консервироваться в соответствии с ГОСТ 9.014-78 для условий хранения 5 (ОЖ4) по ГОСТ 15150-69, для группы изделий П-1. Для комплектующих сборочных единиц и деталей вариант защиты ВЗ-1, а вариант внутренней упаковки ВУ-0; для

запчастей и табличек вариант защиты ВЗ-1 с вариантом внутренней упаковки ВУ-1.

5.12.4. Составные части установки упаковываются в ящик по ГОСТ 10198-78, либо в полиэтиленовые пакеты, а запчасти в ящик по ГОСТ 2991-85, либо в полиэтиленовый пакет, который должен быть помещен в один из основных ящиков или пакетов и закреплен в них.

5.12.5. Способы расконсервации должны исключать необходимость разборки составных частей изделия.

5.13. Требования к монтажу, транспортированию и хранению.

5.13.1. Монтажная технологичность оборудования установки должна соответствовать ГОСТ 24444-87.

5.13.2. Установка должна транспортироваться всеми видами транспорта.

5.13.3.....Условия транспортирования и хранения 5 (ОЖ4) по ГОСТ 15150-69.

5.13.4. . Условия транспортирования в части воздействия механических факторов легкие (Л) ГОСТ 23170-78.

5.13.5. Упаковка и консервация должны обеспечить сохранность установки при транспортировании и хранении.

5.15.6. Установка оборудования установки должна производиться без специальных фундаментов.

6. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ.

6.1. Ориентировочная потребность в установках (по РФ) по годам:

- 2028 г. - 12 шт.
- 2029 г. - 12 шт.
- 2030 г. - 18 шт.
- 2031 г. - 23 шт.
- 2032 г. - 23 шт.

6.2. Годовой экономический эффект от внедрения в производство одной установки в зависимости от высушиваемого сырья, тыс. руб., не менее..977,1

7. СТАДИИ И ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ.

7.1. .Техническое задание - разработка, согласование и утверждение - июль 2024 г.

7.2. Разработка конструкторской документации - 2025 г.

7.3. Изготовление опытного образца установки - 2026 г.

7.4. Испытание опытного образца установки - 2027 г.

7.5. Корректировка конструкторской документации и организация серийного производства - 2028 г.

8. ПОРЯДОК КОНТРОЛЯ И ПРИЕМКИ.

8.1. Требования к согласованию и утверждению технической документации в соответствии с ГОСТ Р 15.301-2016.

8.2. Испытания и приемка - на соответствие требованиям ТЗ на установку в соответствии с требованиями ГОСТ Р 15.301-2016.

8.3. Комиссия для проведения приемочных испытаний должна состоять из представителей:

- ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского,
- предприятия-разработчика конструкторской документации,
- предприятия-изготовителя, предприятия-потребителя,
- органов, осуществляющих контроль за безопасностью и здоровьем.

8.4. Установка должна пройти следующие виды испытаний:

- предварительные заводские,
- предварительные,
- приемочные.

8.4.1. Предварительные заводские испытания проводят на предприятии-изготовителе.

8.4.2. .Цель предварительных заводских испытаний - определить возможность отправки изделия на предприятие-потребитель для подготовки к предварительным и приемочным испытаниям на предприятии-потребителе.

8.4.3. Цель предварительных испытаний на предприятии-потребителе - определить соответствие опытного образца требованиям технического задания и конструкторской документации для представления на приемочные испытания.

8.4.4. Цель приемочных испытаний - определение соответствия установки требованиям ТЗ, стандартов и технической документации, приемка изделия в эксплуатацию и постановка на серийное производство.

8.5. Согласованию и утверждению подлежат следующие документы:

8.5.1. Техническое задание согласовывают с организацией-разработчиком конструкторской документации, утверждает ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского.

8.5.2. Технический проект согласовывают с ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского и предприятием-заказчиком.

8.5.3. Технические условия согласовывают с ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского и предприятием-заказчиком.

8.5.4. Программу и методику испытаний согласовывают с предприятием-заказчиком, утверждает ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского.