

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
Государственная организация высшего профессионального образования
«Донецкий национальный университет экономики и торговли
имени Михаила Туган-Барановского»

На правах рукописи

Миронова Надежда Александровна

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ
ПЛОДОВЫХ КОСТОЧЕК ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В
ВИБРОКИПЯЩЕМ СЛОЕ**

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор
Поперечный А.Н.

Донецк - 2017 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ВТОРИЧНЫХ СЫРЬЕВЫХ РЕСУРСОВ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	12
1.1. Направления использования вторичных ресурсов плодоовощного производства.....	12
1.2. Плодовые косточки, как объект сушки. Основные направления их рационального использования.....	16
1.3. Способы и оборудования для сушки вторичных сырьевых ресурсов	21
1.4. Поиск рациональных способов сушки плодовых косточек как капиллярно-пористых тел	32
1.5. Научные предпосылки исследования процесса сушки плодовых косточек с применением ИК-излучения и виброкипящего слоя.....	36
1.6. Выводы по разделу.....	50
РАЗДЕЛ 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ	52
2.1. Методики исследований теплофизических характеристик плодовых косточек.....	52
2.2. Методика определения физико-геометрических характеристик плодовых косточек.....	57
2.3. Описание экспериментальной установки и методики исследования влияния параметров вибрации на характер перемещения плодовых косточек.....	62
2.4. Описание экспериментальной установки и методики исследования параметров ИК-сушки плодовых косточек в виброкипящем слое.....	66
2.5. Выводы по разделу.....	72

РАЗДЕЛ 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ПЛОДОВЫХ КОСТОЧЕК.....	74
3.1. Планирование полнофакторного эксперимента.....	74
3.2. Обработка результатов экспериментальных исследований и их анализ.....	74
3.3. Выводы по разделу.....	85
РАЗДЕЛ 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ПЛОДОВЫХ КОСТОЧЕК.....	86
4.1. Результаты экспериментальных исследований теплофизических характеристик плодовых косточек.....	86
4.2. Результаты определения физико-геометрических характеристик плодовых косточек.....	92
4.3. Экспериментальные исследования влияния параметров вибрации на характер перемещения плодовых косточек.....	100
4.4. Кинетика сушки косточек и анализ показателей эффективности процесса в зависимости от плотности теплового потока ИК-облучения.....	106
4.5. Кинетика изменения температуры плодовых косточек в процессе сушки и анализ показателей качества продукта в зависимости от плотности теплового потока ИК-облучения.....	114
4.6. Количественные закономерности процесса сушки плодовых косточек.....	120
4.7. Выводы по разделу.....	130
РАЗДЕЛ 5. РАЗРАБОТКА СПОСОБА И ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СУШКИ ПЛОДОВЫХ КОСТОЧЕК.....	133
5.1. Способ сушки плодовых косточек.....	133
5.2. Конструкция вертикальной вибросушилки с ИК-излучателями для промышленной реализации	134

5.3. Конструкция протирочно-сушильного аппарата.....	138
5.4. Конструкция промышленной вибрационной радиационной сушилки	140
5.5. Методика расчета промышленной вертикальной вибросушилки с ИК-излучателями	143
5.6. Внедрение результатов исследований в производство.....	152
5.7. Выводы по разделу.....	153
ВЫВОДЫ.....	154
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	156
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	157
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	178
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	180
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	185
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	186

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Исследования теоретических и прикладных проблем теплопереноса, связанных с совершенствованием энергосберегающих технологий термической сушки, несмотря на самое широкое внимание и длительный период реализации до настоящего времени по многим аспектам остаются актуальными задачами промышленной теплоэнергетики. С их решением непосредственно связано развитие и качественное совершенствование высокоэффективных экономичных технологий в целом ряде современных промышленных отраслей, включая пищевую промышленность, в частности, для консервного производства пищевой промышленности в числе первостепенных по важности стоит проблема комплексного использования сельскохозяйственного сырья, более полного вовлечения вторичных материальных ресурсов в народное потребление. Рациональное использование побочных продуктов и отходов производства является важнейшим резервом увеличения выработки продукции и повышения эффективности производства в пищевой индустрии.

Проблема сохранения и переработки плодовых косточек, как ценного сырья для целого ряда отраслей промышленности, решается их сушкой на плодоовощных предприятиях.

Исследованиям в области обработки плодовых косточек и их ядер посвящены труды ученых А.К. Олениковой, К.Х. Гафурова, А.К. Гаджиева. Их анализ показал, что в настоящее время вопросы по выбору рационального способа и соответствующих режимов сушки косточек, с учетом их структурных особенностей, не решены.

Улучшение показателей процесса сушки плодовых косточек, в частности, сокращение расхода энергоресурсов, продолжительности протекания процесса, а также повышение качества продукта, возможно путем применения комбинированного способа с использованием инфракрасного (ИК) нагрева и вибрационного воздействия. При таком способе тепловой обработки достигается максимальная поверхность испарения, равномерное импульсное нагревание

материала, что позволяет использовать высокие температуры, а также высушивать материал до низкой остаточной влажности (1,7...5%).

Анализ известных научных исследований в области применения инфракрасного нагрева и вибрации показывает, что механизм их воздействия на структуру, физико-химическую и биологическую природу многослойных пищевых продуктов все не изучен. В частности это касается нагрева сложных биокolloидных многокомпонентных систем, к которым относятся и плодовые косточки.

Исследования механизма переноса теплоты и влаги в плодовых косточках показывают на сложность этого процесса. Аналитическое решение данной задачи, т.е. нахождение локальных значений температуры и влагосодержания косточек при их сушке инфракрасным излучением в виброкипящем слое, связано с решением взаимосвязанных дифференциальных уравнений распространения теплоты и массы. Реализация полученных при этом решений, для случаев сушки многослойных капиллярно-пористых тел, вызывает большие трудности и является практически непреодолимой.

Приведенные соображения свидетельствуют об актуальности тематики диссертационного исследования.

Перспективность предлагаемого комбинированного способа сушки плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое и внедрение его в промышленность требует получения физической модели процесса на основе синтеза экспериментальных исследований, что определяет актуальность темы диссертационной работы. Исследования позволяют предложить рациональные режимы сушки и создать соответствующую конструкцию сушильной установки.

Цель и задачи исследования. Целью работы является исследование комбинированного процесса сушки плодовых косточек ИК-излучением в виброкипящем слое и разработка сушильной установки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести информационный обзор научно-технических исследований в области теплофизических процессов сушки вторичных ресурсов плодоовощного

производства, в том числе плодовых косточек, для выявления перспектив разработки ресурсосберегающих технологий;

- осуществить теоретическое обоснование влияния параметров вибрации на характер перемещения плодовых косточек по вибрирующей поверхности как фактора, влияющего на термическую обработку продукта;

- разработать аппаратно-методический комплекс для исследования теплофизических и физико-геометрических характеристик, влияния параметров вибрации на характер виброперемещения, изменения кинетики сушки плодовых косточек;

- осуществить моделирование процесса сушки плодовых косточек ИК-излучением в виброкипящем слое с применением метода планирования полнофакторного эксперимента;

- определить теплофизические и физико-геометрические характеристики плодовых косточек в процессе сушки с целью получения эмпирических зависимостей тепловых параметров и соответствующих математически моделей;

- провести экспериментальные исследования кинетики влагосодержания и температуры в процессе сушки плодовых косточек и их ядер ИК-излучением в виброкипящем слое в зависимости от плотности теплового потока и параметров вибрации;

- провести анализ влияния теплофизических параметров процесса сушки на химические характеристики полученного масла из высушенных ядер плодовых косточек;

- провести исследования количественных закономерностей процесса сушки плодовых косточек, на основе анализа данных экспериментальных исследований, для описания конвективного тепломассообмена при воздействии ИК-лучей;

- разработать способ и конструкцию промышленной установки для сушки плодовых косточек с учетом полученных экспериментальных данных;

- разработать инженерную методику проектного расчета промышленной сушильной установки с использованием ИК-нагрева и вибрации;

- провести внедрение результатов исследований в производство и определить их социально-экономическую эффективность.

Объект исследований – процессы тепломассопереноса в технологиях термической сушки.

Предмет исследований – процесс сушки плодовых косточек ИК-излучением в виброкипящем слое.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы использовались методики для определения технологических и теплофизических параметров процесса сушки плодовых косточек. Экспериментальные исследования проводились на экспериментальной установке, созданной на базе кафедры оборудования пищевых производств с последующей обработкой полученных результатов.

В ходе выполнения работы применялись компьютерные технологии: для статистического моделирования - табличный процессор Microsoft Office Excel 2015, для выполнения графического материала - профессионально направлена программа AutoCad 2016, для математической обработки экспериментальных данных - программа MathCad, для автоматизации ввода результатов экспериментов и графического материала - сканирующие устройства и системой оптической ого распознавания Fine Reader 8.

Положения, выносимые на защиту:

- модель процесса сушки плодовых косточек ИК-излучением в виброкипящем слое;

- анализ эмпирических зависимостей теплофизических характеристик плодовых косточек в заданных диапазонах температур и влагосодержаний и статистический анализ физико-геометрических характеристик;

- результаты влияния параметров вибрации рабочего органа на характер перемещения плодовых косточек как фактора, влияющего на термическую обработку продукта;

- результаты исследований кинетики влагосодержания и температуры процесса сушки плодовых косточек и их ядер ИК-излучением в виброкипящем слое и анализ полученных данных;
- результаты влияния технологических и теплофизических параметров процесса сушки на химические характеристики полученного масла из высушенных ядер плодовых косточек;
- разработка способа и конструкции промышленной установки для сушки плодовых косточек с учетом полученных экспериментальных данных;
- внедрение результатов исследований в производство и их социально-экономическая эффективность.

Научная новизна полученных результатов.

1. Получены новые данные о влиянии технологических и теплофизических параметров процесса (продолжительности, температуры, влагосодержания, плотности теплового потока инфракрасного излучения) на интенсивность сушки плодовых косточек; установлены общие закономерности процесса в виде кривых сушки, скорости сушки и термограмм, характерные для сушки плодовых косточек при радиационном теплоподводе.

2. Впервые получена модель процесса сушки плодовых косточек, связывающая продолжительность сушки, плотность теплового потока ИК-излучения, начальное влагосодержание продукта и амплитуду колебаний.

3. Впервые для плодовых косточек и их ядер определены теплофизические и ряд физико-геометрических характеристик и осуществлен их статистический анализ. Получены уравнения регрессии в виде мультипликативных моделей, которые описывают количественную связь между линейными размерами косточек и ядер и их объемом. На основании анализа статистических оценок сделаны выводы о характере распределения отдельных характеристик и тесноту связи между ними, играющие важную роль при осуществлении моделирования процесса сушки плодовых косточек.

4. Получили развитие научные представления об эффективности использования комбинированного процесса сушки – ИК-излучения и

вибрационного воздействия с целью получения качественных показателей сушки плодовых косточек и их составляющих. Установлено, что процесс сушки исследуемых плодовых косточек целесообразно проводить при плотности теплового потока ИК-излучения в диапазоне 400...900 Вт/м², что позволяет достичь высокой интенсивности процесса с сохранением качества масла, содержащегося в ядрах косточек. Получены уравнения обобщенных кривых скорости сушки, описывающие конвективный теплообмен при взаимодействии теплового потока ИК-излучения на продукт.

5. Впервые получены значения массообменных коэффициентов и критических влагосодержаний, характеризующих перемещение влаги внутри плодовых косточек, позволяющие определить интенсивность процесса сушки.

6. Впервые установлена взаимосвязь между теплообменом и массообменом при помощи основного критерия кинетики процесса сушки - критерия Ребиндера. Определены значения изменения удельной теплоемкости, удельной теплоты испарения, температурного коэффициента сушки плодовых косточек в зависимости от текущего влагосодержания.

Практическая значимость работы.

1. Разработана инженерная методика расчета сушильной установки, позволяющая осуществлять ИК-нагрев продукта при использовании вертикального вибротранспортирования.

2. Предложен новый способ сушки и разработаны конструкции промышленных установок для сушки плодовых косточек;

3. Созданы и запатентованы способ сушки и конструкции промышленных сушилок. Новизна технических решений защищена тремя декларационными патентами Украины на полезную модель: № 95859, ПМК (2014) А 23 L3/005 «Спосіб сушіння плодкових кісточок», № 95857, ПМК (2014) А 23 L 3/005 «Вібраційна радіаційна сушарка», № 21856, ПМК (2006) А23N 4/00, А23N 12/00. «Протирально-сушильний апарат.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обосновывается корректностью поставленной задачи,

использованием фундаментальных законов лучистого теплообмена, известных закономерностей теории сушки.

Основные положения выполненных исследований докладывались, обговаривались и были одобрены на: международной научно-технической конференции «Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК» (г. Иваново, Россия, 2014 г.), VII международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.), научно-практической конференции преподавателей и аспирантов Донецкого национального университета экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского «Процессы и оборудование пищевых производств» (г. Донецк, 2010-2016 г.), международной научно-технической конференции «Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности», (г. Москва, ФГБОУ ВО МГУДТ, 2016 г.), международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь 2016 г.), международной научно-практической конференции «Явления переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств» (Воронеж, 2016 г.).

В полном объеме диссертационная работа заслушивалась на научных семинарах университетов ДонНУЭТ им. М. Туган-Барановского, ДонНТУ, ДонНУ.

Публикации результатов исследований. По теме диссертации опубликовано 29 научных работ, из них 5 статей, входящих в перечень ВАК ДНР, 1 монография и 3 патента Украины на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованных источников и приложений. Основной текст работы изложен на 155 страницах, содержит 50 рисунков и 28 таблиц. Список использованных источников включает 189 наименований.

РАЗДЕЛ 1

ОБЗОР И АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ВТОРИЧНЫХ СЫРЬЕВЫХ РЕСУРСОВ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

1.1. Направления использования вторичных ресурсов плодоовощного производства

При переработке сырья плодоовощного производства образуется значительное количество (от 15 до 35%) отходов, рациональное использование которых дает возможность получить дополнительно продукты, представляющие ценность для ряда отраслей народного хозяйства [1-16]. Отходы плодоовощной промышленности - это вторичное сырье, получаемое от переработки томатов (до 20%), картофеля (30-40%), яблок на сок (30-34%), капусты (до 18%), косточковых плодов (30-35 %), зернистых (35%), моркови на сок (31%) и других, которое содержит большое количество ценных веществ [2,3,5].

Вторичные сырьевые ресурсы плодоовощного производства могут быть классифицированы на:

- очистки, выжимки (семена, косточки, семенные камеры, плодоножки, гребни др.);
- жидкие отходы (образующиеся в процессе измельчения, протираания, экстракции, бланшировки и предварительной варки сырья);
- плоды, овощи, их части, продукты их переработки, пораженные микроорганизмами [17].

Можно также обобщить направления применения вторичных сырьевых ресурсов переработки плодоовощных культур [17]:

- этиловый спирт;
- углеводные,
- питательные среды;
- пищевые красители; пектин;
- компоненты комбикормов;

- эфирные и жирные масла;
- пищевые (витаминные, антиоксидантные) добавки;
- сорбенты пищевого и технического назначения;
- БАД для косметических и фармакологических средств;
- биоудобрения.

Так, например, значительную ценность по химическому и количественному составу представляют отходы томатного производства, из них образуются семена, жмых, пульпа, которые нашли широкое применение при получении масла, органических удобрений, корма для скота и птицы, белка, изделий бытовой химии и лаков [2].

Отходы, образующиеся при переработке овощей, по своему химическому составу представляют собой значительную ценность и используются в основном для скармливания животных. Из отходов моркови и свеклы можно получить спирт, каротин, питательную среду для ферментов и микроорганизмов, пищевые красители [12-14].

Ценным белково-витаминным кормом для скота является ботва и створки зеленого горошка. Их используют как в свежем виде для непосредственного скармливания, так и в высушенном - для приготовления кормовой муки [13].

Отходами производства плодовых и ягодных консервов являются: выжимки, которые получают при производстве натуральных соков; вытерки при протирании плодов на пюре; семенные камеры и косточки, выделенные при производстве компотов, джема и т.п. [2,3,14].

Химический состав выжимок зависит от помологического сорта, степени зрелости сырья, полноты извлечения сока и других факторов. Яблочные выжимки применяют для получения сухого пищевого пектина или жидкого пектинового концентрата; дополнительной выработки пюре и сока, используемого для производства сидра, безалкогольных напитков, уксуса; в качестве корма для скота; как питательную среду для микроорганизмов; как удобрение [2, 13,14].

На некоторых консервных заводах из выжимок, а также вытерок и очисток яблок и груш после прошпаривания и дополнительного протирания

изготавливают пюре с повышенным содержанием пектина и клетчатки. Добавление такого пюре (до 20%) в плодое, получаемого по обычной технологической схеме, способствует выработке высококачественного продукта с высокой желирующей способностью.

Для получения сухого пищевого пектина используют высушенные яблочные выжимки. Свежие плодово-ягодные выжимки можно использовать для дополнительного извлечения сока.

Виноградные выжимки - единственный источник промышленного получения винной кислоты, которая широко используется в ряде производств.

При переработке косточковых плодов в отходы поступают косточки, которые составляют от 5 до 12% массы плода. Высушенные косточки используют для изготовления ценных фармакопейных масел. Скорлупа применяется для получения косточковой крошки, используемой для очистки металлических поверхностей, выработки активированного угля, фурфурола и др. [3,4,6,12,16].

Комплексное использование сырья, уменьшение количества отходов и их рациональное использование – важнейший резерв роста производства, снижения себестоимости и повышения рентабельности консервной продукции [1-3,14,16].

Одним из перспективных и универсальных путей решения задачи применения вторичных сырьевых ресурсов и сохранения в них полезных веществ является их своевременная сушка.

Большое разнообразие вторичных сырьевых ресурсов не позволяет использовать единый способ их переработки.

Поэтому, в настоящее время существуют различные способы сушки отходов плодовоовощного сырья, с учетом их особенностей и требований к технологическому процессу [18-28].

К сожалению, теоретические зависимости, которые предлагаются для описания процесса сушки, не позволяют определить оптимальные параметры процесса, при которых будут обеспечиваться наилучшие качественные показатели сушеного продукта. Поэтому рассмотренные нами литературные

источники, которые посвящены этой проблеме, предлагают параметры, которые базируются на экспериментальных исследованиях.

Так, например, в работе Арапова В.Н. [19] определены критерии допустимых температурных режимов конвективной сушки пищевых продуктов.

Отмечено, что в качестве теплового воздействия на термолabileльный продукт следует принять максимальный тепловой импульс сушильного агента или максимально допустимое время обработки пищевого продукта сушильным агентом.

Исследованиями влияния сушки на содержание биологически активных веществ плодов [29], показана принципиальная возможность физической оценки эффективности режимов сушки, позволяющая оптимизировать процесс по воздействию на биологически активные вещества.

Исследования по определению интенсивности влагоотдачи сельскохозяйственных культур при сушке [30], позволяют рассчитать длительность сушки продукта в плотном подвижном слое по полученному уравнению с учетом коэффициента, зависящего от рода культур.

Исследованию сушки плодовых культур в кипящем слое, позволяющей интенсифицировать процесс за счет повышения температуры теплоносителя и интенсивного перемешивания материала, посвящены работы [31-33].

Можно выделить следующие требования к процессу сушки, которые определены тенденциями развития современных рыночных отношений и проблемой обеспечения населения качественными продуктами с высоким содержанием питательных веществ:

- выбор рациональных параметров процесса, которые помогут получить высокий уровень сохранения ценных веществ в высушенном продукте, а также его высокие органолептические, структурно-механические и технологические свойства;

- использование энергосберегающих технологий, которые требуют низких затрат энергии на реализацию процесса сушки и тем самым обеспечивают конкурентоспособность высушенной продукции;

- создание гибких технологий и удобного в эксплуатации оборудования, которые позволят быстро реагировать на потребности того или иного продукта.

1.2. Плодовые косточки, как объект сушки. Основные направления их рационального использования

Среди отходов предприятий, перерабатывающих растительное сырье, особая роль отводится плодовым косточкам, которые образуются при производстве компотов и варенья из косточковых плодов, разрезанных на половинки, а также при производстве джема, конфитюра, пюре, соков с мякотью и без мякоти.

Нами обобщены с использованием работ [34-38] данные по физическим свойствам и химическому составу сухих плодовых косточек (таблицы 1.1, 1.2), которые раскрывают важность и целесообразность их переработки на консервных и плодоовощных предприятиях с целью получения из них ценных веществ.

Таблица 1.1- Характеристики состава высушенных косточек

Вид плодов	Содержание косточек в плодах, %	Содержание скорлупы в косточке, %	Содержание ядра в косточке, %
Абрикос	5,2...14,0	68,0...71,0	29,8
Сливы	4,1...10,1	78,7...96,0	3,6...17,6
Вишни, черешни	9,2...21,5	73,5...84,0	12,5...20,2
Персики	8,1...18,0	87,0...94,0	5,7...8,4

Таблица 1.2- Химический состав ядер высушенных косточек

Вид плодов	Сухие вещества, %	Жир, %	Белок, %	Клетчатка, %	Зола, %	Амигдалин, %
Абрикос	93,0	48,0...57,0	25,0...36,0	25,0	2,0...3,0	до 8,8
Вишня	93,5	41,0	18,0...25,0	5,0...16,0	1,5	0,8
Персики	94,0	44,5...48,0	26,0	нет данных	нет данных	1,8...3,6
Слива	93,0	31,0...59,0	20,0...30,0	6,0...7,4	2,5...3,0	1,0...1,8

Анализ таблицы 1.2, в которой сведены данные по химическому составу ядер сухих косточек показывает, что ядра плодовых косточек содержат значительное количество жира, белка, минеральных веществ [39].

Наличие в ядрах плодовых косточек глюкозида амигдалина является отличительной чертой всех косточковых. В присутствии воды, тепла и под воздействием фермента эмульсина глюкозид амигдалина распадается в выделением цианистого водорода (синильной кислоты).

Именно присутствие амигдалина, который представляет собой витамин В17, позволяет использовать ядра абрикосовых косточек с пользой в борьбе с онкологическими заболеваниями. Потребляя их в нужном количестве, организм человека получает порцию своего рода естественной химиотерапии.

Добавление в пищу ядер абрикосовых косточек (2...3 шт. в сутки) служит профилактикой различных заболеваний, связанных с нарушением обмена веществ.

Косточковое масло в присутствии амигдалина является хорошим желчегонным и очистительным средством для кишечника. Используется в случае язвы желудка, повышенной кислотности желудка, ожогах, геморрое, хронического катара кишечника.

С. Нормактатовим и Г. Хайдамукуровим [33] было исследовано содержание в ядрах плодовых косточек микро- и макроэлементов.

Исследования показали, что ядра косточек богаты солями калия и магния и по содержанию этих элементов они значительно превосходят орехоподобные и миндаль. В ядрах косточек также обнаружены железо, медь, цинк, натрий и другие элементы [37].

Скорлупа содержит 70% неусвояемой клетчатки, 0,1...0,7% жира, 2...4% белка, но для пищевых целей не используется [37].

Из вышесказанного следует, что содержащиеся в ядрах косточек полезные вещества представляют большую ценность для производства различных пищевых продуктов.

Работы по использованию косточек в различных отраслях промышленности ведутся во многих странах мира [40].

Так, исследованиями по получению муки из обезжиренных ядер вишневых косточек, проведенными в Италии, установлено, что полученная мука представляет собой ценный кормовой продукт [34].

В США разработан аппарат для рафинирования косточкового масла, которое используется как полноценный пищевой продукт и находит широкое применение при консервировании сардин, т.к. консервы при этом приобретают высокие вкусовые качества [34,40].

Исследования, проведенные в Украине, Польше, Болгарии, Италии, Испании [40] показали, что по химическому составу и вкусовым качествам ядра косточек абрикоса, сливы, персиков, вишни, черешни являются не менее ценными, чем ядра орехов. Они пригодны для производства марципановой массы, халвы, кофезаменителей, конфет, шоколада и других кондитерских изделий.

Жиры из ядер косточек слив и абрикоса по качественному и количественному составам приближаются к жирно-кислотному составу ядер орехов. Белки, содержащиеся в ядрах косточек, полноценны, т.к. включают в себя все необходимые человеку аминокислоты [41].

В Польше ядра косточек абрикоса и сливы используют для получения марципановой и маслянистой массы при производстве халвы, а также в качестве заменителей миндаля при выпечке тортов и пирожных [34,41].

В ДНР на замену орехов в кондитерской промышленности направляется только 2% всех плодовых косточек, хотя экономически замена орехов ядрами плодовых косточек выгодна, т.к. оптовые цены 1 т ядер орехов (0,27...1,4 тыс. руб) превышают себестоимость получения 1 т ядер сухих косточек (0,17...0,29 тыс.руб) [40,41].

Основная часть (свыше 90%) используемых в народном хозяйстве косточек направляется для переработки на предприятия масложировой промышленности – заводы косточковых масел.

Крошка является прекрасным полирующим материалом для изделий из цветных металлов и сплавов, служит для очистки от нагара двигателей внутреннего сгорания, турбин. Область применения – от ремонтных предприятий автомобилестроения до оборонной промышленности. В отличие от других полирующих материалов, косточковая крошка не повреждает поверхности цветных металлов, сплавов и стекла. Случайно оставшиеся на поверхности частицы крошки не вызывают задиров трущейся поверхности из-за механической твердости крошки [40,42].

Косточковый порошок применяется при изготовлении изделий из пластмасс и резины. Его используют также при производстве активированного угля и в качестве специальных клеев, в частности, мебельного.

При производстве масел из ядер косточек прессовым способом образуется 60...70% жмыха, в котором содержится около 40% протеина, столько же безазотистых экстрактивных веществ и 10% жира. Горький привкус жмыха обусловлен наличием в нем глюкозида амигдалина.

Использование жмыхов предполагает получение горькоминдальной воды, синильной кислоты, лечебно-косметического средства для смягчения сухой кожи.

Бензальдегид используется в качестве пищевой эссенции для ароматизации кондитерских, ликеро-водочных и других пищевых продуктов; в производстве фотореактивов.

Горькоминдальная вода применяется в качестве успокаивающего и обезболивающего средства [43]. Жмых, из которого удален бензальдегид, представляет собой ценный высокобелковый корм. Качество его не уступает качеству жмыхов из льняных и рапсовых семян [34].

Таким образом, коэффициент использования косточек, которые образуются как отходы производства при переработке косточковых плодов, теоретически равен 100%.

Показатели, получаемые при переработке плодовых косточек, приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Основные показатели переработки плодовых косточек [16]

Показатели	Косточки		
	абрикоса	сливы	вишни, черешни
Масличность, % к массе косточек	11,5...13,15	6,8...7,6	7,0...7,3
Выход масла, % к массе косточек	0,9...11,5	5,65...6,7	5,56...5,8
Выход жмыха, % к массе косточек	17,8...18,2	12,9...13,0	20,6...22,3
Выход скорлупы (с учетом потерь), % к массе косточек	70,3...72,0	80,2...80,3	71,8...72,6
Масличность жмыха, % к массе жмыха	6,4...7,2	5,3...6,04	6,43...8,2

Удаление косточек из плодов на консервных заводах производится на косточковыбивных, косточковырезных и протирочных машинах.

В любом случае, прежде, чем поставить косточки на завод косточковых масел, их необходимо высушить, т.к. выделенные из плодов косточки имеют повышенную влажность 25...60%, а после протирочной машины – температуру 80...90°C; содержат большое количество примесей в виде остатков мякоти, вытерок, сока. Все эти факторы способствуют быстрой порче косточек и содержащегося в их ядрах масла. ГОСТ 30306-95 «Масло из плодовых косточек и орехов миндаля. Технические условия», по которому заводы косточковых масел принимают сырье, вводит ограничения по влажности – не более 13%; содержание примесей – не более 3% к общему весу; предъявляется также ряд требований к внешнему виду косточек, цвету скорлупы, вкусу ядер.

Полученные косточки промывают для удаления остатков мякоти в моечных машинах, затем высушивают, охлаждают, просеивают, расфасовывают. Данная технологическая схема по переработке косточек на консервных предприятиях предлагается в большей части руководств, монографий, справочников и обзоров по комплексному использованию сырья [37,38,40,44].

Для извлечения косточек из плодов предложены различные конструкции оборудования.

Так, в работе [45] предложено устройство для извлечения косточек из плодов только круглой формы, а устройства для извлечения и отделения косточек из плодов в работах [46,47].

Сушку косточек рекомендуют проводить в шахтных, ленточных, барабанных, камерных и вихревых сушилках.

За счет глубокой сушки до низкой остаточной влажности можно значительно увеличить срок хранения высушенного продукта. Это объясняется тем, что вода, которая остается в продукте после сушки, находится в связанном состоянии и поэтому значительно отличается по своим особенностям от воды в свободном состоянии. Эффект консервации такой воды объясняется в первую очередь ухудшением способности растворять органические и неорганические вещества, что снижает процессы жизнедеятельности микрофлоры и значительно замедляет биохимические изменения. Кроме того, в результате сушки значительно сокращаются затраты на транспортирование и хранение готового продукта.

В консервной промышленности, в настоящее время, существует необходимость разработки специализированного сушильного оборудования, которое бы удовлетворяло всем требованиям приема плодовых косточек на заводах косточковых масел.

1.3. Способы и оборудования для сушки вторичных сырьевых ресурсов

На предприятиях консервной промышленности для сушки вторичных сырьевых ресурсов используют различные способы. Они обусловлены различными видами подвода энергии к продукту, разным характером взаимодействия продукта с диффузной средой и разными значениями абсолютного давления, при котором происходит процесс сушки.

Основные критерии, которые определяют выбор того или иного способа сушки: особенности обрабатываемого продукта; энергозатраты на проведение процесса; качество готового продукта; сложность обеспечения необходимых

технологических параметров; производительность сушильного оборудования; удобство в эксплуатации, возможность механизации и автоматизации процесса; наличие теоретического описания процесса, который позволит с необходимой точностью рассчитать его основные параметры.

Анализ способов сушки, которые исследуются учеными в последние годы, свидетельствуют о сложности выделения универсального способа.

В условиях увеличения дефицита и подорожания энергетических ресурсов одним из определяющих критериев выбора способа сушки является энергозатраты на проведение процесса.

На рисунке 1.1 для сравнения приведены энергозатраты на проведение различных способов сушки.

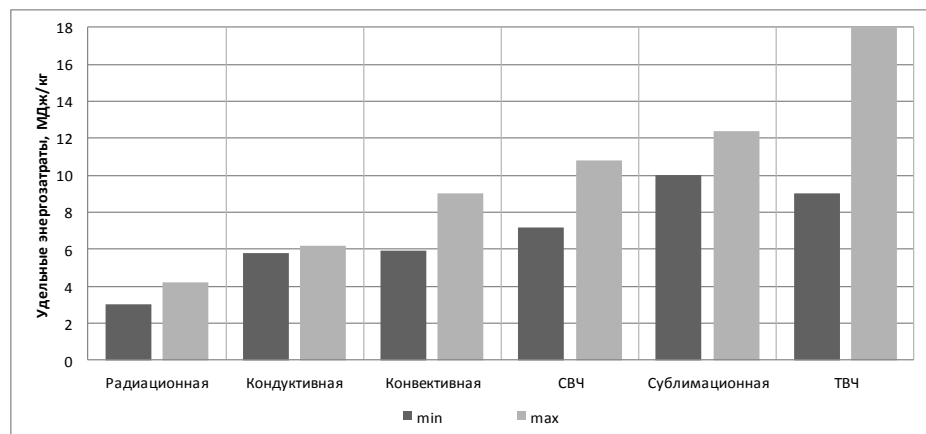


Рисунок 1.1 - Сравнение удельных энергозатрат при разных способах сушки

По сравнению с существующими способами радиационная сушка является одной из наименее энергозатратной [48-54].

Хотя энергозатраты при сушке конвективным способом не самые низкие, за счет других преимуществ (большая производительность, простота организации процесса сушки, аппаратного оформления, эксплуатации и т.п.) для сушки сырья на консервных заводах в большинстве случаев используются именно конвективные сушилки.

Применяются конвективные сушилки различных конструкций: камерные, барабанные, пневматические, ленточные, с кипящим слоем и др. [54-58].

В работе [16] приведен анализ сушилок конвейерного, шахтного и туннельного типов для сушки плодовых косточек конвективным способом.

При опытной эксплуатации этих сушилок были выявлены следующие недостатки:

- в конвейерных и шахтных сушилках можно сушить только хорошо отмытые косточки, т.к. даже незначительное содержание в них примесей приводит к склеиванию косточек, что затрудняет прохождение теплоносителя через слой и резко снижает скорость сушки;

- при испытаниях сушилок наблюдалось налипание косточек на ленты и полки, косточки не пересыпались с ленты на ленту (с полки на полку), поэтому их приходилось вручную соскребывать с лент или отбивать с полок; а в туннельных сушилках косточки склеивались, образуя непродуваемые комки.

В барабанных и камерных сушилках косточки также слипались друг с другом, налипали на стенки сушилок, травмировались.

Кроме того, существенная разнокачественность исходных косточек по влажности и значительная неравномерность их поступления существенно осложняли организацию процесса и управления им.

В работе [16] доказано, что положительные результаты испытаний по использованию описанных сушилок применительно к косточкам отсутствуют.

Работы [58,59] посвящены созданию трехсекционной конвективной сушилки для плодов и овощей, с целью повышения эффективности процесса, учитывающего структурные особенности данного сырья.

По сравнению с традиционными конвективными сушилками удельные энергозатраты ниже у сушилок с псевдосжиженным слоем [58]. Этот способ имеет ряд преимуществ по сравнению с другими [53,55]:

- интенсивное движение, близкое к идеальному перемешиванию продукта;
- максимальная поверхность испарения влаги;
- минимальное гидравлическое сопротивление слоя продукта;
- равномерный нагрев продукта, который позволяет использовать высокие температуры сушильного агента;

- простота конструкции и удобство в эксплуатации;
- удобство автоматизации.

К наиболее перспективной, по мнению Я.М. Гольденберга [4,16], относится сушка косточек в виброкипящем и кипящем слоях. Определены следующие режимы сушки косточек в кипящем слое: температура сушки косточек 80...150°C; время сушки, в зависимости от температуры сушильного агента 22...40 мин; скорость воздуха, в зависимости от вида косточек 4,5...14,3 м/с.

Этим же исследователем отмечается возможность сушки косточек в акустическом поле, токами высокой частоты, прерывистым облучением инфракрасными лучами. Импульсные методы влияют на структуру и связь влаги с материалом, ускоряя сушку. Однако, результаты испытаний, подтверждающих эффективность и технологичность указанных методов сушки для косточек в данных источниках не приводятся.

Для исключения слипания косточек в процессе сушки и усовершенствования технологического процесса в работе [16] предложен порционно-циркуляционный способ сушки (скорость сушильного агента 0,75 м/с, температура сушильного агента 100°C), который учитывает вышеотмеченные особенности косточек при сушке. При этом установлена оптимальная температура нагрева косточек 90..110°C.

Данные показатели температуры нагрева противоречат результатам проведенных исследований более поздней работы [18]. Согласно этим исследованиям, термообработку (сушку) ядер косточковых культур нужно вести интенсивно и при таком температурном режиме, при котором ядра нагревались бы не выше 90°C, т.к. тепловая обработка воздействует на один из основных показателей качества масла – его кислотное число.

Однако, в работе [18] не уточняется, как скоро после удаления косточки из плода проводили процесс сушки. Отметим, что срок хранения косточек после их извлечения из плода оказывает существенное влияние на значение кислотного числа [19].

Наряду с очевидными достоинствами сушки в аппаратах с псевдосжиженным слоем данный способ имеет и ряд недостатков [53,55], наиболее существенными из них являются;

- относительно большие потери теплоты с отработанным сушильным агентом по сравнению с радиационным и кондуктивным способами;
- интенсивное перемешивание продукта в рабочем объеме приводит к выравниванию различных его свойств, снижению температурных напоров, что приводит к уменьшению скорости процессов.

Ряд публикаций свидетельствуют о перспективности использования комбинированных способов сушки [20,50, 56-61].

В работах ученых [62,63] представлена схема сушильной установки для дисперсных продуктов, в которой процесс сушки осуществляется кондуктивным способом в сочетании с активным перемешиванием. Основной составляющей установки является вращающийся термосифон, который обеспечивает замкнутый испарительно-конденсационный цикл теплоносителя и непрерывное перемешивание продукта. На описанной установке проведена серия экспериментов с вареным горохом. Энергозатраты по сравнению с традиционной сушкой указанного продукта на ленточных сушилках уменьшены более чем в 4 раза. Отмечена перспективность использования описанного способа для пищевых продуктов, близких к неньютоновским жидкостям.

В [64-66] приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований способа сушки смешанным конвективно-кондуктивным теплоподводом. Особенность такого способа заключается в том, что сушка продукта происходит в функциональных емкостях, при этом поверхность теплообмена значительно больше, чем поверхность массообмена. Отмечается, что показатели качества полученных сушеных продуктов не уступают продуктам, полученным при сушке сублимационным способом. Проведены серии исследований по сушке картофеля, моркови, тыквы, лука и т.п.

Сравнения результатов смешанного теплоподвода при сушке вышеуказанных продуктов с традиционной конвективной сушкой и сушкой в

псевдооживленном слое указывают на лучшие энергетические и качественные показатели первого.

К недостаткам процесса сушки смешанным теплоподводом, на наш взгляд, следует отнести необходимость жесткого соблюдения технологических параметров процесса, т.к. при небольших отклонениях происходит блокировка механизмов тепло-массообмена, обеспечивающих эффективность процесса. Использование функциональных емкостей усложняет организацию непрерывного процесса сушки, что в свою очередь влияет на производительность соответствующего оборудования.

Путем сравнения обобщенных кривых сушки ядер косточек абрикос конвективным и комбинированным ТВЧ-конвективным способом в работе [67] показано, что нагрев ТВЧ является более перспективным для процесса обезвоживания ядер косточек абрикоса по сравнению с чистой конвекцией.

Авторы объясняют это тем, что ядра косточек являются сложным органическим продуктом, в процессе тепловой обработки в ядрах происходит не только уменьшение массы за счет удаления влаги (что характерно для большинства влажных материалов), но и уменьшение массы из-за биохимических изменений, происходящих в них при высоких температурах. Поэтому обоснование метода сушки для таких продуктов, какими являются ядра, необходимо проводить с учетом этих особенностей.

В работах [58,68] сравниваются конвективный и комбинированный СВЧ-конвективный способы сушки виноградных выжимок и томатов. Отмечено, что при сушке всех продуктов за счет энергии СВЧ достигается интенсификация процесса.

В работе [68] приведена схема экспериментальной установки для сушки плодоовощного сырья комбинированным СВЧ – конвективным способом в кипящем слое. Приведенные исследования по сушке кусочков картофеля, моркови и свеклы показали, что применение энергии СВЧ позволяет сократить продолжительность сушки на 20...30 %.

В работах [68-70] сравниваются конвективный и комбинированный СВЧ-конвективный способы сушки корней хрена, винограда бескосточковых сортов и томата. Отмечено, что восстановление хрена, полученного комбинированным СВЧ-конвективным способом, лучше, чем восстановление при чистой конвекции; качество винограда, высушенного с помощью СВЧ-конвективного способа, отвечает требованиям нормативно-технической документации. При сушке всех продуктов за счет энергии СВЧ достигается интенсификация процесса. На основе комплексных исследований авторами разработаны технологические линии непрерывного и периодического действия по сушке винограда бескосточковых сортов комбинированным способом. Подчеркивается, что разработанная технология позволяет в большей степени механизировать процесс, получить продукт высокого качества и уменьшить затраты энергии. Однако авторы не приводят конкретные параметры разработанных технологий и оборудования.

Широкое применение в промышленном производстве комбинированных способов, которые используют ТВЧ, ограничивается в связи с рядом нерешённых проблем: неоднородность проникновения электромагнитной энергии в продукт, в результате чего имеет место неравномерность распределения влагосодержания вдоль толщины продукта, что в свою очередь влияет на качество конечного продукта; сложность в технической реализации и эксплуатации оборудования в промышленных условиях; низкая производительность; повышенные требования по охране труда [53].

В работах [71-73] рассмотрены перспективы использования ультразвуковых колебаний для интенсификации сушки. Приведена схема лабораторной акустически-конвективной установки. Установлено, что скорость сушки по сравнению с известными способами в 2...2,5 раз выше. Интенсивность акустической сушки зависит от режима ультразвуковых колебаний: лучшие результаты достигаются при сравнительно невысокой частоте (0,4...7,0 кГц), однако при значительной силе звука (150 дБ). Наиболее перспективным, по мнению авторов, является применение ультразвуковых колебаний в комбинации с другими видами энергоподвода.

Значительное количество работ посвящено исследованию процесса сушки с использованием вакуума, в том числе сублимационной сушки [20,50,59,74-78].

Результаты этих исследований свидетельствуют о высоком качестве конечного продукта, обусловленного относительно низкими температурами, при которых происходит процесс сушки. Для снижения энергозатрат при сушке в среде с пониженным давлением используются дополнительные энергоподводы – СВЧ, ИК и ультразвуковые волны. Однако эти способы пока не позволяют решить другие проблемы – сложность конструкции и эксплуатации, небольшая производительность оборудования.

Широкое применение для сушки вторичного сырья в пищевой промышленности имеет сушка ИК-излучением.

Работы [79,80] посвящены исследованию ИК- конвективного способа сушки яблочных и морковных выжимок при различных температурных параметрах. Установлены рациональные параметры процесса сушки и предварительной обработки, которые обеспечивают высокий уровень сохранения ценных веществ.

В работе [81] произведен системный анализ процесса тепловой обработки ядер плодовых косточек путем ИК-облучения, с целью изучения тепло-, массообменных биохимических явлений, протекающих в ядрах плодовых косточек.

В работе [18] произведены экспериментальные исследования процесса тепловой обработки лепестков ядер косточковых культур. Предложена экспериментальная установка с использованием импульсного воздействия ИК-облучения, при этом температура материала достигает 80...85 °С.

Однако в приведенных исследованиях не учтено влияние температурных режимов на качество полученного в дальнейшей обработке масла.

В работе [82] выполнено экспериментальное сравнение инфракрасной и конвективной сушки виноградных выжимок. Установлено, что инфракрасная сушка позволяет увеличить скорость процесса сушки на 34...44% и уменьшить энергетические затраты на 20...25% по сравнению с конвективным способом сушки.

Исследованию оборудования с ИК-теплоподводом посвящено ряд работ [73,83-86].

В работе [87] проводились исследования процесса сушки ИК-теплоподводом, результаты которых показали, что интенсивность биохимических изменений в семенах сои определяется в основном температурой нагрева, приводится оптимальный режим водо-тепловой обработки: температура 120...130°C, начальная влажность 16...18%, при этом срок хранения масла увеличивается в 2...3 раза.

Среди преимуществ сушки ИК-излучением по сравнению с другими способами можно выделить следующие:

- ИК-лучи преодолевают путь от источника излучения до объекта облучения в миллионные доли секунды, не встречая сопротивления приграничного слоя;

- ИК-лучи проникают на некоторую глубину в середину материала в зависимости от его оптической характеристики, что приводит к объемному поглощению энергии;

- применение ИК-излучения позволяет использовать плотность теплового потока возле поверхности обрабатываемого продукта больших величин, чем при очень интенсивных режимах конвективной теплоотдачи (в 30...70 раз).

- при правильной установке отражателей затраты излучаемой энергии сводятся к минимуму;

- обработка ИК-излучением повышает качество получаемого продукта в процессе правильно выбранных режимов сушки.

Однако для качественного проведения процесса сушки ИК-излучением в промышленном производстве необходимо решить ряд технических и технологических проблем: необходимость правильного размещения ИК – излучателей относительно продукта; регулирование насыпного слоя продукта; необходимость обеспечения изменяющегося режима ИК- излучения по плотности потока энергии и длины волны в зависимости от текущего влагосодержания продукта на протяжении всего процесса (отклонение от заданных режимов может

привести к неравномерному удалению влаги и перегреву отдельных зон продукта, что негативно повлияет на его качество) и т.д.

Значительное количество публикаций, которые посвящены экспериментальным исследованиям сушки вторичного растительного сырья, подтверждают отсутствие одного или нескольких рациональных способов сушки и необходимость дальнейших поисков новых перспективных способов сушки и соответствующего оборудования.

Одним из таких способов является способ, в котором применяют перемещение продукта и комбинированный способ обработки ИК-излучением в виброкипящем слое.

Результаты наших предварительных исследований по сушке плодовых косточек этим способом приведены в работах [88-90]. В ходе экспериментов исследовался процесс сушки плодовых косточек вишни, черешни, абрикоса, персика, сливы, а также их ядер при различных значениях плотности теплового потока.

Способ сушки продуктов ИК-излучением в виброкипящем слое по сравнению с простым ИК-излучением имеет ряд преимуществ [58,59,90-97].

При ИК-излучении в виброкипящем слое происходит активное перемешивание продукта, вследствие чего он многократно и попеременно попадает в поле ИК-облучений. При этом достигается эффективное движение и перемешивание продукта, максимальная поверхность испарения, равномерное импульсное нагревание материала при сочетании режимов «отдыха» и теплового воздействия. Такая сушка позволяет высушивать материал до низкой остаточной влажности (4...8%) и значительно снизить продолжительность процесса.

Анализ движения продукта в виброкипящем слое при воздействии ИК-излучений показывает, что в хаотичном движении продукта существует элемент периодичности. Продукт, который перемешивается в данном слое, кратковременно присутствует в зоне облучения, успевая нагреться. При этом происходит испарение влаги с его поверхности. Пребывая вне зоны излучения, продукт охлаждается. Температурный градиент изменяет свое направление,

совпадая с направлением градиента содержания влаги. В этот период термодиффузия способствует перемещению влаги – интенсифицирует процесс [14,40,58,59,97-100,126,127].

Высокая плотность теплового потока при ИК –излучении в виброкипящем слое обеспечивает быстрый нагрев и сушку пищевого сырья.

В работе [35] авторы провели исследования сушки лепестков ядер плодовых косточек абрикоса. Исследования проводились на экспериментальной установке, которая работает следующим образом. Лепестки ядер плодовых косточек через распределительный шнек загружаются на сетчатую ленту конвейера. Перед их поступлением в рабочую камеру регулируется толщина слоя продукта. При поступлении в первую зону установки продукт подвергается мощному импульсному воздействию ИК-облучения. При этом температура продукта достигает $50...55^{\circ}\text{C}$ в течении $50...60$ с, далее начинается вторая зона, которую продукт проходит без тепловых воздействий в течении $50...60$ с, В третьей зоне продукт подвергается тепловой обработкой в течении $20...25$ с, температура его достигает $80...85^{\circ}\text{C}$ и так далее. Процесс продолжается $430-440$ с, в течение которых продукт подвергается импульсному ИК-облучению. Несмотря на недостатки экспериментальной установки, проведенные исследования подтвердили хорошее качество высушенных ядер (по сравнению с ленточными и барабанными печами), высокую интенсивность процесса.

Исследования С. Коган [74] показали, что подсушивание овощей при интенсивном ИК-облучении в неподвижном слое приводило к их выгоранию, а при использовании виброкипящего слоя при таких же режимах продолжительность процесса сокращалась в $8...10$ раз с сохранением хорошего качества продукта.

Экспериментальные исследования различных способов удаления влаги с окары (кондуктивной сушки, конвективной сушки в аэрокипящем слое, виброкипящем слое) показали, что наиболее рациональным решением является сушка окары ИК-излучением в виброкипящем слое. Рациональными режимами сушки окары ИК –излучением в виброкипящем слое следует считать: плотность

теплового потока - 2000...4000 Вт/м², толщина слоя - 5...12 мм, продолжительность процесса – 25...40 мин, конечное влагосодержание продукта – 10...12%, максимальная температура -100 °С.

Высокую эффективность использования вибрационного воздействия подтверждают результаты исследований по сушке чайной продукции, проведенные на действующих производственных установках. Специалистами института машиноведения им. А.А. Благонравова была разработана вибрационная сушильная установка непрерывного действия. Исследования, проведенные на данной установке, подтвердили эффективность использования вибрационного влияния на сушку для различных видов чая.

Проведенные исследования показали перспективность применения сушки с использованием комбинированного процесса ИК- излучения и виброкипящего слоя в промышленном масштабе по сравнению с конвективным. При этом для определения рациональных режимов процесса, разработки конструкции промышленного оборудования, особенностей сушки различных видов вторичного пищевого сырья необходимо провести ряд экспериментальных исследований.

1.4. Поиск рациональных способов сушки плодовых косточек как капиллярно-пористых тел

Теоретические основы тепло- и массообмена в процессах сушки пищевого растительного сырья и их аппаратное оформление отражены в работах А.В. Лыкова, М.В. Лыкова, П.Д. Лебедева, П.Г. Романкова, А.С. Гинзбурга, А.М. Голдовского, В.В. Белобородова, В.В. Красникова, В.Е. Куцаковой, В.Ф. Фролова, Е.П. Кошевого, Г.К. Филоненко, И.А. Рогова, Б.А. Вороненко и других ученых.

Созданием и исследованием установок для сушки пищевых продуктов занимается целый ряд ученых-исследователей и созданных ими школ. Это прежде всего школы ученых: Г.К. Филоненко, Н.А. Гришина и А.Г. Бурдо [31,50,98,101], Л.О. Орлова и А.Ф. Буляндры [102,103], А.А. Долинского, К.Д. Малецкого, Ю.Ф. Снежкина Н.И. Никитенко [53,104], А.И. Чернявского и В.Д. Кармазина

[105,106], В.М. Марчевского [107], В.А. Потапова и М.И. Погожих [64,65,108], А.Н. Поперечного (ГО ВПО «ДонНУЭТ им. М. Туган-Барановского») и других.

В соответствии с анатомическим и структурным строением, химическим составом отдельная косточка, как объект сушки, представляет собой биокolloидную систему трехкомпонентного сочетания: капиллярно – пористого (косточковая оболочка) и коллоидного (ядро) тел и воздушного пространства между оболочкой и ядром, для которых характерно наличие всех видов связи влаги согласно классификации академика Н.А. Ребиндера [78].

Общее количество влаги в косточке и распределение ее между ядром и косточковой оболочкой зависит от многих факторов: погодных условий, степени зрелости и биологических особенностей самих косточек. Непосредственно, после извлечения из плода средняя влажность косточек колеблется в широких пределах от 65 до 25%.

Сушка плодовых косточек должна протекать равномерно для всего слоя с минимальными затратами теплоты и электроэнергии, с максимальной скоростью удаления влаги при наилучших технологических свойствах высушиваемого продукта. Сушка представляет собой комплекс одновременно протекающих и влияющих друг на друга явлений. Это перенос теплоты от агента сушки к высушиваемому продукту через его поверхность, испарение влаги, перемещение влаги с поверхности продукта в сушильную зону [56,58,109].

Специфические свойства плодовых косточек как объекта сушки - неоднородность состава (наличие ядра, косточковой оболочки, воздушного пространства между ядром и оболочкой), естественная неоднородность косточек по размерам, массе и влажности, высокая прочность косточковой оболочки, влагоинерционность, низкая теплопроводность, термолабильность белковой и липидной частей косточки – предъявляют особые требования к способу сушки и к конструкции сушильных устройств [16,94,109-111].

При сушке не должны ухудшаться качественные показатели, не должно происходить растрескивания поверхности косточковой оболочки. Не допускается

увеличение в процессе сушки кислотного и йодного чисел жира, приводящие к изменению вкусовых и пищевых достоинств получаемого масла [16].

Неоднородность косточки – наличие высокобелкового ядра, прочно удерживающего влагу, и косточковой оболочки, легкоотрывающейся влагу – требует создания таких условий сушки, при которых будет происходить интенсивное удаление слабо связанной поверхностной влаги из капиллярно-пористой оболочки и перемещение прочно связанной влаги в коллоидном ядре к поверхности косточки.

Влагоинерционность косточек, обусловленная низким коэффициентом теплопроводности, создает условия для растрескивания косточковой оболочки при конвективной сушке. При испарении влаги с поверхности происходит усадка ядер, а из-за низкой теплопроводности влага не успевает переместиться из глубинных слоев ядра к поверхности. В результате этого косточковая оболочка трескается.

Непосредственным исследованиям процесса сушки плодовых косточек и их ядер посвящено всего несколько работ [16, 18, 31,48].

На испарение влаги из материала при сушке влияют в основном два процесса: теплопроводность и термотеплопроводность, которые характеризуют внутренний тепло- и влагоперенос. При испарении влаги поверхностные слои подсушиваются и создается градиент влагосодержания, т.е. внутри материала влаги больше, чем на поверхности. Это явление приводит к перемещению влаги из внутренних слоев к поверхностным слоям и называется теплопроводностью. Причем это перемещение тем интенсивнее, чем выше температура материала. Но влага перемещается не только благодаря градиенту влагосодержания, она перемещается и благодаря градиенту температур (термотеплопроводности), т.е. влага перемещается от мало нагретого участка к более нагретому, или, иными словами, влага перемещается по направлению потока теплоты.

Применение того или иного способа сушки может способствовать в одном случае совпадению направления перемещения влаги, как в результате теплопроводности, так и термотеплопроводности, а в другом случае процесс

испарения влаги в результате влагопроводности тормозит процесс испарения влаги в результате термовлагопроводности. В первом случае процесс испарения влаги будет протекать значительно интенсивнее, чем во втором. Для того, чтобы эти процессы испарения влаги совпадали по направлениям, необходимо, чтобы температура поверхности ядра была ниже температуры внутри ядра. Сушка будет значительно тормозиться, когда температура косточковой оболочки выше температуры внутри ядра.

Для обеспечения равномерного повышения температуры в объеме коллоидных материалов, характеризующихся малым коэффициентом диффузии влаги α_m , сушку желательно проводить при осциллирующих режимах. Под осциллирующими режимами следует понимать или изменение облученности во времени (при больших влагосодержаниях материала облученность значительная, при уменьшении содержания влаги уменьшается и облученность), или чередование периодов нагрева и отдыха (прерывистое облучение). Прерывистое облучения предполагает, что при отдыхе температурный градиент в материале меняет свое направление, и перемещение влаги в зону испарения происходит как за счет влагопроводности, так и термовлагопроводности.

При сушке плодовых косточек с конвективным подводом теплоты в шахтных прямоточных, барабанных сушилках явление термовлагопроводности препятствует перемещению влаги изнутри к поверхности ядер косточек и интенсивность потока влаги равна разности между интенсивностью потока влаги в результате влагопроводности и интенсивностью потока влаги в результате термовлагопроводности. В барабанных сушилках процесс сушки происходит в перемешивающемся слое косточек, а сушильный агент выполняет дополнительную функцию по транспортированию их внутри сушилки [112-114]. Продолжительность пребывания в сушилке отдельных косточек может различаться на 30%, что отрицательно влияет на равномерность их нагрева и сушку. Увеличивается количество обрубленных семян. Съем влаги составляет 2-4% за один проход.

При сушке косточек в шахтных сушилках выявлен ряд существенных недостатков: неравномерность скорости движения внутри шахты и распределения сушильного агента в зонах сушки [113]. Следствием этого является неодинаковое и местами очень сильное нагревание косточек по всей ширине шахты, что приводит к ухудшению качества ядер и содержащего в них масла.

Используются рециркуляционные сушилки, в которых сушка и отлежка многократно чередуется, что способствует более полному и равномерному высушиванию косточек. При отлежке происходит перераспределение влаги внутри косточки, а также испарение влаги с ее поверхности за счет аккумулированной теплоты. При испарении влаги температура поверхности косточек снижается. Это приводит к тому, что влага в косточке начинает перемещаться к поверхности не только в результате влагопроводности, но и влагопереноса, обусловленного свойством термовлагопроводности.

Перспективным является способ сушки с использованием инфракрасного излучения в виброкипящем слое [96,97]. Преимущества этого способа рассматривались выше.

Все выше отмеченное предполагает целесообразность использования способа сушки плодовых косточек ИК - излучением в сочетании с их активным вибрационным перемешиванием и транспортировкой.

1.5. Научные предпосылки исследования процесса сушки плодовых косточек с применением ИК-излучения и виброкипящего слоя

1.5.1. Обоснование параметров и режимов вибрационного транспортирования

При проектировании технологических вибрационных машин практическое значение имеет задача определения закона движения продукта. Для этого прежде всего необходимо понять физическую сущность технологического процесса, то

есть взаимодействие свойств продукта и его динамическое влияние на движение машины.

В связи со значительной сложностью процесса вибротранспортирования насыпных грузов, при теоретическом его исследовании делают ряд упрощающих предположений. На основе целого ряда экспериментальных исследований [115-122] установлено, что сделанные предположения не вносят существенных погрешностей в конечные результаты.

Прежде всего, при теоретических исследованиях процесса перемещения материала предполагается, что рабочий орган вибротранспортирующих машин осуществляет гармонические колебания.

Характер движения перемещающихся частиц материала рассматривается также с рядом упрощающих предположений по отношению к тем действующим факторам, которые трудно учесть. Относительно свойств частиц материала не учитываются: плотность (физическая и насыпная), форма частиц, влагосодержание, воздухопроницаемость, упругие свойства, внутреннее трение и другие внутренние силы; относительно создания вибромашины - форма колебаний и тип привода, жесткость конструкции рабочего органа; относительно взаимодействия насыпного материала с рабочим органом (желобом) - процессы качения, скольжения, прилипания и тому подобное.

При моделировании движения тел вибротранспортированием и родственных ему других способов определяют незначительное количество показателей: скорость транспортирования, скорость взаимного перемещения частиц, мощность привода, влияние загрузки на движение рабочего органа.

Простейшая модель твердых тел и сыпучей среды, которые перемещаются или обрабатываются с помощью вибрационных машин и устройств - теоретическая модель анализа движения материальной точки (частицы массой m) на вибрирующей жесткой плоскости.

Рассматривается движение отдельной материальной точки, вместо сыпучей среды, обладающей определенными физико-механическими свойствами,

присущими сыпучей среде. Возможность такой замены подтверждена многочисленными экспериментами [118-119].

Частица может находиться по отношению к рабочей поверхности: в относительном покое; скольжении вперед; скольжении назад; движении с отрывом (или полетом).

Таким образом, в зависимости от требований технологии, подбирая различные режимы возбуждения рабочего органа, возможно, добиться желаемого движения частиц.

Наиболее эффективными с точки зрения тепло - и массопереноса в вибрирующем слое является отрывные режимы движения частиц [120-122]. Они обеспечивают наибольшие скорости перемещения частиц и стабильность движения [115-117]. При отрывном движении частиц в пространстве между вибрирующей поверхностью (вибростакана) и нижним слоем частиц возникает знакопеременный аэродинамический напор (разрежения и повышения давления) [118,123]. Разрежение возникает в начале движения материала (слоя частиц) в момент, когда увеличивается расстояние между слоем и поверхностью (дном стакана). При обратном движении слоя частиц, наоборот, происходит повышение давления.

Рассмотрим вибрационный транспорт с подбрасыванием материала (косточек) от поверхности рабочего органа.

На рисунке 1.2 показана схема вибрационного транспортера, где рабочий орган - лоток совершает колебания, направленные под углом α к горизонту, по гармоническому закону:

$$S = A \sin \omega t, \quad (1.1)$$

где: S - перемещение; A – амплитуда; ω – угловая частота; t – время.

В системе координат, которая связана с поверхностью лотка, на косточку в общем случае действуют: сила тяжести $F_m = mg$, трения по поверхности лотка $F_{тр}$, инерции I , нормальная реакция поверхности на косточку N .

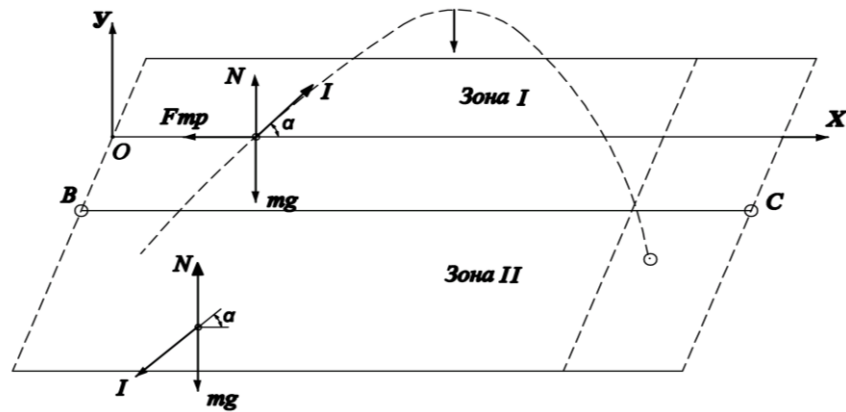


Рисунок 1.2- Расчетная схема сил, действующих на косточку плода
в аппарате виброкипящего слоя

Вертикальная и горизонтальная составляющие движения рабочего органа определяются соотношениями:

$$y = A \sin \alpha \sin \omega t, \quad x = A \cos \alpha \sin \omega t. \quad (1.2)$$

Дифференцирование (1.2) по времени дает составляющие, согласно [120]:

по скорости:

$$\dot{y} = A \omega \sin \alpha \cos \omega t, \quad \dot{x} = A \omega \cos \alpha \cos \omega t, \quad (1.3)$$

по ускорению:

$$\ddot{y} = -A \omega^2 \sin \alpha \sin \omega t, \quad \ddot{x} = -A \omega^2 \cos \alpha \sin \omega t. \quad (1.4)$$

Дифференциальное уравнение относительно движения частицы (косточки) в осях XOY , жёстко связанных с вибрирующей поверхностью, в данном случае имеют вид:

$$m \ddot{x} = mA \omega^2 \cos \alpha \sin \omega t + F_{mp}; \quad (1.5)$$

$$m \ddot{y} = mA \omega^2 \sin \alpha \sin \omega t - mg + N, \quad (1.6)$$

где: m – масса частицы, кг;

α – угол наклона траектории колебаний относительно плоскости (угол вибрации), град;

$F_{тр}$ - сила сопротивления движению частицы, которую можно считать силой сухого (кулоновского) трения, Н;

N - нормальная реакция, Н;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Является целесообразным колебательную плоскость BC рассматривать в двух зонах (рисунок 1.2). Зона I определяется положениями, которые занимает подвижная плоскость выше своего статического равновесия, в зависимости от того, движется она вверх или вниз, а зона II - теми, которые занимает плоскость ниже своего статического равновесия.

Движение частиц рассмотрим относительно подвижной системы координат XOY , связанной с плоскостью BC .

Анализируя силы, действующие на частицу (косточку), которая попала на плоскость BC , легко заметить, что в зоне II, в каком бы направлении плоскость не осуществляла движение, переносная сила инерции стремится переместить частицу вдоль отрицательного направления оси OX и увеличить силу нормального давления на плоскость.

В зоне I переносная сила инерции стремится оторвать частицу от плоскости и одновременно сообщить ей движение в направлении оси OX . Такая асимметрия создается благодаря наличию угла между направлением вибрации и плоскостью BC .

В связи с тем, что направление вибрации имеет определенный угол α с плоскостью BC , появляется возможность в обеспечении преимущественного движения частиц материала вверх по плоскости BC при симметричном ее колебательном движении.

Как уже было нами определено для интенсификации тепло - массообмена при сушке косточек ИК-излучением желательнее транспортировать косточки с максимальным подбрасыванием и при этом их переворачиванием. При этом достигается равномерное воздействие ИК-лучей на весь объем продукта.

Рассмотрим сначала вертикальное движение косточки после отрыва ее от рабочего органа, который происходит в момент времени t_1 , когда вертикальное

ускорение \ddot{y} по абсолютной величине становится равным ускорению свободного падения g :

$$A\omega^2 \sin \alpha \cos \omega t_1 = g. \quad (1.7)$$

Основным параметром вибрационного транспортера данного типа является безразмерный коэффициент режима вибрации - параметр перегрузки:

$$k_g = \frac{A\omega^2 \sin \alpha}{g}. \quad (1.8)$$

Этот коэффициент показывает во сколько раз максимум вертикальной составляющей ускорения рабочего органа \ddot{y}_{max} больше ускорения свободного падения.

Частица будет двигаться без отрыва от поверхности (без «подбрасывания») если $N(t) > 0$, то есть

$$k_g = \frac{A\omega^2 \sin \alpha}{g} \leq 1. \quad (1.9)$$

При выполнении условия

$$k_g = \frac{A\omega^2 \sin \alpha}{g} > 1, \quad (1.10)$$

противоположного (1.9) в момент времени t_1 , который определяется равенством-соотношением [120]:

$$\sin \omega t_1 = \frac{1}{k_g}$$

или

$$\omega t_1 = \arcsin \frac{1}{k_g}, \quad (1.11)$$

изначально находясь на поверхности, частица отрывается от нее; в данный момент времени нормальная реакция $N(t)$ преобразуется в ноль. Поэтому при выполнении (1.11) будет иметь место движение частицы с отрывом от поверхности (с подбрасыванием). В отличие от движения без подбрасывания в

этом случае может существовать бесконечное множество различных установившихся режимов движения.

Свободный полет косточки в вертикальном направлении описывается уравнением (рисунок 1.3):

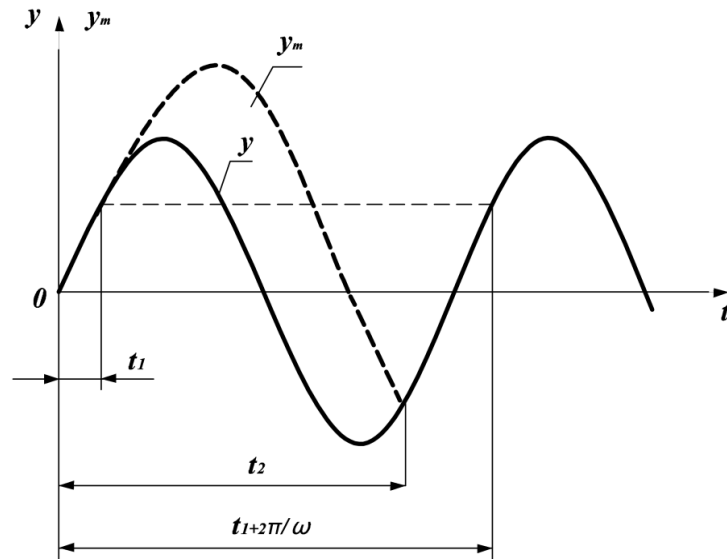


Рисунок 1.3 – Траектория движения косточки по лотку

$$y_m = y_o + \dot{y}_o(t - t_1) - g(t - t_1)^2 / 2, \quad (1.12)$$

где: y – вертикальное перемещение косточки;

y_o – начальное положение косточки в момент отрыва от рабочего органа;

\dot{y}_o – начальная скорость косточки в момент отрыва.

Из соотношений (1.2) и (1.3) получаем:

$$y_o = A \sin \alpha \sin \omega t_1, \quad (1.13)$$

$$\dot{y}_o = A \omega \sin \alpha \cos \omega t_1. \quad (1.14)$$

Подставив (1.13) и (1.14) в (1.12) получаем:

$$y_m = A \sin \alpha \sin \omega t_1 + A \omega \sin \alpha \cos \omega t_1 (t - t_1) - \frac{g(t - t_1)^2}{2}. \quad (1.15)$$

Момент времени t_2 падения косточки на рабочий орган получаем из условия $y = y_m$:

$$A \sin \alpha \sin \omega t_2 = \frac{g}{\omega^2} + \frac{gk_g \cos \omega t_1}{\omega} (t_2 - t_1) - \frac{g(t_2 - t_1)^2}{2}. \quad (1.16)$$

Если обозначить

$$U = \frac{\omega}{2}(t_2 - t_1), \quad (1.17)$$

то условие (1.16) принимает вид [122]:

$$A \sin \alpha \sin(2U + \omega t_1) = \sin \omega t_1 + \frac{2Ugk_g}{\omega^2} \cos \omega t_1 - \frac{2gU^2}{\omega^2},$$

или

$$\sin(2U + \omega t_1) = \sin \omega t_1 + 2U \cos \omega t_1 - 2U^2 \sin \omega t_1 \quad (1.18)$$

Из квадратного уравнения (1.18) при известном значении ωt_1 находим U , а затем t_2 из (1.17). В момент времени t_2 происходит удар и если отскок отсутствует, то косточка движется в контакте с рабочим органом до нового отрыва при условии:

$$t = t_1 + \frac{2\pi}{\omega}.$$

На рисунке 1.2 штриховой линией приведен график y_m при $t_2 < t_1 + \frac{2\pi}{\omega}$.

При $t_2 = t_1 + \frac{2\pi}{\omega}$ наблюдается режим непрерывного подбрасывания. Для этого режима $U = \pi$.

Подставляя $U = \pi$ в уравнение (1.18), определяем значение ωt_1^* , при котором будет иметь место режим непрерывного подбрасывания [122]:

$$\sin \omega t_1^* = \sin \omega t_1^* + 2\pi \cos \omega t_1^* - 2\pi^2 \sin \omega t_1^*$$

или
$$\operatorname{tg} \omega t_1^* = \frac{1}{\pi}.$$

Безразмерный коэффициент режима вибрации при непрерывном подбрасывании будет равен [120]:

$$k_{\epsilon}^* = \frac{1}{\sin \omega t_1^*}$$

или

$$k_{\epsilon}^* = \sqrt{\pi^2 + 1} \approx 3,3.$$

В промышленных вибрационных транспортерах как правило принимают $1 < k_{\epsilon} < 3,3$ [122].

Горизонтальная скорость косточки при свободном полете сохраняется постоянной и равной горизонтальной составляющей рабочего органа в момент отрыва косточки [119]:

$$V_z = A\omega \cos \alpha \cos \omega t_1,$$

или

$$V_z = A\omega \cos \alpha \frac{\sqrt{k_{\epsilon}^2 - 1}}{k_{\epsilon}}. \quad (1.19)$$

Таким образом, в рамках принятой постановки задачи возможно определение параметров вибрации рабочего органа вибромашины - амплитуды, частоты, скорости транспортирования.

В случае достаточно интенсивного подбрасывания, отвечающему значению коэффициента режима вибрации (параметра перегрузки):

$$k_{\epsilon} > 3,5 \frac{1 + R^2}{(1 + R)^2},$$

где R - коэффициент обновления ($0 < R < 1$), с погрешностью, не превышающей 15% среднюю скорость транспортирования частицы можно определить по формуле [119]:

$$V \approx A\omega \cos \alpha, \quad (1.20)$$

то есть скорость транспортирования оказывается приблизительно равной амплитуде продольной проекции скорости колебаний вибрирующей плоской поверхности.

Недостаток приведенных простых приближенных формул в том, что они не отражают зависимость скорости от коэффициента трения. Однако при наличии

интенсивного подбрасывания эта зависимость является довольно слабой, и во многих случаях может не учитываться [119].

Рассмотрим пример использования представленных зависимостей.

Если частота колебаний $n=500$ 1/мин, то есть

$$\omega = \pi \cdot 500 / 30 = 52,2 \frac{1}{c},$$

амплитуда $A=0,003$ м, угол вибрации $\alpha=30^\circ$, коэффициент трения $f=1$, то коэффициент вибрации:

$$\kappa_g = A\omega^2 \sin \alpha / g = 0,003 \cdot (52,2)^2 \cdot \sin 30^\circ / 9,81 = 0,72 < 1.$$

При этом частица будет двигаться без отрыва от поверхности.

Если $n=1500$ 1/мин ($\omega=\pi 1500/30=157$ 1/с), $\alpha=30^\circ$, $A=0,004$ м, то

$$\kappa_g = 0,004 \cdot (157)^2 \cdot \sin 30^\circ / 9,81 = 8,7 > 1,$$

То есть осуществляется движение с подбрасыванием.

Скорость транспортирования при этом будет равна:

$$V = 0,004 \cdot 157 \cdot \cos 30^\circ = 0,68 \text{ м/с}.$$

Рассмотренные нами аналитические зависимости относительно движения одиночного тела по вибрирующему рабочему органу (лотку), совершающего колебания, направленные под углом α к горизонту по гармоническому закону подтверждаются теоретическими исследованиями относительно движения слоя материала в вибрирующем цилиндре [118]. Полученные зависимости позволяют исследовать движение перемещаемого материала и определить скорость вибротранспортирования по приведенной формуле (1.20).

Полученное в [118] уравнение относительно высоты подбрасывания материала показывает, что высота прыжка материала не зависит от высоты его слоя. Это обстоятельство объясняется тем, что на материал кроме сил, которые возникают под действием разности газового давления (на верхнюю и нижнюю части слоя), действуют силы, пропорциональные высоте слоя (сила инерции и сила тяжести).

1.5.2. Теоретические основы процессов тепло массообмена в плодовых косточках при воздействии лучистой энергии

Для анализа процессов внутреннего тепломассопереноса при ИК-сушке особый интерес представляет исследование изменения полей температуры и влагосодержания внутри продукта.

Исследованиями многих авторов [79,80,81,83,85,86,88,94,96] установлено, что при ИК-облучении тел также как и при конвективном их нагревании в процессе сушки происходит углубление зоны испарения. Быстрое обезвоживание поверхностных слоев продукта создает условия для возникновения диффузионного потока влаги, который противоположен потоку теплоты. В данном случае направление этого потока влаги совпадает с направлением потока теплоты, вызванного концентрационной диффузией, что увеличивает общий поток влаги к поверхности продукта.

Значительно интенсифицирует процесс влагоотдачи и явление циркуляций воздуха в порах материала.

Для интенсификации сушки коллоидных материалов, которые характеризуются малым коэффициентом диффузии влаги α_m , сушку желательно проводить при осциллирующих режимах. Под осциллирующими режимами следует понимать либо изменение облученности во времени (при больших влагосодержаниях облученность значительная, при уменьшении влагосодержания уменьшается и облученность), либо чередование периодов нагрева и отлежки (импульсное облучение). Обеспечение такого режима сушки возможно путем использования комбинации – ИК-нагрева и виброкипящего слоя. В результате вибрации рабочего органа сушилки с заданными параметрами, возможно, достичь постоянного переворота продукта в процессе сушки ИК-лучами. Такая сушка предполагает, что при отлежке температурный градиент в материале меняет свое направление и перемещение влаги к зоне испарения происходит как за счет теплопроводности, так и термовлагопроводности.

Значительная интенсификация процесса сушки при высоком качестве обрабатываемого продукта предопределяет ее изучение с целью внедрения в промышленность. Исследование кинетики сушки (измерение средних влагосодержания и температуры материала во времени) влажных продуктов при ИК-энергоподводе позволяет получить необходимые для теплового расчета сушильных установок сведения о длительности сушки, допустимых скоростях сушки, температуре, энергетической облученности продукта, а также другие важные сведения [85,94,96].

В числе основополагающих теоретических исследований в области ИК-излучения особое место занимают работы А.В. Лыкова, направленные на научное обоснование метода и выявление особенностей процессов тепло- и массообмена в материалах при ИК-облучении [125,126].

Под инфракрасным излучением принято понимать невидимую глазом область излучения, примыкающую к красному спектру видимого светового излучения, с длиной электромагнитных волн от 0,76 до 400-500 мкм. Иногда выделяют в области инфракрасного излучения зону субинфракрасных лучей, генерируемых инфракрасными лампами, длина волны основной части излучения которых составляет от 0,76 до 5,3 мкм.

Инфракрасные лучи отличаются от других электромагнитных колебаний частотой, длиной и скоростью распространения волн. Тепловое воздействие инфракрасных лучей объясняется, в настоящее время, двойственностью электромагнитного поля или волновой природой квантов. При этом источник излучения создает электромагнитное поле, служащее носителем энергии; тепловая энергия передается с помощью этого поля и поглощается предметами окружающей среды, т.е. атомами облучаемого вещества [125].

При поглощении энергии повышается уровень собственных колебаний атомов, что означает превращение энергии излучения в тепловую энергию. От общего количества подводимой к облучаемому предмету энергии излучения в единицу времени одна часть поглощается, другая - отражается и третья - пропускается телом. Большинство влажных продуктов обладает высокой

способностью к поглощению; она зависит, однако, от строения поверхности, химического состава и формы тела [126].

Особенностью применения ИК-излучения в пищевой промышленности для процессов, связанных с прогревом, является проникновение в них на некоторую глубину лучистого потока. Глубина проникновения инфракрасных лучей в прогреваемый материал, зависит от его свойств, структуры и характера поверхности, а также от длины волны излучения [126,126].

Для коллоидных капиллярно-пористых продуктов, такие как плодовые косточки, глубина проникновения ИК-лучей может быть от десятых долей до нескольких миллиметров [126].

Для описания процесса тепломассообмена в продукте часто используют аналитические зависимости. Рассматривая дифференциальные уравнения тепло- и массопереноса при сушке следует отметить их сложность и в некоторых случаях переменность [114-126].

Согласно [100], система уравнений тепло- и массопереноса для ИК-нагрева продукта может быть записана в следующем виде:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 t + \frac{\varepsilon r}{c} \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{Q_v}{c \rho_o}; \quad (1.21)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \alpha_{m2} \nabla^2 U + \alpha_{m2} \delta_2 \nabla^2 t + \varepsilon \frac{\partial U}{\partial \tau}; \quad (1.22)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \alpha_p \nabla^2 P - \frac{\varepsilon}{c_s} \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau}, \quad (1.23)$$

где: t – температура, °С;

U – влагосодержание, %;

τ – время, с;

P – избыточное давление в образце, Па;

α – коэффициент температуропроводности, м²/с;

α_{m2} – коэффициент диффузии влаги, м²/с;

Q_v – удельная мощность источника нагревания, Вт/кг;

δ_2 – относительный коэффициент термодиффузии, (кг/кг · град);

ε – критерий фазового превращения жидкости в пар;

r – удельная теплота парообразования, Дж/кг;

c – удельная теплоемкость продукта, Дж/(кг · К);

a_p – коэффициент парообразного переноса (давления), Дж/кг:

$$a_p = \frac{k_p}{c_s \rho_o}, \quad (1.24)$$

где: k_p – проницаемость;

c_s – коэффициент емкости влажного воздуха, кДж/(кг·К);

ρ_o – плотность продукта, кг/м³.

Анализ приведенных выше дифференциальных уравнений применительно к процессу сушки плодовых косточек как коллоидных капиллярно-пористых тел ИК-излучением в виброкипящем слое показывает, что данный процесс отличается большой сложностью и представляет собой целый комплекс тесно связанных друг с другом явлений, протекающих в материале и вблизи его поверхности.

Характер процесса сушки, отражаемый кривыми сушки, скорости сушки и нагрева, в основном, определяется физико-химическими и структурно-механическими свойствами материала, от которых зависят формы связи влаги с ними, диффузионной природой явления, а также методом энергоподвода. Многообразие факторов и их взаимная связь весьма затрудняют получение аналитических зависимостей кинетики сушки конкретного материала. Поэтому, выбор рациональных режимов процесса сушки необходимо осуществлять исходя из современных представлений теории и методов сушки, а конкретное их воплощение в конструкциях сушилок возможно только путем проведения экспериментальных исследований.

Расчеты нестационарных полей температуры и влагосодержания требуют исследования теплофизических свойств материала [58,59,98,100,131].

Существует несколько способов исследования ТФХ коллоидных капиллярно-пористых тел в частности [127]: 1) экспериментальное определение

ТФХ известными методами, базирующимися на решении краевых задач теплопроводности; 2) аналитическое определение ТФХ на основе теоретических представлений о механизме переноса теплоты в модельных структурах, характерных для реальных твердых тел.

Модельные структуры не могут со 100%-ной точностью отражать структуру реальных тел, поэтому расчеты по теоретическим формулам в определенной мере приближенные. Наиболее эффективный и точный метод измерения ТФХ основан на сочетании обоих способов - теоретического и экспериментального [128].

В литературе [129-131] имеются сведения о целом ряде методов и приборов для исследования ТФХ, которые можно классифицировать по ряду признаков: 1) общности теории; 2) сходству режимов работы; 3) количеству получаемой из одного опыта информации; 4) температурному интервалу испытаний; 5) характеру исследуемых материалов; 6) принципам измерений температуры и количества тепла и т.д.

1.6. Выводы по разделу

Проведенный анализ современных способов сушки плодовых косточек и другого вторичного сырья, теоретических и экспериментальных работ в этой области позволяет сделать следующие выводы.

1. Коэффициент использования косточек, которые образуются как отходы производства при переработке косточковых плодов, теоретически равен 100%.

2. Современные способы сушки (кондуктивный, конвективный, вакуумный, сублимационный и другие) не имеют возможности постоянного и быстрого вывода влаги из внутренних слоев продукта (ядер) к поверхности при одновременном ее испарении в окружающую среду.

3. Сушка плодовых косточек с использованием ИК-излучения и виброкипящего слоя имеет целый ряд преимуществ перед другими способами подвода теплоты, как по удельным энергозатратам, продолжительности, так и качеству высушенного продукта.

4. Выбор рациональных режимов процесса сушки ИК-излучением в виброкипящем слое необходимо осуществлять исходя из современных представлений теории и методов сушки, а конкретное их воплощение в конструкциях сушилок возможно только путем проведения экспериментальных исследований.

РАЗДЕЛ 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходя из цели и задач исследований, изложенных в первом разделе следует, что для изучения процесса сушки плодовых косточек ИК-излучением в виброкипящем слое необходимо выполнить исследование:

- теплофизических характеристик плодовых косточек в процессе сушки;
- физико-геометрических характеристик плодовых косточек;
- параметров вибрации на характер перемещения продукта;
- тепломассообмена (сушки) плодовых косточек ИК-излучением в виброкипящем слое.

Методики экспериментальных исследований разрабатывались в соответствии с руководящими техническими материалами, из анализа экспериментальных исследований, проведенных ранее.

Для обеспечения высокой точности измерений необходимо придерживаться соответствующих способов проверки и калибровки средств измерения [132] а также соответствующих ГОСТов [133] и [134].

В качестве объектов исследований были выбраны косточки: абрикоса сорта «Ранний Марусича» (начальное влагосодержание 28,7...32,2%), вишни сорта «Владимирская» (начальное влагосодержание 19,4...21,4%) и черешни сорта «Наполеон» (начальное влагосодержание 25,5...27,3%).

2.1. Методики исследований теплофизических характеристик плодовых косточек

Интенсивность переноса энергии теплового излучения в продукте и скорость нагрева определяется его теплофизическими свойствами [135]. Для определения кинетики интенсивного нагрева плодовых косточек при инфракрасном энергоподводе необходимо знать его теплофизические

характеристики (ТФХ), а именно: изменение температуропроводности a , коэффициента теплопроводности λ , удельной теплоемкости c и плотности продукта ρ в зависимости от температуры и влагосодержания.

Коэффициент температуропроводности a ($\text{м}^2/\text{с}$) может быть найден экспериментально или рассчитывается, если известны коэффициент теплопроводности λ , удельная теплоемкость c и плотность продукта ρ [135].

Теплофизические характеристики плодовых косточек являются функциями состояния и свойств вещества, зависящих от многих факторов, к которым следует отнести химический состав, начальное влагосодержание, структуру продукта, режимы сушки. При этом большое значение имеет характер изменения ТФХ от основных параметров влажного материала: температуры и влагосодержания.

В научной литературе отсутствуют данные по теплофизическим характеристикам плодовых косточек, поэтому существует необходимость в их определении.

2.1.1. Методика определения коэффициента теплопроводности

Для определения коэффициента теплопроводности плодовых косточек и их составляющих нами использовался зондовый метод и прибор «МИТ-1».

Прибор «МИТ-1» предназначен для оперативного определения теплопроводности и термического сопротивления материалов зондовым методом в соответствии с ДСТУ Б В.2.7-40-95, ГОСТ 30256-94 [136]. Диапазон измерений прибора составляет 0,07-4 Вт/(м·К), предел основной ошибки $\pm 5\%$, продолжительность измерения 5...6 мин.

На рисунке 2.1 представлен общий вид прибора «МИТ-1» и схема устройства для измерения.

Принцип действия прибора основан на измерении изменения температуры измерительного зонда за определенное время при его нагреве постоянной мощностью.

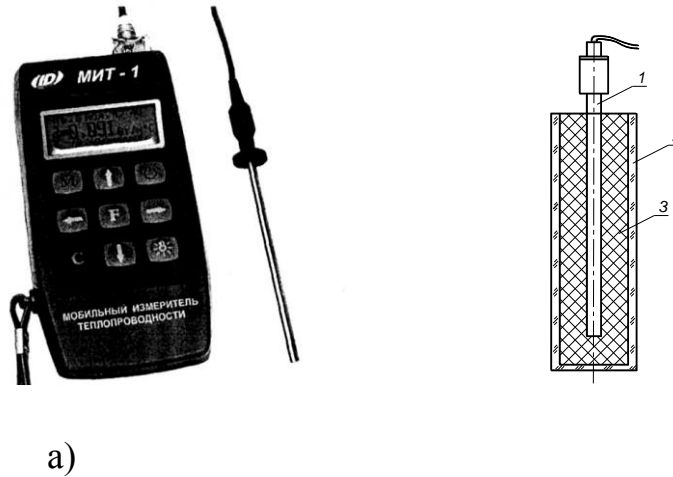


Рисунок 2.1 - Общий вид прибора «МИТ-1» (а) и схема устройства для измерения коэффициента теплопроводности (б)

Условные обозначения: 1 - зонд; 2 - стеклянный цилиндр емкостью 100 мл; 3 - исследуемый материал.

Прибор состоит из электронного блока, измерительного зонда и внешнего источника питания с выходным напряжением 5В, необходимого для обеспечения достаточной мощности нагревателя в процессе измерений. На лицевой панели корпуса электронного блока расположены клавиатура и окно графического дисплея. В верхней торцевой части корпуса находится разъем для подключения зонда, а также разъем USB для связи с компьютером для обработки результатов и подключения внешнего источника питания. На задней панели в нижней части корпуса находится крышка батарейного отсека. На левой боковой стенке имеется кистевой ремешок.

При определении коэффициента теплопроводности использовался порошок сырых, в процессе сушки и высушенных плодовых косточек и их составляющих (ядер и оболочек). При этом в стеклянный цилиндр помещали исследуемые образцы, вставляли в центр цилиндра зонд диаметром 6,0 мм и максимально уплотняли исследуемый материал. Повторными измерениями устанавливали необходимый диапазон измерений теплопроводности и значения коэффициента теплопроводности в каждом случае.

2.1.2. Методика определения удельной теплоемкости плодовых косточек

Для определения удельной теплоемкости плодовые косточки рассматривались как продукт, состоящий из следующих составляющих: воды, масла, белков, углеводов и целлюлозы. Каждая i -тая составляющая имеет свое влияние на общую удельную теплоемкость пропорционально массовой доли ω_i в продукте. В результате формула для определения удельной теплоемкости плодовых косточек приняла следующий вид [131]:

$$c_n = \omega_w c_w + \omega_m c_m + \omega_b c_b + \omega_{угл} c_{угл} + \omega_c c_c, \quad (2.1)$$

где: c_w – удельная теплоемкость воды;

c_m – удельная теплоемкость масла;

$c_b = c_{угл} = 1,41$ кДж/(кг·К) – удельная теплоемкость белков и углеводов [137]; $c_c = 1,33$ кДж/(кг·К) – удельная теплоемкость целлюлозы [137].

Удельными теплоемкостями воды и масла задавались как функции среднеобъемной температуры продукта. В первом случае использовались табличные данные из источника [138] (для промежуточных значений температуры удельная теплоемкость воды определялась с помощью интерполяции). Во втором случае использовалось следующее уравнение [135]:

$$c_m = \begin{cases} 1,66(0,439 + 0,00185T_{cp}) & \text{при } 273 < T_{cp} < 363, \\ 1,66(0,275 + 0,0023T_{cp}) & \text{при } 363 < T_{cp} < 423, \end{cases} \quad (2.2)$$

где T_{cp} – абсолютная среднеобъемная температура продукта.

2.1.3. Методика определения плотности плодовых косточек

Для определения плотности плодовых косточек и их ядер использовали пикнометрический метод с постоянной меткой 100 мл (мерная колба) ГОСТ [139].

Пикнометр представляет собой сосуд, изготовленный из стекла, объем которого известен очень точно. Сосуд имеет узкое горло и глухую пробку для уменьшения испарения. Такая конструкция пикнометра позволяет точно заполнить его жидкостью до метки, нанесенной на узком горлышке. Объем жидкости в этом случае и есть обозначенный объем пикнометра.

Пикнометрический метод измерения плотности исследуемого продукта состоит в следующем:

Взвешиваем исследуемый продукт в целом виде массой $m_{\text{прод}}$.

Пикнометр заполняем дистиллированной водой (до метки 100 мл), закрываем пробкой и взвешиваем, масса m_1 .

При погружении в пикнометр с водой исследуемого продукта он вытеснит объем воды, равный объему продукта. Удалим вытесненную воду, доведя уровень оставшейся воды до метки пикнометра. Массу пикнометра с водой и опущенным в него твердым телом обозначим m_2 .

Масса вытесненной воды будет равна $(m_1 + m_{\text{прод}} - m_2)$, а ее объем, равный объему продукта, будет равен:

$$V_{\text{прод}} = \frac{m_1 + m_{\text{прод}} - m_2}{\rho_0},$$

где ρ_0 – плотность дистиллированной воды, кг/м^3 , $\rho_0 = \frac{m_{\text{воды}}}{V_{\text{воды}}}$.

Искомая плотность исследуемого продукта вычисляется по формуле:

$$\rho_{\text{прод}} = \frac{m_{\text{прод}}}{V_{\text{прод}}} = \frac{m_{\text{прод}}}{m_1 + m_{\text{прод}} - m_2} \cdot \rho_0.$$

Для учета поправки на выталкивающую силу воздуха $\rho_{\text{возд}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{прод}}}{\rho_0}\right)$,

где $\rho_{\text{возд}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$ - плотность воздуха.

В результате плотность исследуемого продукта исправленная определяется по формуле:

$$\rho_{\text{продиспр.}} = \frac{m_{\text{прод}}}{V_{\text{прод}}} + \rho_{\text{возд}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{прод}}}{\rho_0}\right).$$

Плотность дистиллированной воды брали исходя из температуры воды (если $t=20^{\circ}\text{C}$, то $\rho_0 = 0,998 \text{ г/см}^3$).

Для исключения попадания воды в пористую структуру продукта, перед проведением исследований поверхность косточек покрывалась лаком, плотность которого учитывалась в расчетах.

2.2. Методика определения физико-геометрических характеристик плодовых косточек

В качестве базовых геометрических характеристик плодовых косточек и их ядер определялись линейные размеры, масса и объем случайной выборки. Для косточек и ядер абрикоса также определялась площадь поверхности.

Для измерения линейных размеров косточек и ядер использовался штангенциркуль с цифровым отсчетным устройством типа ШЦЦ-1-150-0,01-МЗ (дискретность отсчета 0,01 мм, предел допустимой погрешности $\pm 0,04$). Для определения массы косточек и ядер использовались электронные весы SNUG II-300, ГОСТ 24104-2001. Для определения объема случайной выборки косточек и их ядер использовался метод гидростатического взвешивания на электронных весах и мерный цилиндр 2 кл ТУ 3 Украины 14307481.005-95 с ценой деления 5 мл. Для предотвращения изменения объема исследуемого продукта осуществляли взвешивание в этиловом спирте при температуре 20°C . Этиловый спирт хорошо смачивает поверхность косточки и препятствует их набуханию, имеет плотность $\rho = 960 \text{ кг/м}^3$ [140].

Определение площади поверхности косточек и ядер осуществлялось в следующей последовательности: частица продукта заворачивалась в тонкую пищевую фольгу; после плотного прижатия фольги к поверхности продукта ее остатки обрезались; фольга с поверхности продукта удалялась, выравнивалась и

наклеивалась на лист бумаги; с помощью сканера Epson Perfection V 33 создавалось цифровое изображение листа с наклеенными плоскими фигурами из фольги, которые принимались в качестве развернутых поверхностей косточек и ядер случайной выборки; в графическом редакторе КОМПАС соответствующие фигуры обводились замкнутыми кривыми Безье; для построенных замкнутых кривых измерялась площадь.

Результаты измерения длины, ширины и толщины косточек и их ядер, а также их массы, представлялись в виде вариационных кривых случайной выборки. При построении кривых диапазоны линейных размеров делились на несколько одинаковых частичных интервалов, для которых определялась частота попадания размера в границы каждого интервала.

Полученные вариационные кривые проверялись на закон нормального распределения [141,142]. Для экспериментальных вариационных кривых были определены выборочные средняя \bar{x} и стандартное отклонение σ [143-145]:

$$\bar{x} = \frac{\sum n_i x_i}{n}; \quad (2.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum n_i (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (2.4)$$

где x_i – i -тое среднее значение частичного интервала соответствующего линейного размера;

n_i – частота, соответствующая i -тому среднему значению частичного интервала;

n – объем выборки.

По найденным статистическим оценкам строились теоретические вариационные кривые согласно закону нормального распределения:

$$n = \frac{1}{\pi\sigma} e^{-\frac{(n-x)^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.5)$$

Проверку генеральной совокупности на закон нормального распределения при уровне значимости 0,05 проводили по критерию Пирсона χ^2 , показателям асимметрии As и эксцесса Ex [143-145]:

$$\chi^2 = \sum \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}; \quad (2.6)$$

$$As = \frac{\mu_3}{\sigma^3}; \quad (2.7)$$

$$Ex = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3, \quad (2.8)$$

где n'_i – теоретическая частота, вычисленная по предположению нормального закона генеральной совокупности и отвечает i -тому среднему значению частичного интервала;

$$\mu_3 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{n} - \text{центральный момент третьего порядка};$$

$$\mu_4 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^4}{n} - \text{центральный момент четвертого порядка}.$$

Для проверки существенности отклонения вариационных кривых от нормального распределения полученное по формуле (2.6) значение критерия Пирсона сравнивалось с критическим $\chi^2_{кр}$, а для показателей асимметрии и эксцесса вычислялись их среднеквадратичные погрешности:

$$\sigma_{As} = \sqrt{\frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}}; \quad (2.9)$$

$$\sigma_{Ex} = \sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n-1)^2(n+3)(n+5)}}. \quad (2.10)$$

Существенное отклонение от нормального распределения, а также существенные асимметрия и эксцесс, соответствуют неравенствам:

$$\chi^2 > \chi^2_{кр}(0,05; s-3); \quad (2.11)$$

$$\frac{|As|}{\sigma_{As}} > 3; \quad (2.12)$$

$$\frac{|Ex|}{\sigma_{Ex}} > 3, \quad (2.13)$$

где s – количество частичных интервалов вариационной кривой.

Критическое значение критерия Пирсона для соответствующего значения числа степеней свободы определялось по приложению 5 [143].

Для случайных выборок базовых геометрических характеристик проводился также анализ корреляционных связей, для чего между каждой парой характеристик x и y вычислялся коэффициент корреляции:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}}; \quad (2.14)$$

По выборочным средним случайной выборки линейных размеров, массы и площади поверхности определялись физические характеристики [49,146]: насыпная плотность, физическая плотность, порозность, удельная поверхность, эквивалентный диаметр, фактор формы, относительная масса оболочки.

Для получения количественных связей между линейными размерами случайной выборки и объемом косточек и их ядер были получены уравнения регрессии в виде мультипликативной модели с помощью метода наименьших квадратов:

$$V = C_0 l^{C_1} a^{C_2} b^{C_3}, \quad (2.15)$$

где V, l, a, b – соответственно, объем, длина, ширина та толщина косточки или ядра;

C_0, C_1, C_2, C_3 – коэффициенты регрессии, которые определяются при математической обработке.

Для проверки адекватности полученные уравнения регрессии проверялись по критерию Фишера [49,144,145]:

$$F = \frac{s_{\phi}^2}{s_3^2}, \quad (2.16)$$

где $s_{\phi}^2 = \frac{\sum (y_{pi} - \bar{y})}{q - 1}$ – факторная дисперсия;

$s_3^2 = \frac{\sum (y_i - y_{pi})^2}{n - q - 2}$ – остаточная дисперсия;

q – количество коэффициентов регрессии;

y_{pi} – значение целевой функции, рассчитанное по уравнению регрессии для i -го наблюдения;

Адекватность уравнения регрессии соответствует неравенству:

$$F > F_{кр}(0,05; q - 1; n - q - 2); \quad (2.17)$$

Критическое значение критерия Фишера для соответствующего значения числа степеней свободы определялось по [144].

Для проверки значимости коэффициентов регрессии для каждого из них рассчитывалось значение критерия Стьюдента:

$$t_i = \frac{|C_i|}{s(C_i)}, \quad (2.18)$$

где $s(C_i)$ – среднее отклонение i -го коэффициента регрессии.

Значимость i -го коэффициента регрессии проверялась по неравенству:

$$t_i > t_{кр}(0,05; n - q - 2); \quad (2.19)$$

Критическое значение критерия Стьюдента для соответствующего числа степеней свободы определялось по приложению 6 [143].

Если неравенство (2.19) не удовлетворялось, соответствующий коэффициент регрессии выводился из уравнения и дальше проводилось повторное вычисление коэффициентов регрессии без соответствующего члена.

Все вычисления проводились в компьютерном пакете Excel с использованием соответствующих статистических функций [147,148].

Описанная методика позволяет определить показатели случайной выборки геометрических характеристик плодовых косточек и их ядер, которые устанавливают их отклонения от нормального распределения. Полученные

результаты позволят оценить возможные пределы измерения значений геометрических характеристик и дать рекомендации для использования их при разработке технологического оборудования подготовительных процессов.

2.3. Описание экспериментальной установки и методики исследования влияния параметров вибрации на характер перемещения плодовых косточек

Исследование влияния параметров вибрации на характер перемещения плодовых косточек проводилось на экспериментальной установке, принципиальная схема которой изображена на рисунке 2.2, а внешний вид - рисунке 2.3.

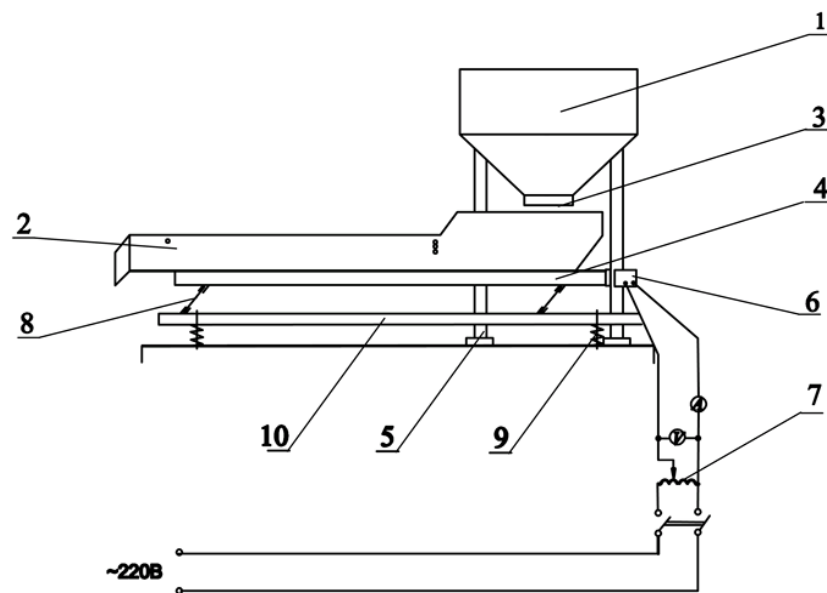


Рисунок 2.2 - Экспериментальная установка для исследования влияния параметров вибрации на характер перемещения плодовых косточек:
 1- загрузочный бункер; 2- рабочий орган (вибралоток); 3- шибер;
 4- корпус; 5- стойка; 6- электромагнитный вибратор;
 7- автотрансформатор; 8- рессоры; 9- виброизоляторы, 10- рама



Рисунок 2.3 – Внешний вид экспериментальной установки

Установка состоит из следующих основных узлов: рабочего органа (вибрлотка), вибропривода, узла блока питания.

Рабочий орган представляет собой горизонтальный лоток 2 из нержавеющей стали, который с помощью упругих элементов - плоских рессор 8, крепится на раме 10.

Рабочему органу сообщали возвратно-поступательные колебания синусоидальной формы электромагнитным вибратором 6 с регулированием частоты и амплитуды колебаний.

Электродвигатель привода питается переменным током напряжением 220 В через автотрансформатор 7. Изменение напряжения электродвигателя вибратора, контролировали по показаниям вольтметра. Для измерения амплитуды колебаний использовался прибор Ассистент, получивший сертификат об утверждении типа средства измерения RU.C.36.002.A № 34059, зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений РФ под № 39671-08, предназначенный для измерения вибрации и уровня звука ТУ 4381-005-18446736-08, согласно ГОСТ 31319-2006 [149,150].

Для исключения передачи колебаний рабочего органа на стол, рама 10, которая представляет собой реактивную массу, изолированная от опорной конструкции с помощью резиновых амортизаторов 9.

Установка оснащена загрузочным бункером 1 с шибером 3.

Принцип действия экспериментальной установки следующий. Плодовые косточки загружают в бункер 1, через который они попадают на поверхность лотка 2 вибротранспортера. За счет вибрации косточки передвигаются вдоль вибрлотка 2. Выгрузка продукта происходит через разгрузочную воронку вибротранспортера.

Методика проведения экспериментальных исследований включала последовательно следующие этапы.

1) Установление рабочих параметров: амплитуды колебаний, частоты вибрации.

2) Регулировка количества загружаемого продукта при помощи шибера.

3) Загрузка заданной порции плодовых косточек на вибрлоток.

4) Определение экспериментальной скорости вибротранспортирования плодовых косточек по лотку, путем найденных длины лотка и времени прохождения косточек по лотку.

5) Определение характера перемещения косточек по вибрлотку (раздел 1, определение коэффициента вибрации (1.9), (1.10)) путем фотографирования поведения косточек в процессе виброперемещения и рациональных параметров вибрации.

2.3.1. Методика определения статистических характеристик виброперемещения плодовых косточек

Выборка при исследовании влияния параметров вибрации на переворот плодовых косточек в процессе вибротранспортирования по лотку рабочего органа составила 150 экспериментальных величин. Экспериментальные величины равны количеству косточек перевернувшихся под действием вибрации с заданными параметрами.

Определение статистических показателей выборки осуществлялась по следующим формулам [147,148]:

Среднее значение выборки:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad (2.20)$$

где: x_i - значения выборки;

n - количество значений выборки;

Число степеней свободы (число независимых вариантов) f [148]:

$$f = n - 1 \quad (2.21)$$

Среднеквадратичное отклонение выборки:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.22)$$

Дисперсия по выборке:

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (2.23)$$

Среднее линейное отклонение:

$$d = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n} \quad (2.24)$$

Дисперсия по генеральной совокупности:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n-1} \quad (2.25)$$

где μ - истинное значение измеряемой величины, $\mu=150$ шт.

Среднеквадратичное отклонение генеральное:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n-1}} \quad (2.26)$$

Коэффициент вариации:

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (2.27)$$

Величина коэффициента вариации говорит об однородности изучаемой совокупности, так, если вариация меньше либо равняется 33%, то совокупность считается однородной.

$$\text{Коэффициент осцилляции: } V_R = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\bar{x}} \cdot 100\%, \quad (2.28)$$

где: x_{\max} и x_{\min} – максимальное и минимальное значение выборки соответственно.

2.4. Описание экспериментальной установки и методики исследования параметров ИК-сушки плодовых косточек в виброкипящем слое

Для экспериментального исследования кинетики процесса сушки плодовых косточек создана экспериментальная установка с инфракрасным энергоподводом и вибрационным воздействием на базе кафедры оборудования пищевых производств ГО ВПО «ДонНУЭТ им. М. Туган-Барановского», принципиальная схема и внешний вид которой представлены на рисунках 2.4 и 2.5 соответственно.

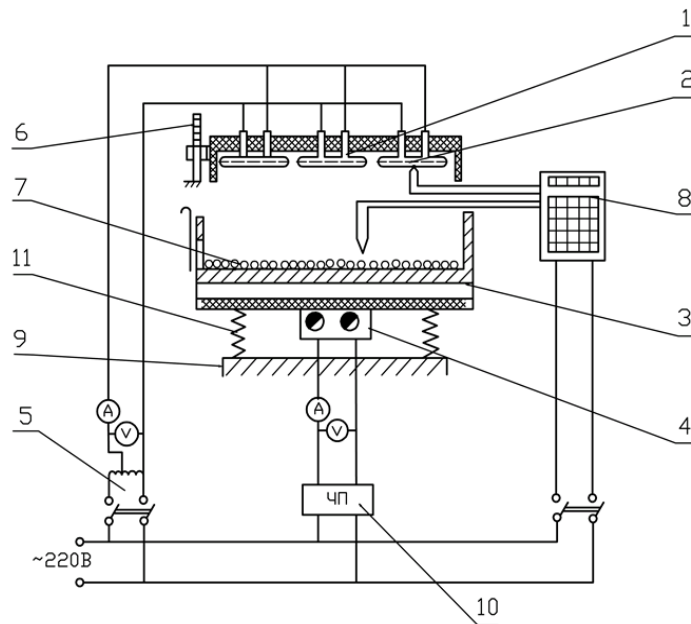


Рисунок 2.4- Принципиальная схема экспериментальной установки

для исследования процесса сушки плодовых косточек:

- 1- блок излучателей (ТЭНов); 2- отражатели; 3- цилиндрическая стальная сковорода; 4- вибратор; 5- автотрансформатор; 6- стойка; 7- продукт; 8- потенциометр КСП-4; 9- рама; 10- частотный преобразователь; 11- пружина



Рисунок 2.5 – Внешний вид экспериментальной установки

1- блок излучателей; 2 – вибросковорода;

3 – блок питания и контрольно-измерительные приборы

Установка состоит из рабочей камеры полужакрытого типа. В качестве генераторов ИК-излучения применены излучатели (ТЭНы) *1* в форме восьмерки («темные» излучатели) из нихромовой спирали в блоке из четырех штук, позволяющие получать постоянную во времени температуру греющей поверхности свыше 200°C с равномерным температурным полем и диапазоном спектра 1,3-4 мкм (преимущества использования данных излучателей, их рациональное расположение и рекомендуемое количество описано в [149]).

Каждый излучатель *1* устанавливается в фокусе параболического отражателя *2*. Излучатели *1* установлены вверху относительно рабочего органа – цилиндрической стальной сковороды *3* диаметром 320 мм, поверхность которой отполирована и выполнена из нержавеющей стали. Наличие стойки *6* позволяет при помощи направляющих регулировать расположение излучателей *1* относительно сковороды *3* и тем самым регулировать плотность потока, падающего на облучаемый материал.

Для создания виброкипящего слоя исследуемого продукта в процессе воздействия ИК-лучей сковорода *3* при помощи упругих элементов – пружин *11* жестко крепится на раме *9* и совершает круговые винтовые колебания под

действием двух электромеханических вибраторов дебалансного типа 4 с установленной частотой колебаний 94 Гц, углом вибрации 30°. Для изменения напряжения на клеммах ИК-излучателей 1 в диапазоне 0-220В в электрической схеме применен автотрансформатор 5.

Для измерения температуры в различных частях плодовой косточки и в рабочей камере использовались хромель-копелевые термопары (диаметр шарика спая 0,6 мм), помещенные во фторопластовые трубочки и соединенные с регистрирующим прибором КСП-4. Термопары градуировки ХА94 с диаметром проволоки $110 \cdot 10^{-4}$ м. Перед каждой серией опытов термопары градуируются путем термостатирования в диапазоне температур 0-200°C. Погрешность измерения температуры не превышает $\pm 1,5^\circ\text{C}$ в диапазоне измерения 0-200°C, ГОСТ Р 8.585-2001.

Толщина засыпки плодовых косточек на рабочую поверхность составляла один слой продукта. При этом измеряли изменение температуры нескольких косточек-образцов. Для закрепления термопары в косточке-образце просверливали отверстия сверлом диаметром 0,9 мм в двух местах в передней части (оболочке) и в середине (ядре) косточки. Для изоляции термопары (кроме спая) и плотности ее вхождения в косточку использовали термоизоляционный лак. За основу взята методика, изложенная в работах [56] и [57].

Рассмотрим более детального привод вибратора экспериментальной установки.

Цилиндрическая сковорода 3 установки опирается на пружины и совершает колебания под действием силы инерции двух неуравновешенных вращающихся масс на двух электродвигателях. Электродвигатели закреплены на раме рабочего органа и позволяют ему совершать синхронизированные колебания под углом α к горизонту.

Принципиальная схема вибрационной установки приведена на рисунке 2.6.

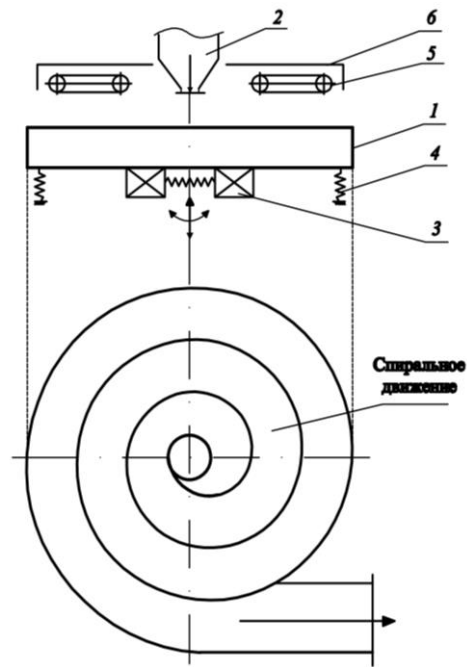


Рисунок 2.6 - Схема экспериментальной сушильной установки с вибрационным рабочим органом:

- 1- рабочий орган с буртиком; 2- загрузочный бункер; 3- инерционный привод типа самобаланс, создающий колебательные крутильные возмущения;
4- цилиндрические пружины; 5- ИК-нагреватели;
6- отражатели ИК-лучей

Привод 3 - вибратор типа дебаланс, в котором вращается неуравновешенная масса - дебаланс с постоянной угловой скоростью (рисунок 2.7).

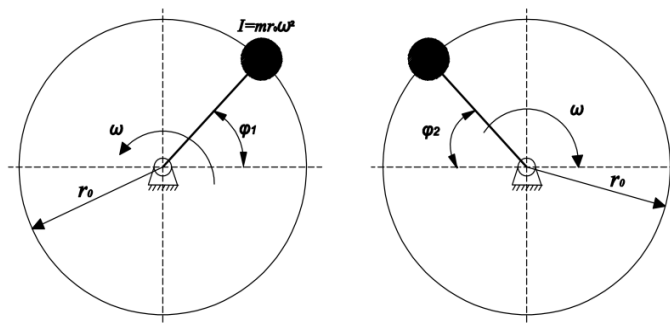


Рисунок 2.7 - Динамическая схема вибратора типа дебаланс

При вращении дебаланса создается возмущающая сила, постоянная по величине:

$$I = m \cdot r_0 \cdot \omega^2,$$

где: m – масса дебаланса, кг;

r_0 – расстояние от центра тяжести дебаланса до оси вращения, м;

ω – угловая скорость вращения дебаланса, 1/с.

Два вибратора типа самобаланс установлены таким образом, что их углы поворота $\varphi_1 = \varphi_2 = \omega t$ (при $\omega = const$) и величины возмущающих сил

$$I_1 = I_2 = m \cdot r_0 \cdot \omega^2, \text{ дают результирующую силу } I = 2m \cdot r_0 \cdot \omega^2 \sin \omega t.$$

В установке предусмотрено изменение жесткости пружин, массы возмущающегося груза и радиуса его закрепления на вибраторе.

Перед началом работы экспериментальной установки устанавливаются необходимые параметры вибрации цилиндрической сковороды.

Параметрами вибрации рабочего органа (сковороды) являются частота и амплитуда колебаний.

При постоянной частоте колебаний амплитуда регулировалась в диапазоне 0,0015...0,005м при помощи изменения дебалансных масс. Для измерения амплитуды колебаний использовался прибор Ассистент, получивший сертификат об утверждении типа средства измерения RU.C.36.002.A № 34059, зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений РФ под № 39671-08., предназначенный для измерения вибрации и уровня звука ТУ 4381-005-18446736-08, согласно ГОСТ 31319-2006 [150]. Данный прибор способен измерять виброскорость и виброускорение для всех восьми диапазонов частот звука в Гц. Определение уровня вибрации проводилось с помощью щупа входящего в комплект прибора, который прикладывался перпендикулярно к измеряемой поверхности. По показанию прибора, получали значение виброскорости в мм/с. Так как виброскорость - это значение амплитуды колебаний умноженной на частоту и на косинус угла вибрации (30°), то, зная виброскорость и частоту колебаний, можно найти амплитуду колебаний.

После установления необходимых параметров вибрации включается питание ТЭНов 1 и с помощью автотрансформатора 5 устанавливается нужное

значение напряжения питания, которое совместно с изменением расстояния от блока излучателей до поверхности продукта, регулируемого при помощи стойки 6, определяли нужное значение плотности теплового потока ИК- излучения.

После выхода установки на стационарный режим работы (5...10 мин после включения ТЭНов 1) в сковороду 3 загружается продукт 7, который сразу же переходит в виброкипящее состояние. Тепловые лучи, падающие от ТЭНов 1, направляются на продукт отражателями 2.

Методика проведения экспериментальных исследований включала последовательно следующие этапы.

1. Определение начального влагосодержания сырых плодовых косточек и их составляющих (оболочки и ядра) производили методом высушивания до постоянной массы в соответствии с ГОСТ 15113.4-77 [151], при этом использовался сушильный шкаф СНОЛ 3,5.3,5.3,5/3,5И2, оснащенный автоматическим регулятором температуры, при ее значении $130 \pm 2^\circ\text{C}$;

2. Подготовка экспериментальной установки к работе: разогрев ее до рабочей температуры; установление необходимых параметров вибрации и плотности теплового потока.

3. Определение начальной массы выбранной порции косточек, которую необходимо высушить, путем взвешивания ее на аналитических электронных весах SNUG II-300, ГОСТ 24104-2001, класс точности II.

4. Герметичная установка спая термопар путем просверливания отверстий в двух точках косточки: в центре ядра и в середине оболочки.

5. Загрузка подготовленных косточек в рабочую камеру установки - цилиндрическую стальную сковороду 3 и фиксирование времени.

6. Через каждые две минуты снятие показаний: температур в центре ядра и в середине оболочки косточки с помощью потенциометра КСП-4, массы порции косточек в процессе сушки путем взвешивания ее на аналитических электронных весах SNUG II-300, ГОСТ 24104-2001, класс точности II.

7. Процесс сушки проводился до прекращения изменения массы между последним и предыдущим измерениями массы порции косточек.

8. Высушенная до постоянной массы порция косточек помещалась в эксикатор для остывания, после чего снова взвешивалась.

9. Высушенные косточки разделяли на ядро и оболочку.

10. Проведение измельчения отдельно ядра и оболочки косточек осуществляли на двухвальцовой дробилке до получения мелкодисперсной массы.

11. Полученную измельченную массу ядер и оболочек косточек помещали отдельно в бюксы для определения конечного влагосодержания по методу высушивания до постоянной массы в соответствии с ГОСТ 15113.4-77.

С целью определения удельных энергозатрат на экспериментальной установке вмонтированы вольтметры и амперметры в электрических цепях блока излучателей и электродвигателей вибраторов. По их показаниям с учетом продолжительности процесса сушки в каждом опыте рассчитывали и контролировали энергозатраты.

Оценка производительности каждого опыта определялась как отношение массы выпаренной влаги к продолжительности сушки и площади горизонтальной поверхности сковороды.

Для получения надежных экспериментальных данных все опыты повторялись не менее пяти раз, после чего данные усреднялись.

Экспериментальные данные систематизировались и сводились в таблицы. По табличным данным строились термограммы и кривые кинетики процесса сушки. Проводилась математическая обработка данных с целью выявления основных закономерностей процесса и взаимосвязи исследуемых величин.

2.5. Выводы по разделу

Разработаны и представлены методики и экспериментальные установки для исследования процесса сушки плодовых косточек ИК-излучением в виброкипящем слое и вибротранспортирования, которые позволят: исследовать влияние рабочих параметров процесса сушки на кинетику, продолжительность,

удельные энергозатраты при обработке плодовых косточек ИК-излучением в виброкипящем слое, определить рациональные параметры процесса сушки.

Представлены методики для определения теплофизических и физико-геометрических характеристик плодовых косточек, которые позволят получить результаты, создающие предпосылки для моделирования процессов теплопереноса в сушильных установках, использование их в разработке промышленного оборудования для сушки плодовых косточек.

РАЗДЕЛ 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ПЛОДОВЫХ КОСТОЧЕК

3.1. Планирование полнофакторного эксперимента

Целью данного раздела является определение рационального режима сушки плодовых косточек ИК-излучением в виброкипящем слое.

Исследование по установлению наиболее рациональных условий проведения процесса проводили методом ротатабельного композиционного планирования второго порядка (план Бокса) [152-154].

Функцией отклика, характеризующей процесс, была выбрана:

y – продолжительность сушки τ (с).

Задачей исследования являлось определение необходимой продолжительности процесса сушки плодовых косточек до равновесного влагосодержания при рациональных режимах обработки.

Для выявления сущности действия отдельных факторов на продолжительность процесса сушки использовали трехфакторный эксперимент, реализацию которого осуществляли следующими факторами: x_1 – амплитуда вибрации A (м); x_2 – плотность теплового потока q (Вт/м²); x_3 – начальное влагосодержание исследуемого продукта u_n (%).

3.2. Обработка результатов экспериментальных исследований и их анализ

Для определения рационального режима сушки плодовых косточек необходимо было построить математическую модель данного процесса.

С этой целью в окрестности основного уровня факторов был спланирован и реализован эксперимент для получения математической модели процесса в виде полинома второго порядка. Использовался ротатабельный композиционный план второго порядка. Такой план является центральным, поскольку все

экспериментальные точки располагаются симметрично относительно центра эксперимента [154].

Уравнение регрессии при ротатабельном планировании второго порядка имеет следующий вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (3.1)$$

где $b_0; b_1; b_2; b_3; b_{12}; b_{13}; b_{23}; b_{11}; b_{22}; b_{33}$ - коэффициенты регрессии.

В процессе кодирования осуществляется линейное преобразование координат факторного пространства с переносом начала координат в нулевую точку и выбором масштабов по осям в единицах интервалов варьирования факторов. Используют соотношение типа:

$$x_i = \frac{z_i - z_{0i}}{\Delta z_i}, \quad (3.2)$$

где: x_i - кодированное значение фактора (безразмерная величина);

z_i и z_{0i} - натуральные значения фактора (соответственно его текущее значение и значения на нулевом уровне);

Δz_i - натуральное значение интервала варьирования фактора.

Интервал варьирования факторов определяли по формуле:

$$\Delta z_i = x_{io} - x_{in} = x_{iv} - x_{io}, \quad (3.3)$$

где: x_{io} - нулевой уровень факторов;

x_{in} - нижний уровень факторов;

x_{iv} - верхний уровень факторов.

Пределы варьирования факторов выбраны, исходя из анализа результатов предварительных экспериментов по изучению процесса ИК-термообработки в виброкипящем слое.

Коэффициенты регрессии при $k=3$ рассчитываются по следующим формулам (3.4) – (3.7) [154]:

$$b_0 = a_1 \sum_1^{20} y_u - a_2 \sum_1^3 \sum_1^{10} x_i^2 y_u; \quad (3.4)$$

$$b_i = a_3 \sum_1^{10} x_{iu} y_u; \quad (3.5)$$

$$b_{ij} = a_4 \sum_1^8 x_{iu} x_{ju} y_u; \quad (3.6)$$

$$b_0 = a_5 \sum_1^{10} x_{iu}^2 y_u + a_6 \sum_1^3 \sum_1^{10} x_{iu}^2 y_u - a \sum_1^{20} y_u, \quad (3.7)$$

где: $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ – коэффициенты, указанные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Коэффициенты, выбираемые с учетом числа факторов

Число факторов, κ	Число опытов плана, N	Коэффициенты						
		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
3	20	0,1663	0,0568	0,0732	0,1250	0,0625	0,0069	0,0568

Значимость коэффициентов регрессии находили с помощью критерия Стьюдента [154]:

$$S_0^2 = \sqrt{\frac{\sum (y_{i0} - \bar{y})^2}{n_0 - 1}} \quad (3.8)$$

где: n_0 – число наблюдений в нулевой точке;

y_{0i} - результат отдельного наблюдения в нулевой точке;

y_0 - результат опыта в нулевой точке (среднее арифметическое);

Оценка значимости коэффициентов регрессии связана с построением доверительных интервалов. С учетом известного значения дисперсия воспроизводимости результатов определяли значимость коэффициентов S_0^2 . Использовались следующие формулы (3.9) – (3.10) [152,154]:

$$S_{(b_0)}^2 = 0,1663S_0^2; \Delta b_0 \pm 0,816S_0 \quad (3.9)$$

$$S_{(b_i)}^2 = 0,0732S_0^2; \Delta b_i \pm 0,542S_0 \quad (3.10)$$

$$S_{(b_{ij})}^2 = 0,1250S_0^2; \Delta b_{ij} \pm 0,7086S_0 \quad (3.11)$$

$$S_{(b_{ii})}^2 = 0,0694S_0^2; \Delta b_{ii} \pm 0,526S_0 \quad (3.12)$$

Гипотезу об адекватности модели проверяли с помощью критерия Фишера [152-154]:

$$F_{ad} = \frac{S_{ad}^2}{S_0^2}, \quad (3.13)$$

S_{ad}^2 - остаточная дисперсия или дисперсия адекватности;

S_0^2 - дисперсия воспроизводимости результатов.

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_1^T (y_{ui} - y_u)^2 - \sum_1^n (y_{0i} - y_0)^2}{N - \lambda - (n_0 - 1)}, \quad (3.14)$$

где λ – число значимых коэффициентов регрессии;

Математическая модель адекватна, когда выполняется отношение:

$$F_{расч} < F_{табл}. \quad (3.15)$$

Для построения матрицы ротатабельного планирования при числе факторов $k=3$, согласно [154] принято: число точек «ядра» $n_j=8$, число «звездных» точек $n_a=6$, число нулевых точек $n_0=6$, величина плеча для «звездных» точек $\alpha=1,682$, общее число опытов $N=20$.

Выделение факторов и уровней их варьирования для плодовых косточек абрикоса представлено в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Факторы и уровни варьирования для плодовых косточек абрикоса

Обозначение	Наименование факторов	Уровни варьирования					Интервал варьирования
		-1,682	-1	0	+1	1,682	
x_1	Амплитуда вибрации, м	0,0013	0,002	0,003	0,004	0,0047	0,001
x_2	Плотность теплового потока ИК-излучения, кВт/м ²	0,1	0,4	0,9	1,4	1,7	0,5
x_3	Начальное влагосодержание плодовых косточек, %	25	27	30	33	35	3

Для проведения исследования процесса сушки косточек абрикоса была построена рабочая матрица, которая приведена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Матрица планирования эксперимента для плодовых косточек абрикоса

№	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x^2_1	x^2_2	x^2_3	y_{cp}
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	77
2	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	68
3	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	195
4	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	168
5	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	86
6	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	77
7	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	211
8	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	185
9	-1,68	0	0	0	0	0	2,83	0	0	119
10	1,68	0	0	0	0	0	2,83	0	0	98
11	0	-1,68	0	0	0	0	0	2,83	0	261
12	0	1,68	0	0	0	0	0	2,83	0	71
13	0	0	-1,68	0	0	0	0	0	2,83	112
14	0	0	1,68	0	0	0	0	0	2,83	142
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	134
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	134
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	134
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	134
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	134
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	134

Экспериментальные данные были обработаны на компьютере с помощью программ Excel и Mathcad, что позволило получить математическую модель процесса сушки плодовых косточек и поверхность отклика согласно формуле (3.1).

Для оптимизации экспериментально-факторного плана плодовых косточек был выбран графический метод, используя поверхность отклика $y=f(x_1, x_3)$, $y=f(x_2, x_3)$, $y=f(x_1, x_2)$. Для облегчения объяснения и интерпретации результатов были использованы кодированные значения факторов.

Получена математическая модель для косточек абрикоса:

$$y = 133,86 - 6,38x_1 - 56,34x_2 + 8,96x_3 + 1,9x_1x_2 - 4,29x_2x_3 - 9,1x_1^2 + 11,38x_2^2 - 2,45x_3^2. \quad (3.16)$$

Оценка адекватности модели:

$$F_{расч} = 0,25, \quad F_{табл} = 2,6.$$

$F_{расч} < F_{табл}$ - модель адекватна.

Графическое изображение поверхности отклика для косточек абрикоса представлено на рисунках 3.1-3.3.

$x_1=0$:

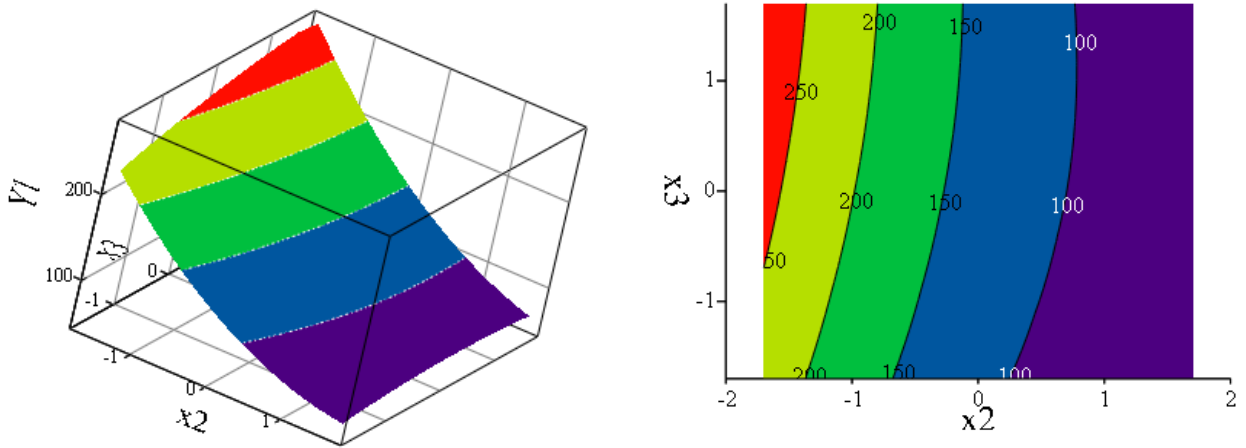


Рисунок 3.1 – Зависимость продолжительности сушки τ ($Y1$) от плотности теплового потока (x_2) и начального влагосодержания (x_3) для косточек абрикоса

$x_2=0$:

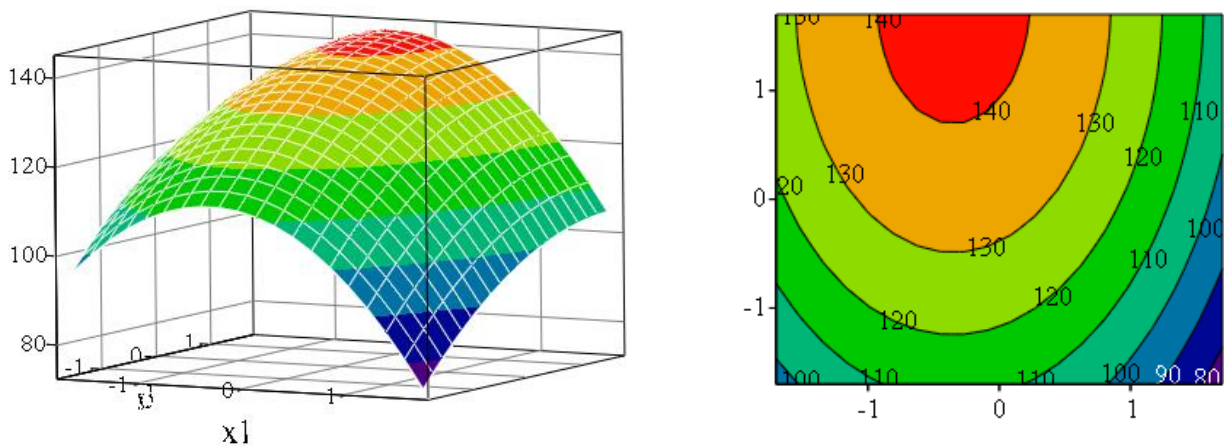


Рисунок 3.2 – Зависимость продолжительности сушки τ ($Y2$) от амплитуды (x_1) и начального влагосодержания (x_3) для косточек абрикоса

$x_3=0$:

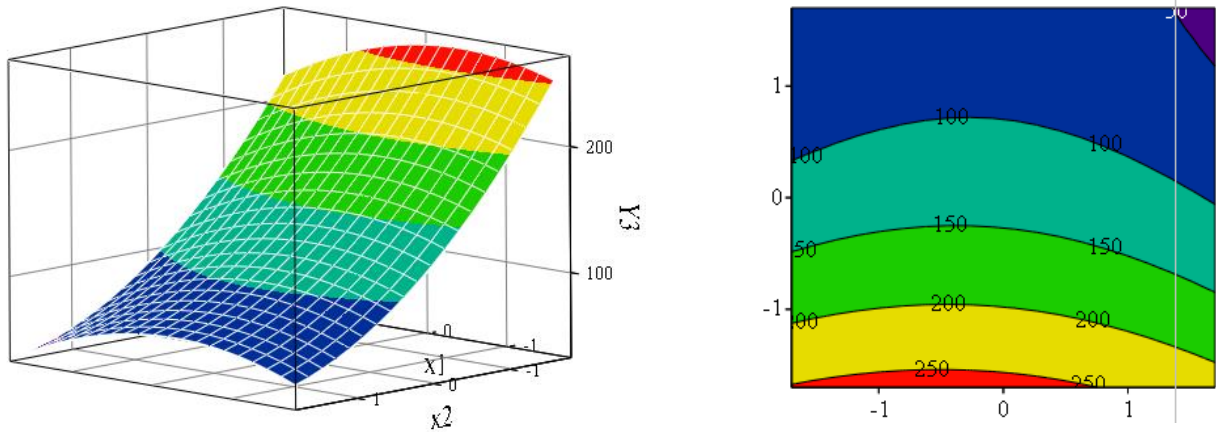


Рисунок 3.3 – Зависимость продолжительности сушки τ (Y_3) от амплитуды (x_1) и плотности теплового потока (x_2) для косточек абрикоса

Анализ математической модели указывает, что переменная τ зависима как от каждого из факторов x_1 , x_2 , x_3 , так и от взаимосвязей факторов кроме взаимосвязи факторов x_1x_3 , которая является незначимой в полученном уравнении регрессии. Оценка значимости коэффициентов по критерию Стьюдента указывает на значимость всех коэффициентов уравнения. Адекватность модели проверялась по критерию Фишера, модель адекватна, т.к. рассчитанное значение критерия Фишера меньше, чем табличное.

Анализ коэффициентов математической модели, которая описывает изменение продолжительности процесса сушки плодовых косточек позволяет сделать следующие выводы: линейная часть уравнения содержит все три слагаемые и показывает, что изменение каждого из них влияет на результат τ ; наибольшее влияние на изменение τ оказывает значение x_2 , причем, с увеличением x_2 происходит уменьшение τ ; увеличение значения x_3 ведет к увеличению значения τ ; квадратичная часть содержит все слагаемые, что позволяет получить четко очерченную поверхность отклика; квадратичная часть уравнения способствует в значительной степени увеличению критерия оптимизации τ ; взаимосвязь факторов x_2x_3 оказывает наибольшее отрицательное

влияние на критерий оптимизации τ в сравнении со взаимосвязью x_1x_2 , которая способствует увеличению значения τ .

Анализ поверхности отклика и контурных кривых показывает, что: поверхность отклика является поверхностью типа возрастающее возвышение, которая характеризуется контурными кривыми в виде параболы; центр фигуры находится в бесконечности; поверхность отклика в экспериментальной области стремится к плоскости, т.к. радиус кривизны имеет большое значение.

Уравнение математической модели была получена нами в закодированной форме.

При замене кодированных значений факторов абсолютными величинами позволяет перейти от системы координат в закодированной форме к новой системе в натуральных единицах:

$$x_1 = \frac{A - 0,003}{0,001}; x_2 = \frac{q - 0,9}{0,5}; x_3 = \frac{u_n - 30}{3}.$$

Для получения уравнения регрессии с переменными в натуральном масштабе подставим x_i по формулам кодирования в уравнение 3.16:

$$\tau = 3,8 \cdot 10^3 \cdot A \cdot q - 9,1 \cdot 10^6 \cdot A^2 + 4,48 \cdot 10^4 \cdot A + 45,52 \cdot q^2 - 2,86 \cdot q \cdot u_n - 1,2 \cdot 10^2 \cdot q - 0,27 \cdot u_n^2 + 19,2 \cdot u_n - 111. \quad (3.17)$$

Выделение факторов и уровней их варьирования для плодовых косточек черешни представлено в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Факторы и уровни варьирования для плодовых косточек черешни

Обозначение	Наименование факторов	Уровни варьирования					Интервал варьирования
		-1,682	-1	0	+1	1,682	
x_1	Амплитуда вибрации, м	0,0013	0,002	0,003	0,004	0,0047	0,001
x_2	Плотность теплового потока ИК-излучения, кВт/м ²	0,1	0,4	0,9	1,4	1,7	0,5
x_3	Начальное влагосодержание плодовых косточек, %	24,8	25,5	26,5	27,5	28,2	1

Для проведения исследования процесса сушки косточек черешни была построена рабочая матрица, которая приведена в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Матрица планирования эксперимента для плодовых косточек черешни

№	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	y_{cp}
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	84
2	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	81
3	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	199
4	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	195
5	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	84
6	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	71
7	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	208
8	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	189
9	-1,68	0	0	0	0	0	2,83	0	0	142
10	1,68	0	0	0	0	0	2,83	0	0	130
11	0	-1,68	0	0	0	0	0	2,83	0	247
12	0	1,68	0	0	0	0	0	2,83	0	48
13	0	0	-1,68	0	0	0	0	0	2,83	115
14	0	0	1,68	0	0	0	0	0	2,83	129
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	119
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	119
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	119
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	119
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	119
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	119

Получена математическая модель для косточек черешни:

$$y = 118,9 + 0,49x_1 - 58,9x_2 + 4,546x_3 + 1,6x_1x_2 - 2,98x_1x_3 - 0,93x_2x_3 + 8,4x_1^2 + 10,3x_2^2 - 1,3x_3^2. \quad (3.18)$$

Оценка адекватности модели: $F_{расч} = 1,37$, $F_{табл} = 2,6$.

$F_{расч} < F_{табл}$ - модель адекватна.

Графическое изображение поверхности отклика для косточек черешни представлено на рисунках 3.4-3.6.

$x_1=0$:

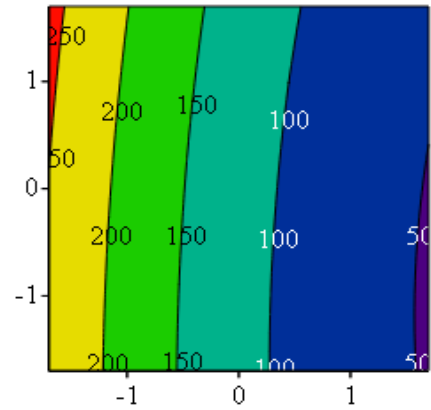
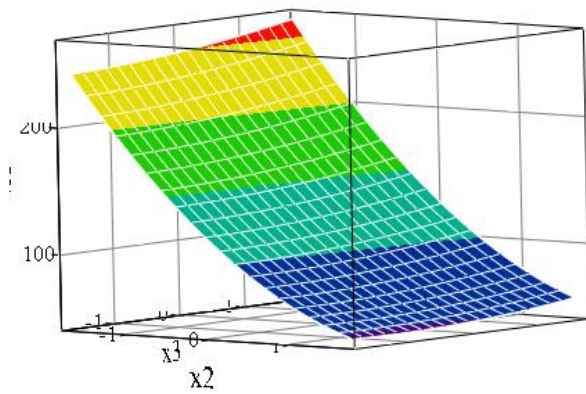


Рисунок 3.4 – Зависимость продолжительности сушки τ от плотности теплового потока (x_2) и начального влагосодержания (x_3) для косточек черешни

$x_2=0$:

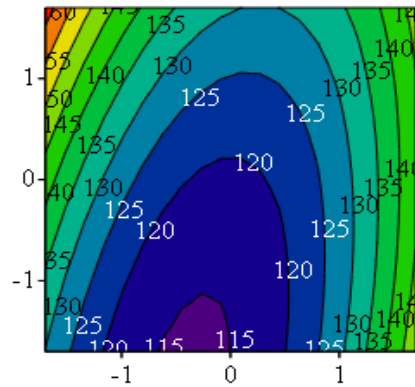
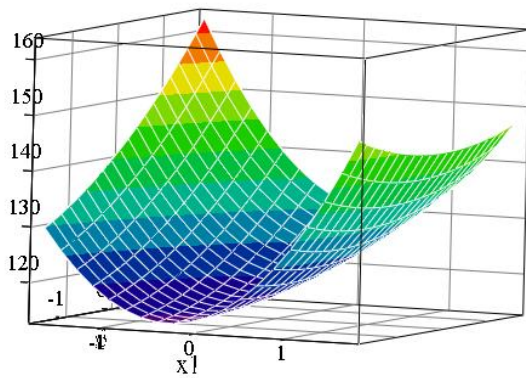


Рисунок 3.5 – Зависимость продолжительности сушки τ от амплитуды (x_1) и начального влагосодержания (x_3) для косточек черешни

$x_3=0$:

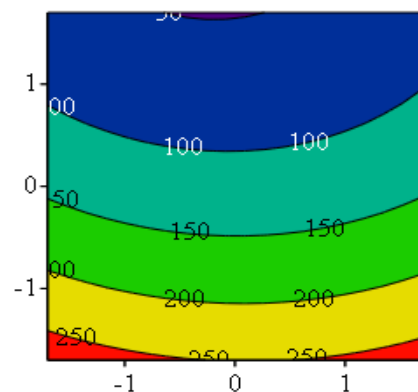
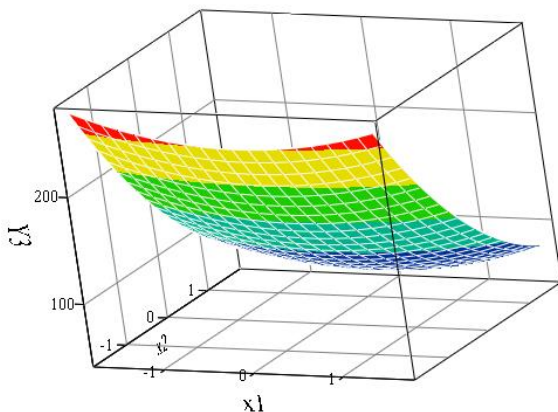


Рисунок 3.6 – Зависимость продолжительности сушки τ от амплитуды (x_1) и плотности теплового потока (x_2) для косточек черешни

Анализ математической модели указывает, что переменная τ зависима как от всех факторов x_1, x_2, x_3 , так и от взаимосвязей факторов. Оценка значимости коэффициентов по критерию Стьюдента указывает на значимость всех коэффициентов уравнения. Адекватность модели проверялась по критерию Фишера, модель адекватна, т.к. рассчитанное значение критерия Фишера меньше, чем табличное.

Анализ коэффициентов математической модели, которая описывает изменение продолжительности процесса сушки плодовых косточек позволяет сделать следующие выводы: линейная часть уравнения содержит все три слагаемые и показывает, что изменение каждого из них влияет на результат τ ; наибольшее влияние на изменение τ оказывает значение x_2 , причем, с увеличением x_2 происходит уменьшение τ ; увеличение значения x_3 ведет к увеличению значения τ ; квадратичная часть содержит все слагаемые, что позволяет получить четко очерченную поверхность отклика; квадратичная часть уравнения способствует в значительной степени увеличению критерия оптимизации τ ; взаимосвязь факторов x_1x_3 оказывает наибольшее отрицательное влияние на критерий оптимизации τ в сравнении со взаимосвязью x_1x_2 , которая способствует увеличению значения τ и x_2x_3 , способствует уменьшению значения τ .

Анализ поверхности отклика и контурных кривых показывает, что: поверхность отклика является поверхностью типа возрастающее возвышение, которая характеризуется контурными кривыми в виде параболы; центр фигуры находится в бесконечности.

Уравнение математической модели была получена нами в закодированной форме.

При замене кодированных значений факторов абсолютными величинами позволяет перейти от системы координат в закодированной форме к новой системе в натуральных единицах:

$$x_1 = \frac{A - 0,003}{0,001}; x_2 = \frac{q - 0,9}{0,5}; x_3 = \frac{u_n - 26,5}{1}.$$

Для получения уравнения регрессии для плодовых косточек черешни с переменными в натуральном масштабе подставим x_i по формулам кодирования в уравнение 3.16:

$$\tau = 6,1 \cdot 10^6 \cdot A^2 + 1,3 \cdot 10^4 \cdot A \cdot q - 4,78 \cdot 10^4 \cdot A + 90 \cdot q^2 - 3,53 \cdot 10^2 \cdot q + 1,2 \cdot u_n^2 - 57,36 \cdot u_n + 1,15 \cdot 10^3. \quad (3.19)$$

3.3. Выводы по разделу.

Получена модель процесса сушки плодовых косточек, связывающая плотность теплового потока ИК-излучения, начальное влагосодержание продукта и амплитуду колебаний рабочего органа экспериментальной установки.

Оптимизация эксперимента факторного плана плодовых косточек упростит и ускорит инженерные и проектные работы при создании сушильной установки, что позволит проводить процесс сушки продукта ИК-излучением в виброкипящем слое в автоматическом режиме.

РАЗДЕЛ 4

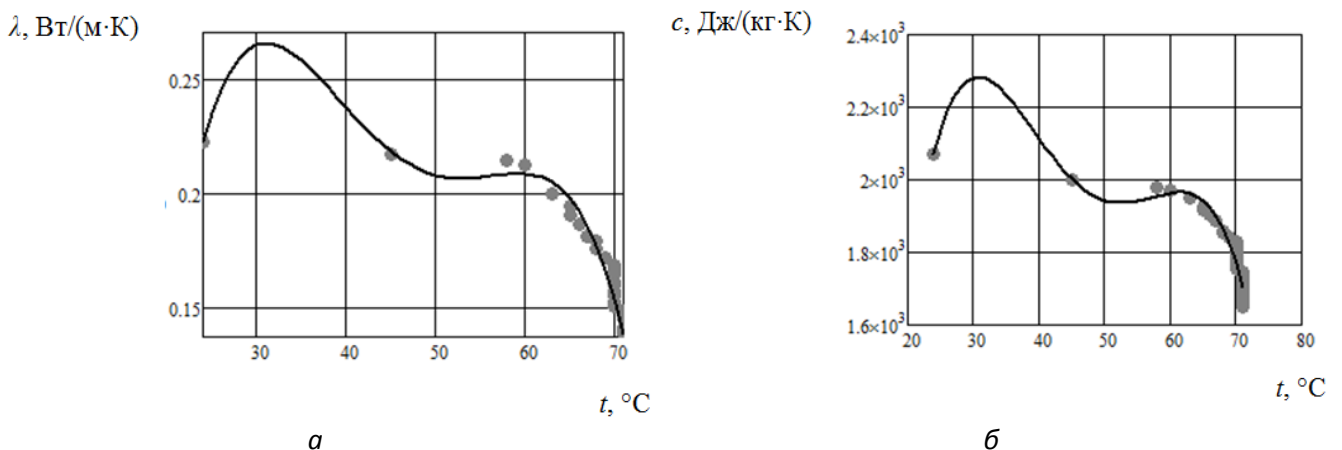
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ПЛОДОВЫХ КОСТОЧЕК

4.1. Результаты экспериментальных исследований теплофизических характеристик плодовых косточек

Значения теплофизических характеристик: теплопроводности λ , удельной теплоемкости c , плотности ρ , коэффициента температуропроводности a , плодовых косточек в процессе сушки при различных значениях плотности теплового потока ИК-облучения получены согласно, описанному в разделе 2 методикам.

По полученным данным в математическом пакете Mathcad проведена аппроксимация полиномами с последующим выводом соответствующих уравнений регрессии. Обработка данных осуществлялась при использовании встроенной функции *regress*, которая возвращает коэффициенты полинома степени n , сглаживающего точки методом наименьших квадратов. В результате получены эмпирические зависимости теплофизических характеристик плодовых косточек в рабочем диапазоне температур и влажностей.

На рисунках 4.1 и 4.2 приведены значения теплофизических характеристик плодовых косточек абрикоса в зависимости от температуры.



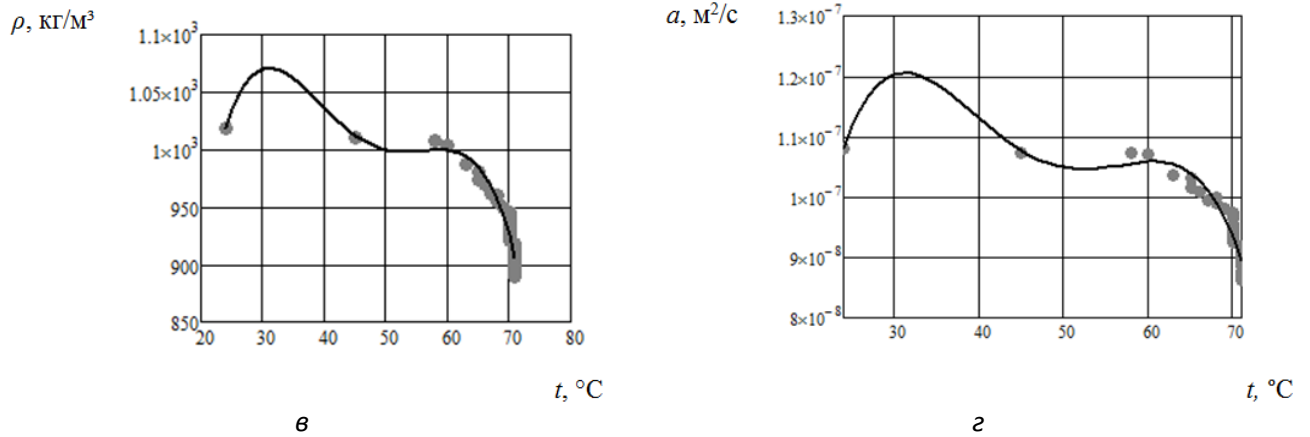


Рисунок 4.1 – Температурные зависимости теплофизических характеристик: коэффициента теплопроводности (а), удельной теплоемкости (б), плотности (в), коэффициента температуропроводности (г) плодовых косточек абрикоса при $q = 400 \text{ Вт/м}^2$

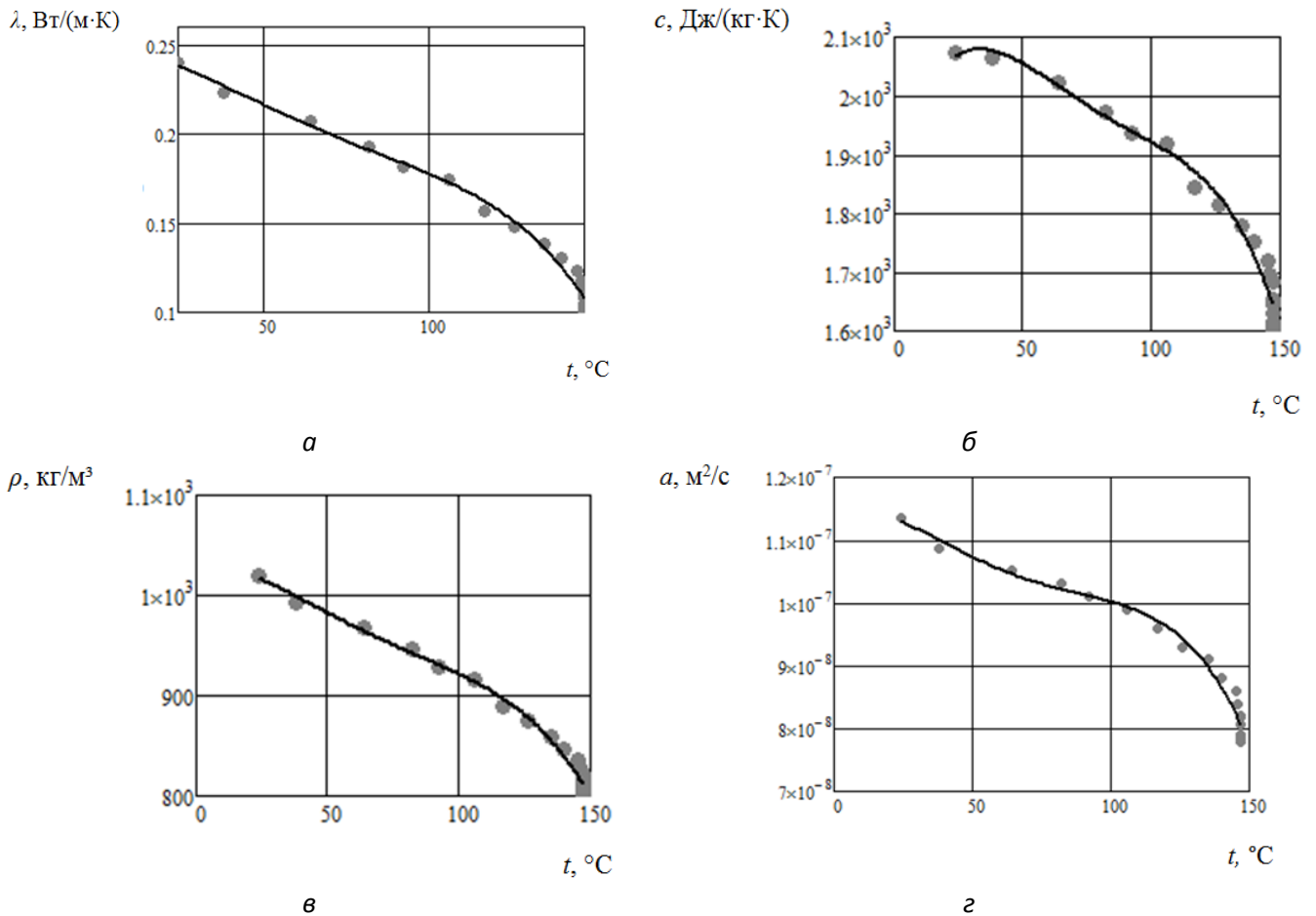


Рисунок 4.2 – Температурные зависимости теплофизических характеристик: коэффициента теплопроводности (а), удельной теплоемкости (б), плотности (в), коэффициента температуропроводности (г) плодовых косточек абрикоса при $q = 1400 \text{ Вт/м}^2$

Из рисунков 4.1 и 4.2 видно, что для всех полученных кривых характерно уменьшение значений ТФХ с повышением температуры нагрева. Наблюдаем при $q = 400 \text{ Вт/м}^2$ достаточно плавное уменьшение теплофизических характеристик в интервале температур от 24°C до 58°C дальнейшее более интенсивное уменьшение до равновесного влагосодержания. При $q = 1400 \text{ Вт/м}^2$ характерно более равномерное уменьшение ТФХ в процессе увеличения температуры.

Характер кривых на рисунках 4.1 и 4.2 показывает, что при повышении плотности теплового потока ИК-излучения происходит более равномерное уменьшение ТФХ, также нужно отметить, что начальное влагосодержание косточек абрикоса при $q = 1400 \text{ Вт/м}^2$ составляло $32,2\%$, а при $q = 400 \text{ Вт/м}^2$ - $28,7\%$.

По мере протекания процесса сушки косточек абрикоса до равновесного влагосодержания происходит уменьшение ТФХ при $q = 1400 \text{ Вт/м}^2$: ρ – на 21% , λ – 58% , c – 23% , a – 31% ; при $q = 400 \text{ Вт/м}^2$: ρ – 13% , λ – 43% , c – 20% , a – 18% .

Из представленных данных следует, что при повышении плотности теплового потока ИК-излучения изменение ТФХ происходит интенсивнее: ρ – на 8% , λ – 11% , c – 3% , a – 3% .

Уравнения регрессии по температурным зависимостям теплофизических характеристик для плодовых косточек абрикоса:

- при плотности теплового потока 400 Вт/м^2 , диапазона температур $24...71^\circ\text{C}$, диапазона влагосодержаний $28,7...9,2\%$:

$$\lambda = -1,77 + 0,19 \cdot t - 6,5 \cdot t^2 + 9,4 \cdot t^3 - 4,9 \cdot t^4, R^2 = 0,97;$$

$$c = -8,25 \cdot 10^3 + 997,4 \cdot t - 33,8 \cdot t^2 + 0,49 \cdot t^3 - 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot t^4, R^2 = 0,967;$$

$$\rho = -1,44 \cdot 10^{-3} + 237,8 \cdot t - 8,1 \cdot t^2 + 0,12 \cdot t^3 - 6,16 \cdot 10^{-4} \cdot t^4, R^2 = 0,972;$$

$$a = -4,46 \cdot 10^{-7} + 5,3 \cdot 10^{-8} \cdot t - 1,8 \cdot 10^{-9} \cdot t^2 + 2,59 \cdot 10^{-11} \cdot t^3 - 1,34 \cdot 10^{-13} \cdot t^4, R^2 = 0,977;$$

где R^2 - величина достоверности аппроксимации.

- при плотности теплового потока 900 Вт/м^2 , диапазона температур $24...119^\circ\text{C}$, диапазона влагосодержаний $29,8...5,2\%$:

$$\lambda = 0,4 - 0,013 \cdot t + 3,4 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 3,4 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 + 1,14 \cdot 10^{-8} \cdot t^4, R^2 = 0,994;$$

$$c = 2,62 \cdot 10^3 - 45,5 \cdot t + 1,1 \cdot t^2 - 0,01 \cdot t^3 + 3,45 \cdot 10^{-5} \cdot t^4, R^2 = 0,988;$$

$$\rho = 1,3 \cdot 10^3 - 20 \cdot t + 0,5 \cdot t^2 - 5 \cdot 10^{-3} \cdot t^3 + 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot t^4, R^2 = 0,994;$$

$$a = 1,6 \cdot 10^{-7} - 4,37 \cdot 10^{-9} \cdot t + 1,1 \cdot 10^{-10} \cdot t^2 - 1,1 \cdot 10^{-12} \cdot t^3 + 3,5 \cdot 10^{-15} \cdot t^4, R^2 = 0,994;$$

- при плотности теплового потока 1400 Вт/м^2 , диапазона температур $24 \dots 147^\circ\text{C}$, диапазона влажностей $32,2 \dots 4,3\%$:

$$\lambda = 0,25 + 4,8 \cdot 10^{-5} \cdot t - 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 2,9 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 - 1,1 \cdot 10^{-9} \cdot t^4, R^2 = 0,993;$$

$$c = 1,9 \cdot 10^3 + 15 \cdot t - 0,4 \cdot t^2 + 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot t^3 - 9,8 \cdot 10^{-6} \cdot t^4, R^2 = 0,992;$$

$$\rho = 10^3 + 0,2 \cdot t - 0,1 \cdot t^2 + 4,6 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 1,74 \cdot 10^{-6} \cdot t^4, R^2 = 0,993;$$

$$a = 1,16 \cdot 10^{-7} + 1,1 \cdot 10^{-10} \cdot t - 1,1 \cdot 10^{-11} \cdot t^2 + 1,23 \cdot 10^{-13} \cdot t^3 + 0,1 \cdot 10^{-15} \cdot t^4, R^2 = 0,993.$$

На рисунках 4.3 и 4.4 приведены значения теплофизических характеристик плодовых косточек черешни в зависимости от температуры.

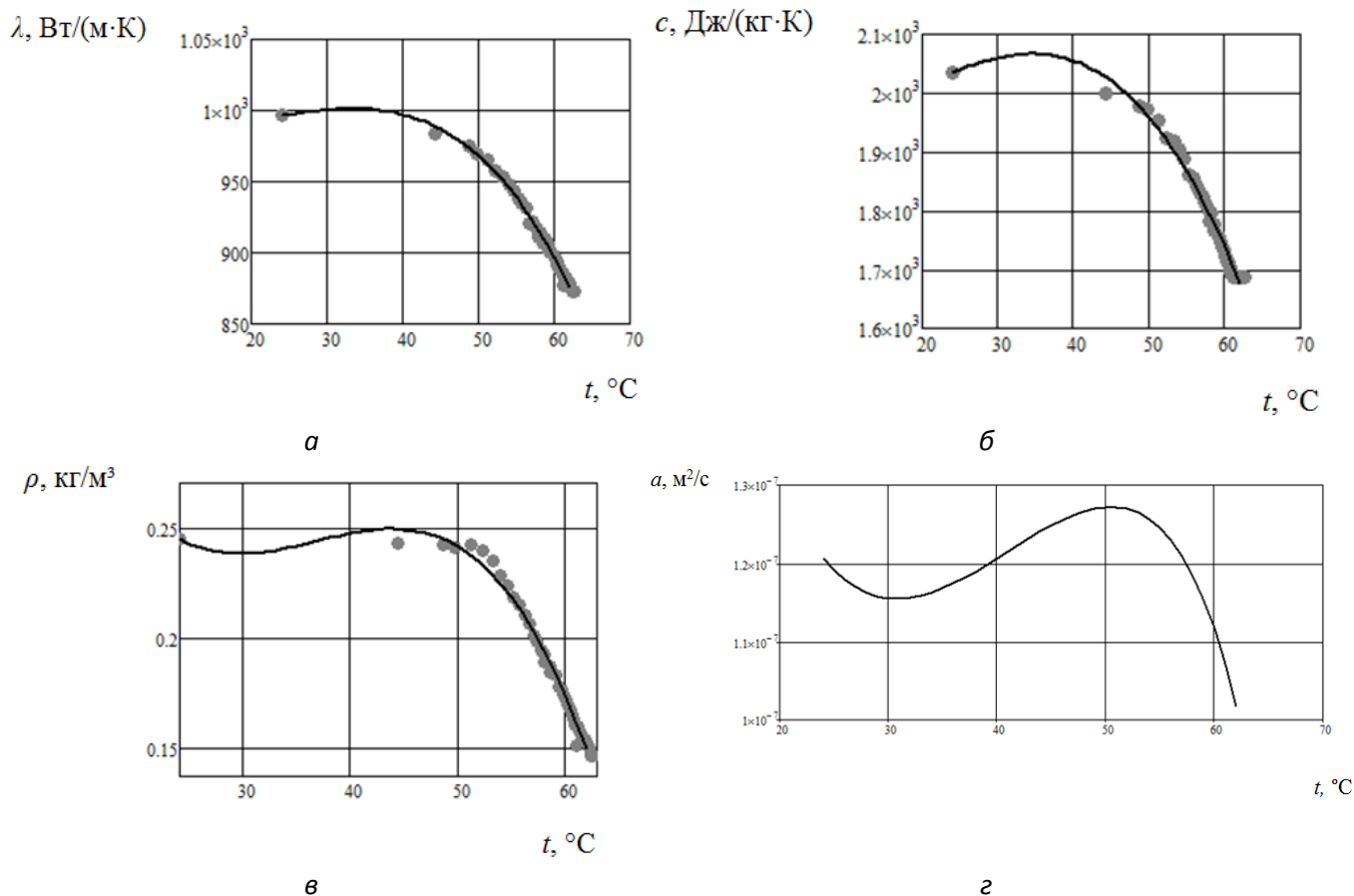


Рисунок 4.3 – Температурные зависимости теплофизических характеристик: коэффициента теплопроводности (а), удельной теплоемкости (б), плотности (в), коэффициента температуропроводности (г) плодовых косточек черешни при $q = 400 \text{ Вт/м}^2$

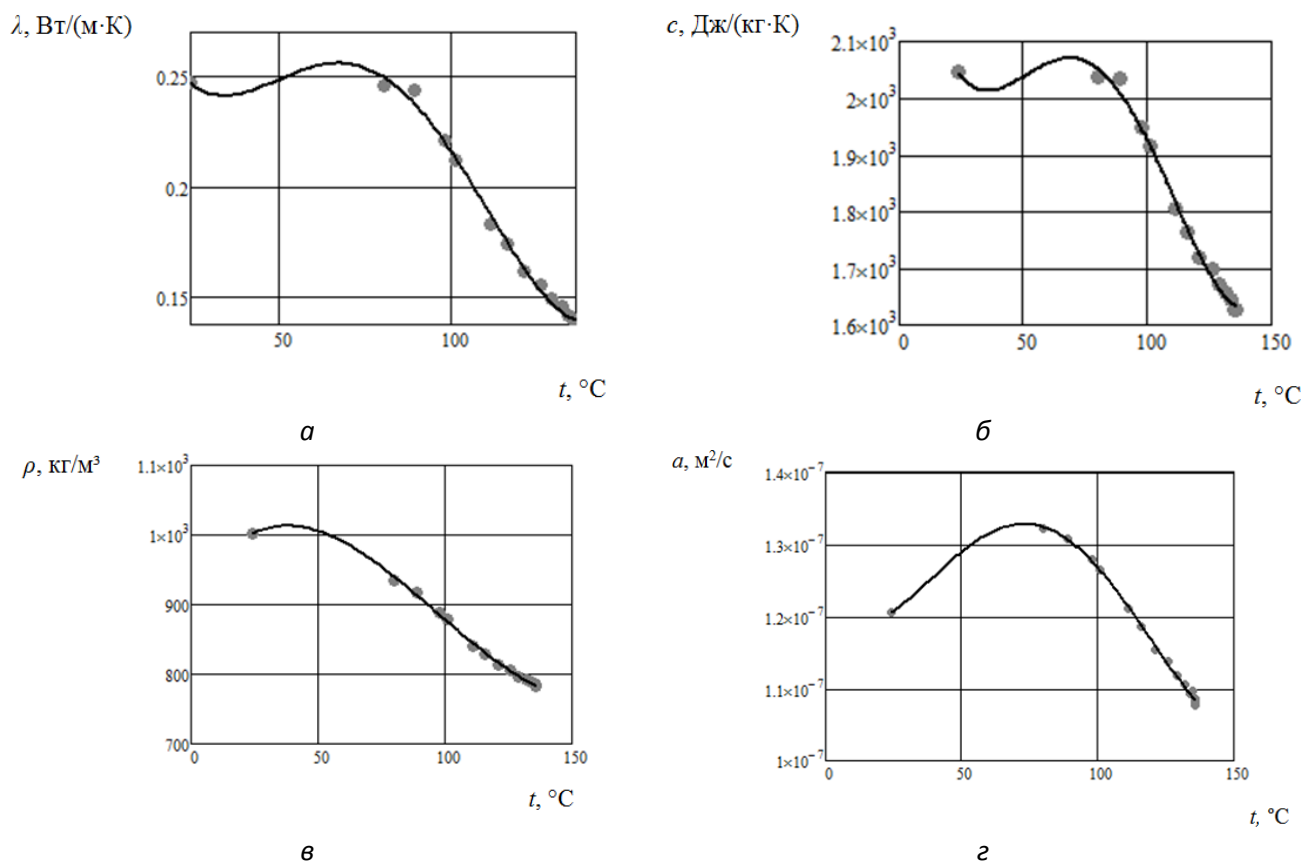


Рисунок 4.4 – Температурные зависимости теплофизических характеристик: коэффициента теплопроводности (а), удельной теплоемкости (б), плотности (в), коэффициента температуропроводности (г) плодовых косточек черешни при $q = 1400 \text{ Вт}/\text{м}^2$

Их анализ показывает аналогичную тенденцию изменения ТФХ как и для косточек абрикоса.

По мере протекания процесса сушки косточек черешни до равновесного влагосодержания происходит уменьшение ТФХ с повышением температуры при $q = 1400 \text{ Вт}/\text{м}^2$: ρ – на 21%, λ – 58%, c – 24%, a – 21%; при $q = 400 \text{ Вт}/\text{м}^2$: ρ – 12%, λ – 43%, c – 20%, a – 18%.

Уравнения регрессии по температурным зависимостям теплофизических характеристик для плодовых косточек черешни:

- при плотности теплового потока $400 \text{ Вт}/\text{м}^2$, диапазона температур $24 \dots 113^\circ\text{C}$, диапазона влагосодержаний $25,4 \dots 2,4\%$:

$$\lambda = 0,58 - 0,03 \cdot t + 8,5 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 7,7 \cdot 10^{-6} \cdot t^3, R^2 = 0,995;$$

$$c = 1,88 \cdot 10^3 + 4 \cdot t + 0,2 \cdot t^2 - 5,8 \cdot 10^{-3} \cdot t^3, R^2 = 0,991;$$

$$\rho = 1 \cdot 10^3 - 4 \cdot t + 0,1 \cdot t^2 - 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot t^3, R^2 = 0,998;$$

$$a = 1,7 \cdot 10^{-7} - 5,5 \cdot 10^{-9} \cdot t + 2 \cdot 10^{-10} \cdot t^2 - 2 \cdot 10^{-12} \cdot t^3, R^2 = 0,995.$$

- при плотности теплового потока 900 Вт/м^2 , диапазона температур $24 \dots 62^\circ\text{C}$, диапазона влагосодержаний $25,5 \dots 6,6\%$:

$$\lambda = 0,2 + 7 \cdot 10^{-3} \cdot t - 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 4,8 \cdot 10^{-7} \cdot t^3, R^2 = 0,998;$$

$$c = 2 \cdot 10^3 + t - 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 - 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot t^3, R^2 = 0,997;$$

$$\rho = 827 + 10,9 \cdot t - 0,18 \cdot t^2 + 7 \cdot 10^{-4} \cdot t^3, R^2 = 0,998;$$

$$a = 6 \cdot 10^{-8} + 3,7 \cdot 10^{-9} \cdot t - 6 \cdot 10^{-11} \cdot t^2 + 2,6 \cdot 10^{-13} \cdot t^3, R^2 = 0,975.$$

- при плотности теплового потока 1400 Вт/м^2 , диапазона температур $24 \dots 136^\circ\text{C}$, диапазона влагосодержаний $27,3 \dots 2\%$:

$$\lambda = 0,35 - 8,6 \cdot 10^{-3} \cdot t + 2,2 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 2 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 + 6,9 \cdot 10^{-9} \cdot t^4, R^2 = 0,998;$$

$$c = 2,5 \cdot 10^3 - 37 \cdot t + 0,9 \cdot t^2 - 8,910^{-3} \cdot t^3 + 2,8 \cdot 10^{-5} \cdot t^4, R^2 = 0,998;$$

$$\rho = 919 + 5,4 \cdot t - 0,1 \cdot t^2 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot t^3, R^2 = 0,999;$$

$$a = 1,2 \cdot 10^{-7} - 4,8 \cdot 10^{-10} \cdot t + 2,4 \cdot 10^{-11} \cdot t^2 - 2,8 \cdot 10^{-13} \cdot t^3, R^2 = 0,985.$$

Возможность проведения аппроксимации полученных кривых изменения ТФХ косточек черешни полиномами 3^й степени в отличие от косточек абрикоса можно объяснить различным химическим составом, структурой и формой продукта.

Для оценки степени достоверности полученных уравнений регрессии была рассчитана среднеквадратичная ошибка аппроксимации, анализ полученных значений которой показывает, что погрешность расчетов не превышает 3%.

Таким образом, полученные данные могут быть использованы в тепловых расчетах высушиваемых материалов, от которых зависит выбор рационального метода сушки материала. Тепловые характеристики необходимо знать также при обработке результатов экспериментальных исследований процессов тепло – и массообмена, определения механизма переноса тепла во влажном продукте, анализе форм и видов связи влаги с материалом [85].

4.2. Результаты определения физико-геометрических характеристик плодовых косточек

Определение физико-геометрических характеристик косточек абрикоса

На рисунке 4.5 приведены вариационные кривые линейных размеров случайной выборки косточек абрикоса сорта «Ранний Марусича» и их ядер в количестве 100 экземпляров (теоретические кривые, соответствующие нормальному распределению, изображены штриховыми). При построении кривых диапазоны размеров разбивались на 6 частичных интервалов.

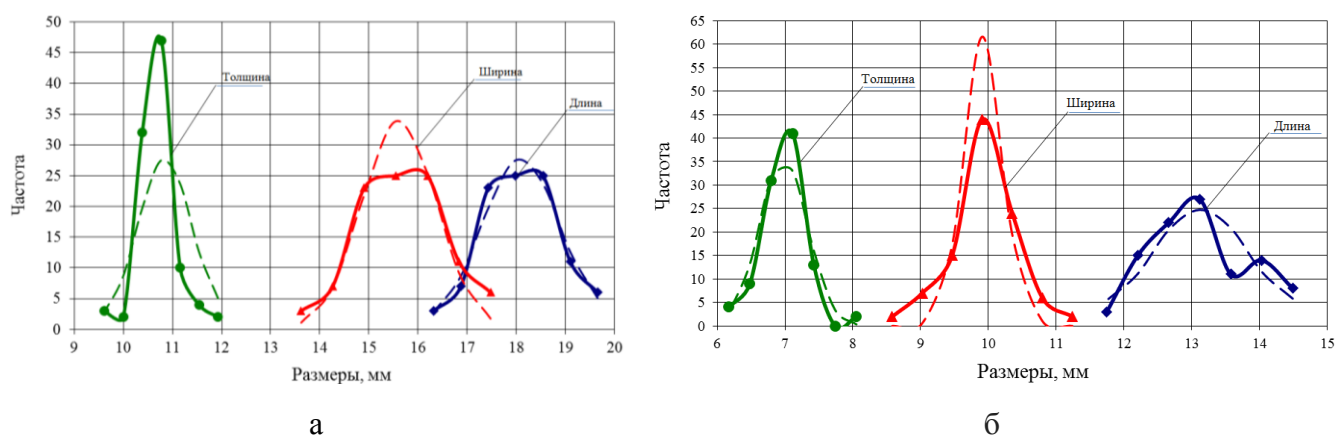


Рисунок 4.5 - Вариационные кривые линейных размеров косточек абрикоса сорта «Ранний Марусича» (а) и их ядер (б)

В таблице 4.1 приведены статистические оценки соответствующих выборок в таблице 4.2 - показатели, которые определяют отклонения этих выборок от нормального распределения.

Таблица 4.1- Статистические оценки экспериментальной выборки линейных размеров косточек абрикоса и их ядер

Линейный размер	Выборочная средняя, мм		Выборочное среднеквадратическое отклонение	
	косточки	ядра	косточки	ядра
Длина	18,1	13,13	0,78	0,72
Ширина	15,61	9,94	0,73	0,28
Толщина	10,69	6,98	0,40	0,34

Таблица 4.2- Показатели случайной выборки линейных размеров косточек абрикоса и их ядер, которые определяют их отклонения от нормального распределения

Линейный размер	Критерий Пирсона		Показатель асимметрии		Показатель эксцесса	
	косточки	ядра	косточки	ядра	косточки	ядра
Длина	1,57	8,80	0,006	0,259	-0,380	-0,750
Ширина	3,49	2560,85	0,254	-1,067	0,169	35,551
Толщина	21,90	16,0	0,319	0,079	1,789	1,170

Критическое значение критерия Пирсона для числа степеней свободы 4, что соответствует шести частичным интервалам вариационных кривых, представляет $\chi_{кр}^2(0,05; 4) = 9,5$. Среднеквадратичные погрешности асимметрии и эксцесса, соответствующие объему выборки 100, равны соответственно $\sigma_{As} = 0,239$ и $\sigma_{Ex} = 0,464$.

Сравнение значений критерия Пирсона с критическим значением позволяет с вероятностью 95% сделать вывод о том, что для длины и ширины косточек абрикоса и длины их ядер отклонения от нормального распределения не существенны.

Максимальное отклонение от нормального распределения наблюдается для ширины ядер косточек. Существенные асимметрия и эксцесс наблюдаются для толщины косточек (существенный островершинный эксцесс) и ширины ядер косточек (существенные левосторонняя асимметрия и островершинный эксцесс).

Для этой же выборки построены вариационные кривые массы косточек и их ядер - рисунок 4.6. Соответствующие статистические данные приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Статистические оценки и показатели случайной выборки массы косточек абрикоса и их ядер, которые определяют их отклонения от нормального распределения

Масса	Выборочная средняя, г	Выборочное среднеквадратическое отклонение	Критерий Пирсона	Показатель асимметрии	Показатель эксцесса
Косточки	1,43	0,14	7,85	0,346	0,665
Ядра	0,49	0,05	11,09	-0,072	0,657

Их анализ показывает, что с 95% вероятностью можно утверждать, что отклонение от нормального распределения массы косточек составляет 5% в отличие от распределения массы их ядер. Асимметрия и эксцесс для обоих распределений составляет не больше 5%.

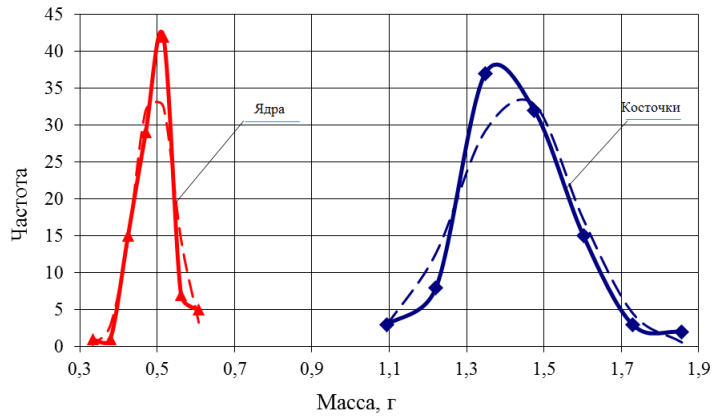


Рисунок 4.6 - Вариационные кривые массы косточек абрикоса сорта «Ранний Марусича» и их ядер

По всем вариационным кривым можно сделать вывод о большей склонности к нормальному закону распределения характеристик косточек абрикоса, чем их ядер. Однако, в целях обеспечения равномерности обработки косточек абрикоса и их ядер необходимо, перед началом процесса производить их сортировку.

Анализ корреляционных связей между рассматриваемыми выборками также свидетельствует о различии в характере этих связей для косточек абрикоса и их ядер (таблица 4.4). Для косточек характерны более тесные корреляционные связи, особенно между массой и линейными размерами (для массы и ширины коэффициент корреляции составляет 0,90). Для ядер характерны довольно слабые связи между линейными размерами и площадью поверхности, что свидетельствует о значительной вариации их формы. Однако можно выделить и общую тенденцию - из линейных размеров минимальное влияние на массу и площадь поверхности оказывает толщина.

Максимальное влияние на массу и площадь поверхности косточек оказывает ширина, для ядер - ширина на массу и длина на площадь поверхности.

Это, на наш взгляд, свидетельствует о существенной разнице в геометрической форме этих объектов.

Таблица 4.4 - Корреляционные связи между линейными размерами, массой и площадью поверхности косточек абрикоса и их ядер

Косточки					
	Длина	Ширина	Толщина	Масса	Площадь
Длина	1				
Ширина	0,81	1			
Толщина	0,57	0,69	1		
Масса	0,83	0,90	0,80	1	
Площадь	0,70	0,73	0,55	0,74	1
Ядра					
	Длина	Ширина	Толщина	Масса	Площадь
Длина	1				
Ширина	0,63	1			
Толщина	0,30	0,21	1		
Масса	0,71	0,79	0,63	1	
Площадь	0,44	0,28	0,21	0,40	1

Для выборки исследованы также корреляционные связи между одноименными характеристиками косточек абрикоса и их ядер, которые приведены в таблице 4.5.

Их анализ показывает об отсутствии функциональной связи между одноименными линейными размерами косточек и ядер, что подтверждает значительное различие их в форме, а также свидетельствует о существенном варьировании толщины оболочки для различных участков отдельной косточки.

Таблица 4.5- Корреляционные связи одноименными характеристиками косточек абрикоса и их ядер

Длина	Ширина	Толщина	Масса
0,63	0,75	0,68	0,92

По выборочным средним случайной выборки линейных размеров, массы и площади поверхности определены ряд физико-геометрических характеристик [49, 146], приведенных в таблице 4.6.

Таблица 4.6- Физико-геометрические характеристики случайной выборки косточек абрикоса

Показатели	Составляющие		
	Косточка	Ядро	Оболочка
Насыпная плотность, кг/м ³	568,28	600,17	-
Физическая плотность, кг/м ³	1019,49	1114,25	1247,56
Порозность	0,44	0,46	-
Объем воздушной прослойки между оболочкой и ядром, который приходится на 1 кг, м ³ /кг	0,15·10 ⁻³		
Выборочная средняя объема, м·10 ⁻⁶	1404,92	436,26	-
Выборочная средняя удельной поверхности, 1/м·10 ⁻³	0,498	0,772	-
Выборочная средняя эквивалентного диаметра, м·10 ⁻³	13,88	9,40	-
Выборочная средняя фактора формы	0,871	0,836	-
Выборочная средняя относительной массы оболочки	0,66		

В результате аппроксимации экспериментальных данных с помощью метода наименьших квадратов получены значения коэффициентов уравнения (2.13), которые приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7- Результаты определения констант мультипликативных моделей и их статистическая оценка

		C_0	C_1	C_2	C_3	Коэффициент корреляции	Критерий Фишера
Косточки	Значения	1,45	0,698	0,899	1,007	0,95	298,3
	Критерий Стьюдента	2,50	5,31	6,62	8,20		
Ядра	Значения	1,807	0,477	1,137	0,846	0,93	213,2
	Критерий Стьюдента	2,89	4,96	11,36	10,95		

Целесообразность проведения процесса калибровки плодовых косточек и их ядер непосредственно перед их высушиванием подтверждается полученными значениями критерия Фишера $F_{кр}(0,05; 3; 94) = 2,7$, которые больше критического значения.

Определение физико-геометрических характеристик косточек черешни

На рисунке 4.7 приведены вариационные кривые линейных размеров случайной выборки косточек черешни сорта «Наполеон» и их ядер в количестве 100 экземпляров (теоретические кривые, соответствующие нормальному распределению, изображены штриховыми).

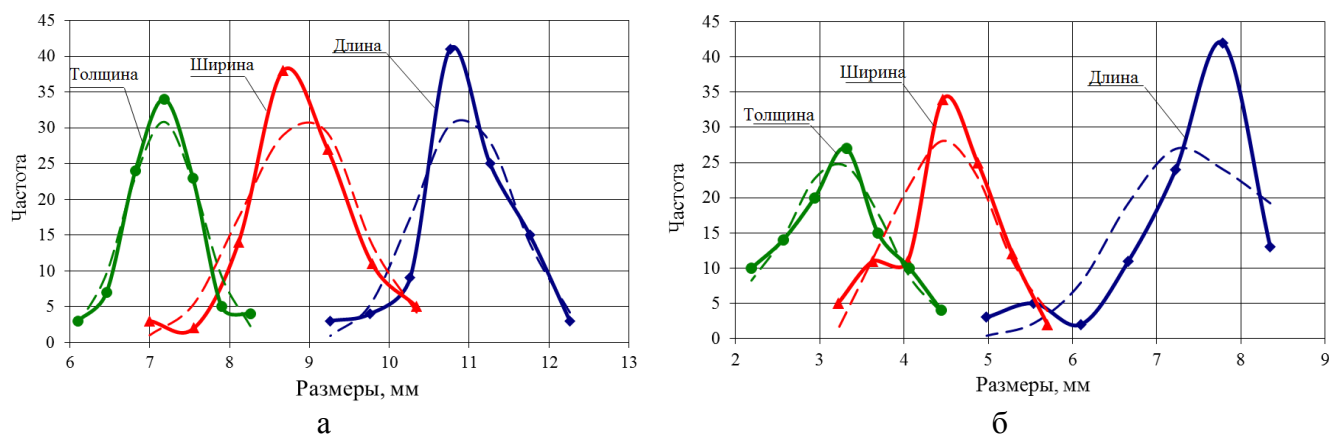


Рисунок 4.7 – Вариационные кривые линейных размеров косточек черешни (а) и их ядер (б)

При построении кривых диапазоны размеров разбивались на 7 частичных интервалов. В таблице 4.8 приведены статистические оценки соответствующих выборок в таблице 4.9 - показатели, которые определяют отклонения этих выборок от нормального распределения.

Таблица 4.8 - Статистические оценки экспериментальной выборки линейных размеров косточек черешни и их ядер

Линейный размер	Выборочная средняя, мм		Выборочное среднее квадратичное отклонение	
	косточки	ядра	косточки	ядра
Длина	10,95	7,37	0,611	0,792
Ширина	8,88	4,49	0,685	0,572
Толщина	7,17	3,2	0,452	0,591

Таблица 4.9 - Показатели случайной выборки линейных размеров косточек черешни и их ядер, которые определяют их отклонения от нормального распределения

Линейный размер	Критерий Пирсона		Показатель асимметрии		Показатель эксцесса	
	косточки	ядра	косточки	ядра	косточки	ядра
Длина	13,62	44,97	-0,394	-1,299	0,584	1,445
Ширина	10,53	17,78	-0,183	-0,377	0,587	-0,264
Толщина	4,47	1,60	0,098	0,088	0,235	-0,628

Критическое значение критерия Пирсона для числа степеней свободы 4, что соответствует семи частичным интервалам вариационных кривых, представляет $\chi_{кр}^2(0,05; 4) = 9,5$. Среднеквадратичные погрешности асимметрии и эксцесса, соответствующие объему выборки 100, равны соответственно $\sigma_{As} = 0,239$ и $\sigma_{Ex} = 0,464$.

Сравнение значений критерия Пирсона с критическим значением позволяет с вероятностью 95% сделать вывод о том, что только для толщины косточек черешни и их ядер отклонения от нормального распределения не существенно. Максимальное отклонение от нормального распределения наблюдается для длины ядер. Для длины ядра также наблюдается существенная правосторонняя асимметрия и существенный островершинный эксцесс.

Для этой же выборки построены вариационные кривые массы косточек и их ядер - рисунок 4.8. Соответствующие статистические данные приведены в таблице 4.10.

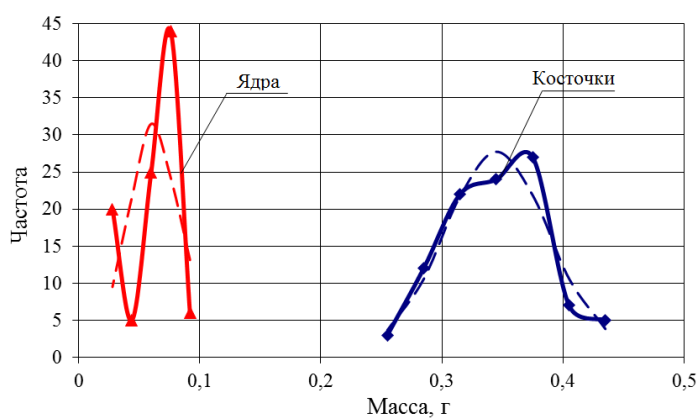


Рисунок 4.8 - Вариационные кривые массы косточек черешни и их ядер

Таблица 4.10 - Статистические оценки и показатели случайной выборки массы косточек черешни и их ядер, которые определяют их отклонения от нормального распределения

масса	Выборочная средняя, г	Выборочное среднеквадратичное отклонение	Критерий персона	Показатель асимметрии	Показатель эксцесса
Косточки	0,345	0,042	3,62	0,047	-0,422
Ядра	0,062	0,020	45,44	-0,659	-0,794

Их анализ показывает, что с 95% вероятностью можно утверждать о несущественном отклонении от нормального распределения массы косточек в отличие от массы их ядер. Асимметрия и эксцесс для обоих распределений являются несущественными.

По всем вариационными кривыми можно сделать вывод о большей склонности к нормальному закону распределения характеристик косточек черешни, чем их ядер. Однако, в целях обеспечения равномерности обработки косточек черешни и их ядер необходимо, перед началом процесса осуществлять их сортировку.

Анализ корреляционных связей между рассматриваемыми выборками также свидетельствует о различии в характере этих связей для косточек черешни и их ядер (таблица 4.11).

Таблица 4.11- Корреляционные связи между линейными размерами и массой косточек черешни и их ядер

Косточки				
	Длина	Ширина	Толщина	Масса
Длина	1			
Ширина	0,32	1		
Толщина	0,28	0,76	1	
Масса	0,41	0,66	0,64	1
Ядра				
	Длина	Ширина	Толщина	Масса
Длина	1			
Ширина	0,39	1		
Толщина	0,18	0,36	1	
Масса	0,19	0,23	0,19	1

Для косточек характерны более тесные корреляционные связи, особенно между шириной и толщиной (соответствующий коэффициент корреляции составляет 76). Однако, можно выделить и общую тенденцию - из линейных размеров максимальное влияние на массу оказывает ширина, минимальное - длина.

Для выборки исследованы также корреляционные связи между одноименными характеристиками косточек черешни и их ядер, которые приведены в таблице 4.12.

Их анализ свидетельствует о достаточно низкой связи между соответствующими характеристиками, что подтверждает значительное различие их в форме, а также свидетельствует о существенном варьировании толщины оболочки для различных участков отдельной косточки.

Таблица 4.12 - Корреляционные связи одноименными характеристиками косточек черешни и их ядер

Длина	Ширина	Толщина	Масса
0,18	0,31	-0,10	0,22

По выборочным средним случайной выборки линейных размеров и массы определен ряд физико-геометрических характеристик [49,146], приведенных в таблице 4.13.

Таблица 4.13- Физико-геометрические характеристики случайной выборки косточек черешни

Показатели	Составляющие		
	Косточка	Ядро	Оболочка
Насыпная плотность, кг/м ³	542,15	548,44	-
Физическая плотность, кг/м ³	1002,5	1004,62	1129,0
Порозность	0,459	0,454	-
Объем воздушной прослойки между оболочкой и ядром, который приходится на 1 кг продукта, м ³ /кг	0,087·10 ⁻³		
Выборочная средняя объема, м · 10 ⁻⁶	337,96	58,03	-
Выборочная средняя эквивалентного диаметра, м · 10 ⁻³	8,64	4,80	-
Выборочная средняя относительной массы оболочки	0,83		

4.3. Экспериментальные исследования влияния параметров вибрации на характер перемещения плодовых косточек

На экспериментальной установке, общий вид которой представлен в разделе 2, проведена серия исследований для оценки влияния параметров вибрации на скорость перемещения косточек.

Исследования показали, что свойства слоя продукта существенно зависят от интенсивности вибрационного воздействия [158].

Критерием, с помощью которого принято характеризовать различные состояния вибрирующего слоя, является коэффициент режима вибрации k_g (1.8).

В промышленных вибрационных транспортерах как правило принимают $1 < k_g < 3,3$.

Необходимый режим работы виброустановки, согласно (1.8) может быть достигнут путем изменения угла наклона траектории колебаний относительно рабочей плоскости, частоты, так и амплитуды колебаний.

Выбор параметров вибрации в данных исследованиях обусловлен следующими соображениями. Как отмечает ряд исследователей [159-164], как правило значения $A\omega^2$ лежат в диапазоне от 12 до 80 м/с² (или $k_g = 1,2...8$), поскольку работа с большими значениями неблагоприятно сказывается на прочности и долговечности привода и самой установки. При этом увеличения колебаний вызывает повышение шума, снижает надежность работы узлов виброустановки. В свою очередь, создание больших амплитуд колебаний требует громоздких вибраторов, затрудняет пуск и остановку машины, связанных с прохождением через резонанс.

Экспериментальная установка оснащена загрузочным бункером для подачи плодовых косточек на вибрлоток. Регулирование толщины слоя продукта, подаваемого из бункера, осуществляется при помощи шибера. По известной длине лотка и продолжительности перемещения продукта по транспортеру, а также установленной амплитуде и частоте вибрации определялась скорость вибротранспортирования плодовых косточек.

Как видно из графиков (рисунок 4.9), под воздействием на плодовые косточки абрикоса вибрации с ускорением ниже ускорения свободного падения ($A\omega^2 < g$, то есть $k_g < 1$) происходит движение косточки без отрыва от поверхности (без «подбрасывания»). При превышении ускорения вибрации над

ускорением свободного падения ($A\omega^2 > g$, то есть $k_g > 1$) имеет место движение косточки с отрывом от поверхности (с «подбрасыванием»).

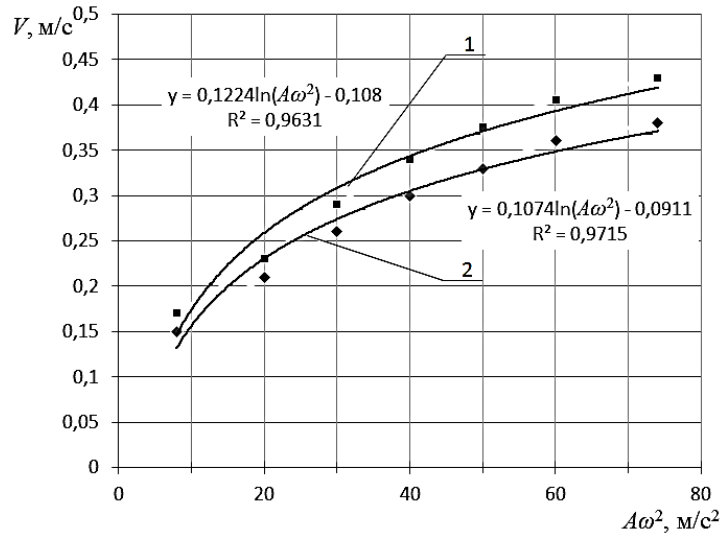


Рисунок 4.9 - График зависимости скорости вибротранспортирования плодовых косточек от ускорения вибрации $A\omega^2$ при постоянной амплитуде $A=3$ мм и различных частотах ω : 1- косточки черешни; 2- косточки абрикоса

Анализ параметров вибрации на процесс перемещения плодовых косточек позволяет сделать выводы, что при увеличении амплитуды колебаний возрастает частота пребывания частицы продукта в «полете» на расстоянии от поверхности вибротранспортера.

При увеличении амплитуды колебаний более 5 мм происходит очень интенсивное перемещение продукта по поверхности вибротранспортера, при этом намного уменьшается продолжительность удержания одного положения косточки, при этом наблюдается недостаточное влияние лучей на слой продукта при проведении процесса сушки (рисунок 4.10).

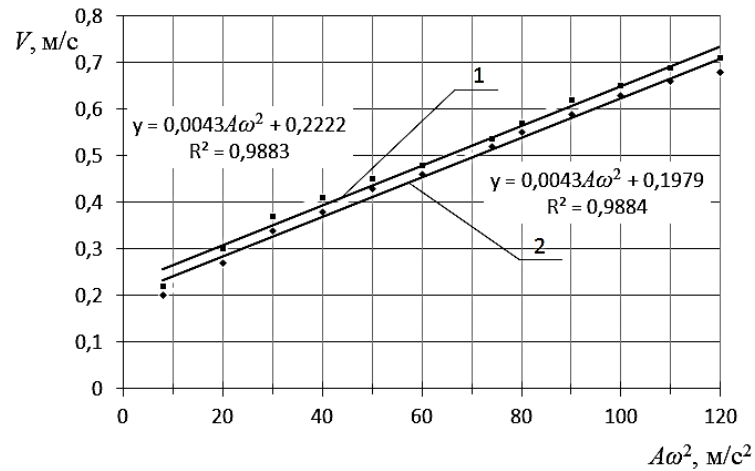


Рисунок 4.10 - График зависимости скорости вибротранспортирования плодовых косточек от ускорения вибрации $A\omega^2$ при постоянной амплитуде

$A = 5$ мм и различных частотах ω :

1- косточки черешни; 2- косточки абрикоса

С целью исследования характера перемещения плодовых косточек при изменении параметров вибрации проводилось предварительное окрашивание одной боковой поверхности косточек белой краской, вторая же поверхность оставалась не окрашенной, рисунок 4.11.



Рисунок 4.11 - Расположение закрасенных с одной стороны плодовых косточек абрикоса на транспортере до начала виброперемещения

При включении привода вибротранспортера экспериментальной установки плодовые косточки под воздействием вибрации (заданной амплитуды) начинали свободно двигаться.

В процессе их перемещения по вибрлотку наблюдалось изменение окрашенной стороны большего количества косточек на не окрашенную (рисунок 4.12). Причем при $A = 3$ мм большая часть косточек меняла свою сторону.

Таким образом можно утверждать, что в процессе виброперемещения происходит постоянный переворот частиц продукта, который при сушке приводит к равномерному повышению температуры в полном объеме продукта и значительной интенсификации удаления из него влаги, возможностью осуществлять передачу продукту большего количества энергии в единицу времени, создавать большие перепады температуры и влажности и применять сменные воздействия - чередование интенсивного внешнего тепло-, массообмена с «отдыхом» продукта, при котором искусственно созданный градиент влагосодержания, а также и температурный градиент воздействуют на продукт, позволяя влаге перемещаться из внутренних слоев к наружной поверхности.



Рисунок 4.12 - Расположение плодовых косточек абрикоса при осуществлении движения по лотку вибротранспортера

Таким образом, проведенные нами экспериментальные исследования влияния параметров вибрации на характер перемещения плодовых косточек позволяют сделать следующие выводы относительно целесообразных параметров вибрации: амплитуда вибрации $A = 3$ мм, ускорение вибрации $45...55$ м/с², при

которых происходит соединение интенсивного движения плодовых косточек с созданием и соблюдением постоянного их переворота.

Определение статистических характеристик виброперемещения плодовых косточек

Статистический анализ выборки из 150 косточек проводился в программе Excel при использовании формул подраздела 2.3.1, при определении статистических показателей вариации, характеризующих количество плодовых косточек абрикоса, осуществившие переворот с окрашенной стороны на неокрашенную при $A=0,003\text{м}$.

Получены следующие данные:

Номер опыта i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
x_i , шт	140	143	141	140	143	139	142	144	143	142	143	139	140	140	141	143

$n = 16$; $f = n - 1 = 16 - 1 = 15$; максимальное значение выборки – 144 шт; минимальное значение выборки – 139 шт; размах вариации: $R = x_{max} - x_{min} = 144 - 139 = 5$; среднее значение выборки – 141,5; среднее линейное отклонение – 1,438; дисперсия по генеральной совокупности – 2,5; дисперсия по выборке – 2,7; среднеквадратичное отклонение генеральное – 1,58; среднеквадратичное отклонение по выборке – 1,63; коэффициент вариации – 0,01, 1%; коэффициент осцилляции – 0,04; критерий Стьюдента, 5% ($n-1$) – 2,13; доверительный интервал ДИ – 0,9; относительная ошибка – 0,007.

Анализ полученных значений статистических характеристик показывает, что данная выборка является однородной, что подтверждают полученные значения критерия Стьюдента и среднеквадратичного отклонения, а также коэффициента вариации.

4.4. Кинетика сушки косточек и анализ показателей эффективности процесса в зависимости от плотности теплового потока ИК-облучения

В данном разделе обобщены результаты экспериментальных исследований кинетики сушки косточек абрикоса, вишни, черешни, а также их составляющих в виброкипящем слое, в зависимости от плотности теплового потока ИК-облучения. Обобщение результатов серии экспериментальных исследований проводилось путем анализа кривых сушки, скорости сушки, термограмм, температурных кривых, кривых изменения приведенных энергозатрат, продолжительности сушки, среднеинтегральной температуры продукта, а также изменения числа Ребиндера и теплового потока, поглощаемого продуктом, в процессе обработки.

На рисунках 4.13-4.15 приведены кривые сушки и скорости сушки плодовых косточек абрикоса, вишни и черешни соответственно.

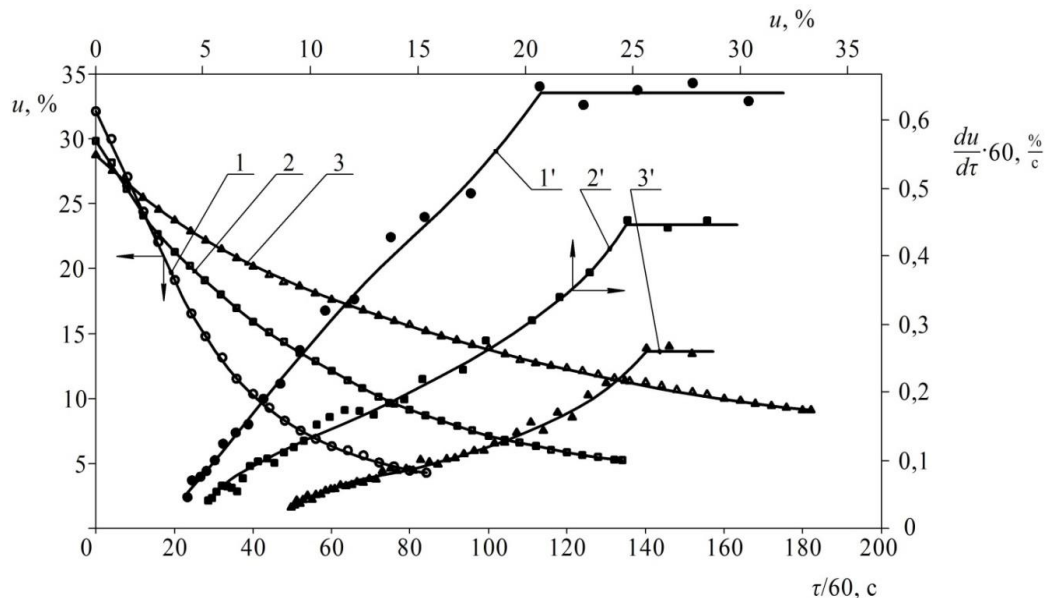


Рисунок 4.13 - Кривые сушки (1-3) и скорости сушки (1'-3') косточек абрикоса в зависимости от плотности теплового потока ИК- облучения:

$$1, 1' - 1400 \text{ Вт/м}^2; 2, 2' - 900 \text{ Вт/м}^2; 3, 3' - 400 \text{ Вт/м}^2$$

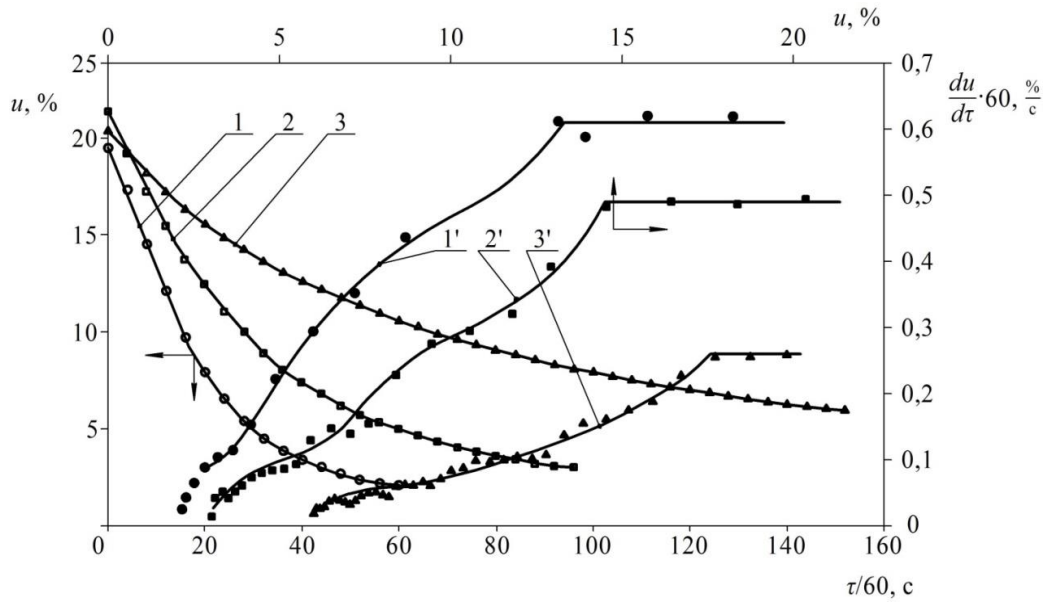


Рисунок 4.14 - Кривые сушки (1-3) и скорости сушки (1'-3') косточек вишни в зависимости от плотности теплового потока ИК- облучения:

1, 1' - 1400 Вт/м²; 2, 2' - 900 Вт/м²; 3, 3' - 400 Вт/м²

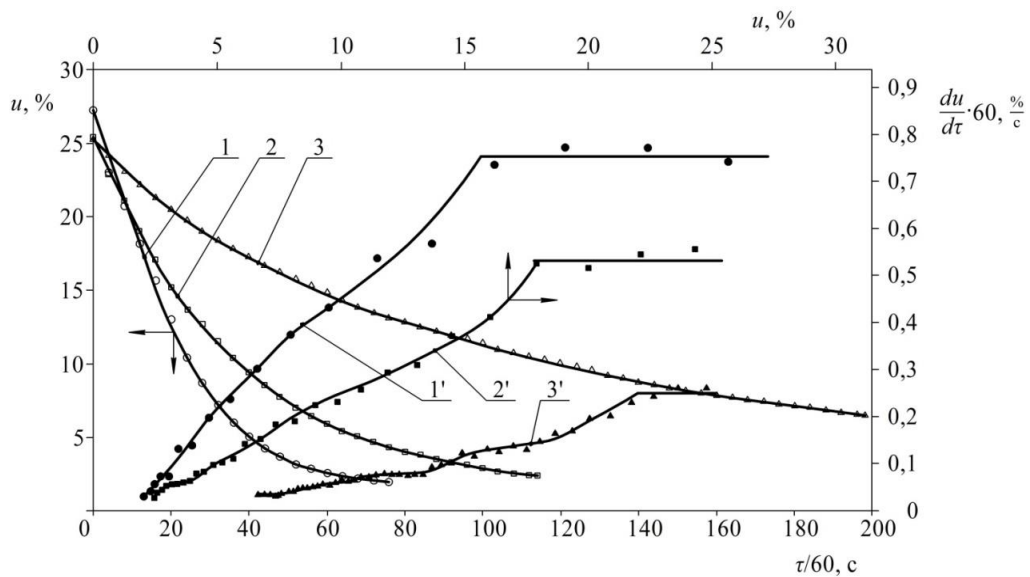


Рисунок 4.15 - Кривые сушки (1-3) и скорости сушки (1'-3') косточек черешни в зависимости от плотности теплового потока ИК- облучения:

1, 1' - 1400 Вт/м²; 2, 2' - 900 Вт/м²; 3, 3' - 400 Вт/м²

В зависимости от плотности теплового потока инфракрасного облучения при удельной нагрузке на вибрирующую поверхность 5,7 кг/м² для косточек абрикоса и вишни и 4,8 кг/м² для черешни.

Как видно из приведенных кривых, процесс сушки протекает в соответствии с закономерностями удаления влаги из коллоидных капиллярно-пористых тел: присутствуют два периода - постоянной и убывающей скорости сушки, участки которых четко отделяются на кривых сушки и скорости сушки.

Начальная стадия процесса - прогревание продукта - на графиках не просматривается. В первом периоде постоянной скорости удаляется в основном свободная влага, уменьшение влагосодержания соответствует линейному закону во времени.

Переход от периода постоянной скорости к периоду падающей скорости сушки определяется влагосодержанием в пределах 25,6...20,7% для косточек абрикоса, 17,8...13,3% для косточек вишни, 22...15,7% для косточек черешни в зависимости от плотности теплового потока инфракрасного облучения, причем при его повышении происходит смещение критической точки в сторону меньшего влагосодержания.

Смещение первой критической точки сопровождается также изменением соотношения продолжительности периодов сушки - при повышении плотности теплового потока инфракрасного облучения доля первого периода в общей продолжительности процесса увеличивается.

На кривых скорости сушки во втором периоде наблюдается переход от удаления влаги из микрокапилляров к удалению адсорбционно связанной влаги, причем форма кривых сушки для различных плодовых косточек существенно отличается, что свидетельствует о разном соотношении видов связанной влаги.

Присутствие влаги различных связей в плодовых косточках, очевидно, обусловлено различным химическим составом и структурой их составляющих: оболочка косточек, которая состоит в основном из углеводов, содержит свободную и капиллярную влагу, тогда как ядро, состоящее в основном из липидов и белков, содержит также большую долю адсорбционно связанной влаги.

Как видно из рисунка 4.16 отличие энергии связи влаги ядра и оболочки существенно влияет на их равновесное влагосодержание.

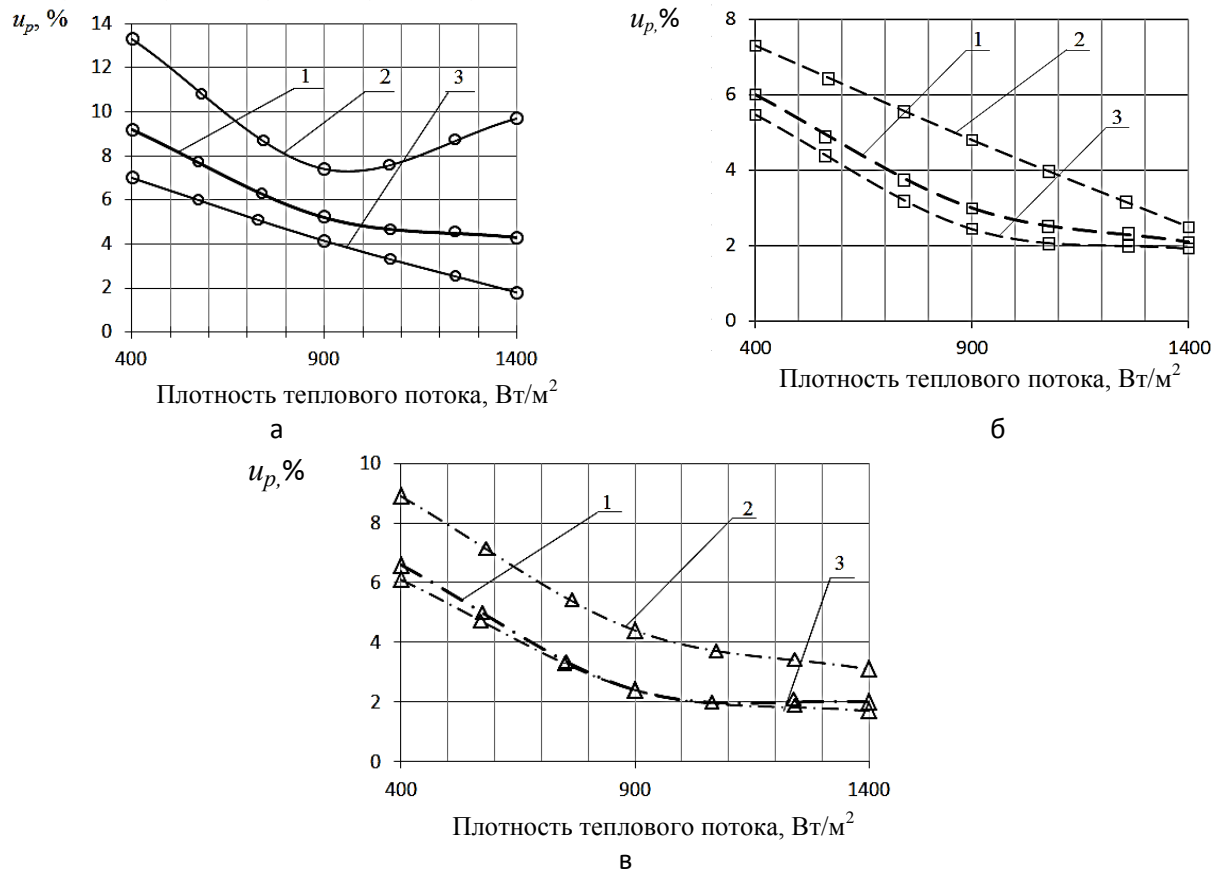


Рисунок 4.16 - Изменение равновесного влагосодержания косточек абрикоса (а), вишни (б) и черешни (в) в зависимости от плотности теплового потока ИК- облучения: 1 – косточка; 2 – ядро; 3 – оболочка

Так, для всех исследуемых видов плодовых косточек наблюдается одинаковая тенденция - равновесное влагосодержание ядер существенно выше равновесного влагосодержания оболочек. В результате суммарное равновесное влагосодержание косточки занимает промежуточное значение, которое определяется соотношением в косточке массы ядра и оболочки.

Для косточек черешни, например, имеющих наибольшую долю оболочки в косточке (82,7% от массы косточки до сушки), кривая изменения равновесного влагосодержания в зависимости от плотности теплового потока ИК-облучения практически совпадает с аналогичной кривой для оболочки, как видно из рисунка 4.16, в.

Наряду с одинаковым характером изменения кривых равновесного влагосодержания на рисунке 4.16 наблюдается также и определенное различие в

их уровне, который хорошо коррелирует с начальным влажностью косточек и их размерами. Так, для косточек абрикоса, имеющие высокое начальное влажностью 28,7...32,2% и наибольший эквивалентный диаметр выборки 13,88 мм, наблюдается наиболее высокий уровень равновесного влажностью, тогда как для косточек вишни, имеющие низкое начальное влажностью 19,2...20,4% и наименьший эквивалентный диаметр выборки 7,66 мм, наблюдается наименьший уровень равновесного влажностью.

Рассмотрим влияние плотности теплового потока ИК-излучения на показатели, которые определяют эффективность процесса сушки (рисунок 4.17).

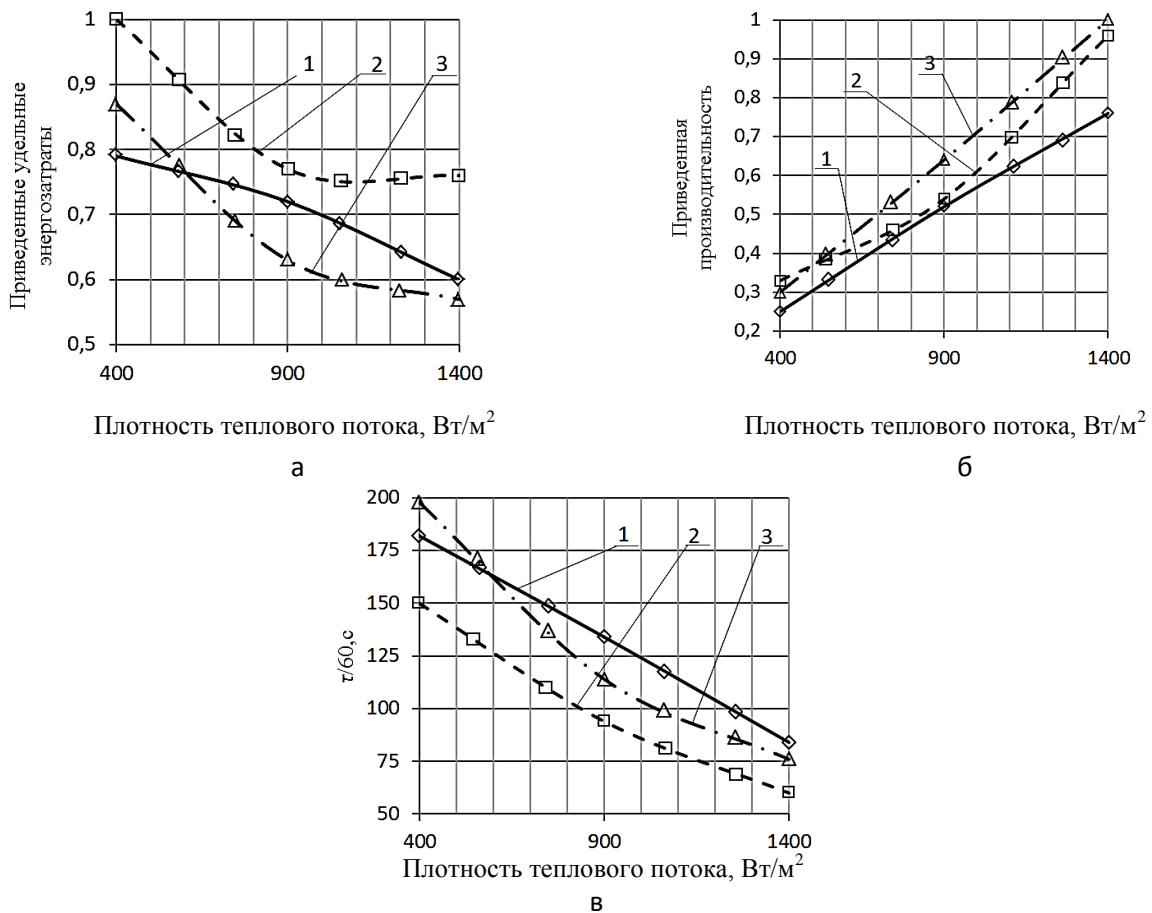


Рисунок 4.17 - Изменение приведенных удельных энергозатрат (а), приведенной производительности (б) и продолжительности процесса сушки (в) в зависимости от плотности теплового потока инфракрасного облучения:

1 - косточки абрикоса; 2 - косточки вишни; 3 - косточки черешни

А именно: удельные энергозатраты на испарение 1 кг влаги, производительность по испаряемой влаге (эти показатели приведены к

максимальному значению для всех исследуемых видов плодовых косточек), продолжительность сушки до равновесного влагосодержания.

Общей тенденцией для всех видов плодовых косточек является снижение энергозатрат, повышение производительности и сокращение продолжительности сушки до равновесного влагосодержания при увеличении плотности теплового потока ИК- облучения.

Для косточек абрикоса кривые изменения вышеуказанных показателей имеют характер, близкий к линейному в отличие от графиков для других видов косточек, имеющих значительную кривизну. Разный уровень кривых изменения продолжительности сушки до равновесного влагосодержания на рисунке 4.16 в, имеющие наибольшее сходство формы по всем показателям обусловлен разницей в начальном влагосодержании, размерах различных видов плодовых косточек и удельной нагрузке продукта на рабочую поверхность. Так как высокий уровень соответствует кривой для косточек абрикоса с наибольшим эквивалентного диаметра, начального влагосодержания и удельной нагрузкой продукта на рабочую поверхность $5,7 \text{ кг/м}^2$, нижний уровень - косточкам вишни с наименьшими значениями эквивалентного диаметра, начального влагосодержания и удельной нагрузкой продукта на рабочую поверхность $4,8 \text{ кг/м}^2$.

Наиболее существенные различия для разных видов плодовых косточек, как по форме, так и по уровню, наблюдаются на графиках изменения приведенных удельных энергозатрат.

Разный уровень близких по форме кривых для косточек вишни и черешни обусловлен, очевидно, разным начальным влагосодержанием и удельной нагрузкой продукта на рабочую поверхность, которые больше для косточек черешни. Для этих двух кривых можно констатировать небольшое изменение удельных энергозатрат при повышении плотности теплового потока ИК- облучения от 900 до 1400 Вт/м^2 и резкий их рост при снижении этого рабочего параметра ниже 900 Вт/м^2 .

Для косточек абрикоса удельные энергозатраты пропорционально возрастают при снижении плотности теплового потока ИК- облучения.

Определенный интерес представляют результаты сушки оболочек и ядер косточек абрикоса отдельно. На рисунке 4.18 приведены соответствующие кривые сушки и скорости сушки для плотности теплового потока ИК-облучения 1400 Вт/м^2 , полученные при удельной нагрузке продукта на рабочую поверхность $5,7 \text{ кг/м}^2$.

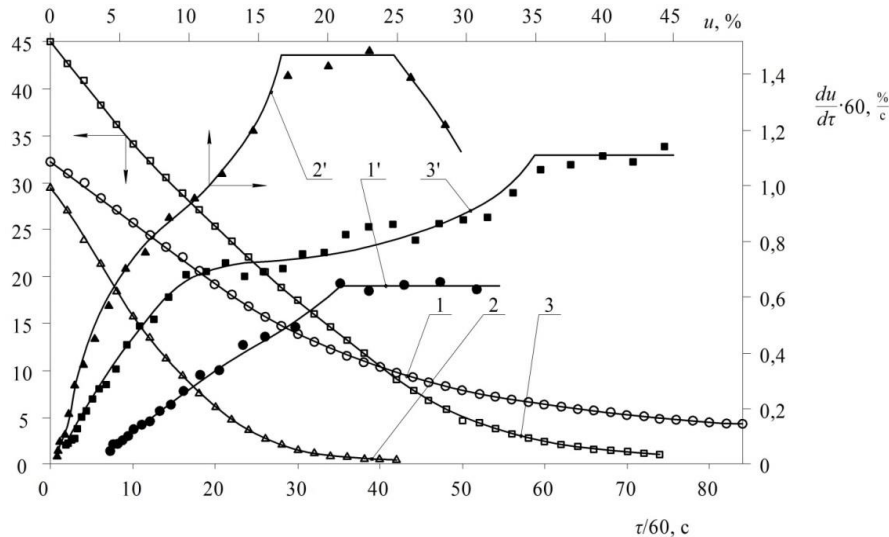


Рисунок 4.18 – Кривые сушки (1-3) и скорости сушки (1'-3') косточек абрикоса, их оболочек и ядер при плотности теплового потока ИК-облучения 1400 Вт/м^2 :

1, 1' - косточки; 2, 2' - оболочки; 3, 3' - ядра

Главной тенденцией, которая следует из анализа кривых на рисунке 4.18, является значительное повышение интенсивности процесса при сушке ядер и оболочек отдельно - для оболочек процесс сушки до равновесного влагосодержания протекает в 2 раза быстрее, для ядер - в 1,17. Это, очевидно, вызвано уменьшением размеров частиц продукта.

Так, средняя выборочная толщина обрушенных оболочек исследуемой выборки составляет 2,30 мм, а средняя выборочная эквивалентного диаметра ядер 9,40 мм, что в первом случае значительно, а во втором - существенно меньше средней выборочной эквивалентного диаметра целой косточки, которая составляет 13,88 мм.

Существенная интенсивность сушки оболочек по сравнению с ядрами обусловлена разницей в их размерах, разным количеством влаги в этих

составляющих косточки, а также различным соотношением свободной и связанной влаги.

Так, оболочки имеют начальное влагосодержание 29,6% и первое критическое влагосодержание 16,7%, то есть соотношение свободной и связанной влаги близко к 1. Для ядер начальное влагосодержание составляет 45%, а первое критическое - 34,8%, то есть связанной влаги в 3,4 раза больше, чем свободной.

Еще одним фактором снижающим интенсивность сушки целой косточки по сравнению с ее составляющими, является присутствие в ней воздушной прослойки между оболочкой и ядром, которая выполняет функцию теплоизоляции и тормозит передачу теплоты от оболочки к ядру.

Повышение интенсивности сушки ядер и оболочек отдельно по сравнению с целыми косточками вносит в результате значительное влияние на показатели эффективности процесса. Так, энергозатраты на испарение 1 кг влаги меньше в 2,14 раза для оболочек и в 1,65 раза для ядер, производительность больше, соответственно, в 2,1 и 1,61 раза, равновесное влагосодержание, соответственно, составляет 0,6 и 1,1%.

Данные по кинетике сушки исследуемых плодовых косточек в зависимости от плотности теплового потока ИК- облучения сведены в таблицах 4.14-4.16.

Таблица 4.14 -Данные по кинетике сушки косточек абрикоса

Параметры	Плотность теплового потока, Вт/м ²		
	1400	900	400
Начальное влагосодержание, %	32,2	29,8	28,7
Скорость сушки в первом периоде, %/мин	0,64	0,45	0,26
Первое критическое влагосодержание, %	20,7	24,8	25,6
Равновесное влагосодержание косточки, %	4,3	5,2	9,2
Равновесное влагосодержание ядра, %	9,7	7,4	13,3
Равновесное влагосодержание оболочки, %	1,8	4,14	7
Продолжительность сушки до равновесного влагосодержания, мин	84	134	182
Приведенные удельные энергозатраты, Дж/кг	0,6	0,72	0,79
Приведенная производительность по испаряемой влаге	0,76	0,52	0,25

Таблица 4.15 - Данные по кинетике сушки косточек вишни

Параметры	Плотность теплового потока, Вт/м ²		
	1400	900	400
Начальное влагосодержание, %	19,4	21,4	20,4
Скорость сушки в первом периоде, %/мин	0,62	0,49	0,26
Первое критическое влагосодержание, %	13,3	14,5	17,8
Равновесное влагосодержание косточки, %	2,1	3	6
Равновесное влагосодержание ядра, %	2,5	4,8	7,3
Равновесное влагосодержание оболочки, %	1,92	2,44	5,47
Продолжительность сушки до равновесного влагосодержания, мин	60	94	150
Приведенные удельные энергозатраты, Дж/кг	0,76	0,77	1
Приведенная производительность по испаряемой влаге	0,96	0,54	0,33

Таблица 4.16 - Данные по кинетике сушки косточек черешни

Параметры	Плотность теплового потока, Вт/м ²		
	1400	900	400
Начальное влагосодержание, %	27,3	25,4	25,5
Скорость сушки в первом периоде, %/мин	0,75	0,53	0,25
Первое критическое влагосодержание, %	15,7	17,8	22
Равновесное влагосодержание косточки, %	2,0	2,4	6,6
Равновесное влагосодержание ядра, %	3,1	4,4	8,9
Равновесное влагосодержание оболочки, %	1,7	2,4	6,1
Продолжительность сушки до равновесного влагосодержания, мин	76	114	198
Приведенные удельные энергозатраты, Дж/кг	0,57	0,64	0,87
Приведенная производительность по испаряемой влаге	1	0,62	0,3

4.5. Кинетика изменения температуры плодовых косточек в процессе сушки и анализ показателей качества продукта в зависимости от плотности теплового потока ИК-облучения

Рассмотрим кинетику изменения температуры в оболочке и ядре в процессе сушки плодовых косточек. На рисунке 4.19 приведены термограммы косточек абрикоса, соответствующие кривым сушки и скорости сушки на рисунке 4.13.

Термограммы 1 соответствуют середине оболочки, термограммы 2 - центру ядра. Их анализ показывает, что в процессе сушки имеет место градиент температуры в середине косточек, причем он направлен от оболочки к ядру.

Величина этого градиента увеличивается при повышении плотности теплового потока ИК-облучения.

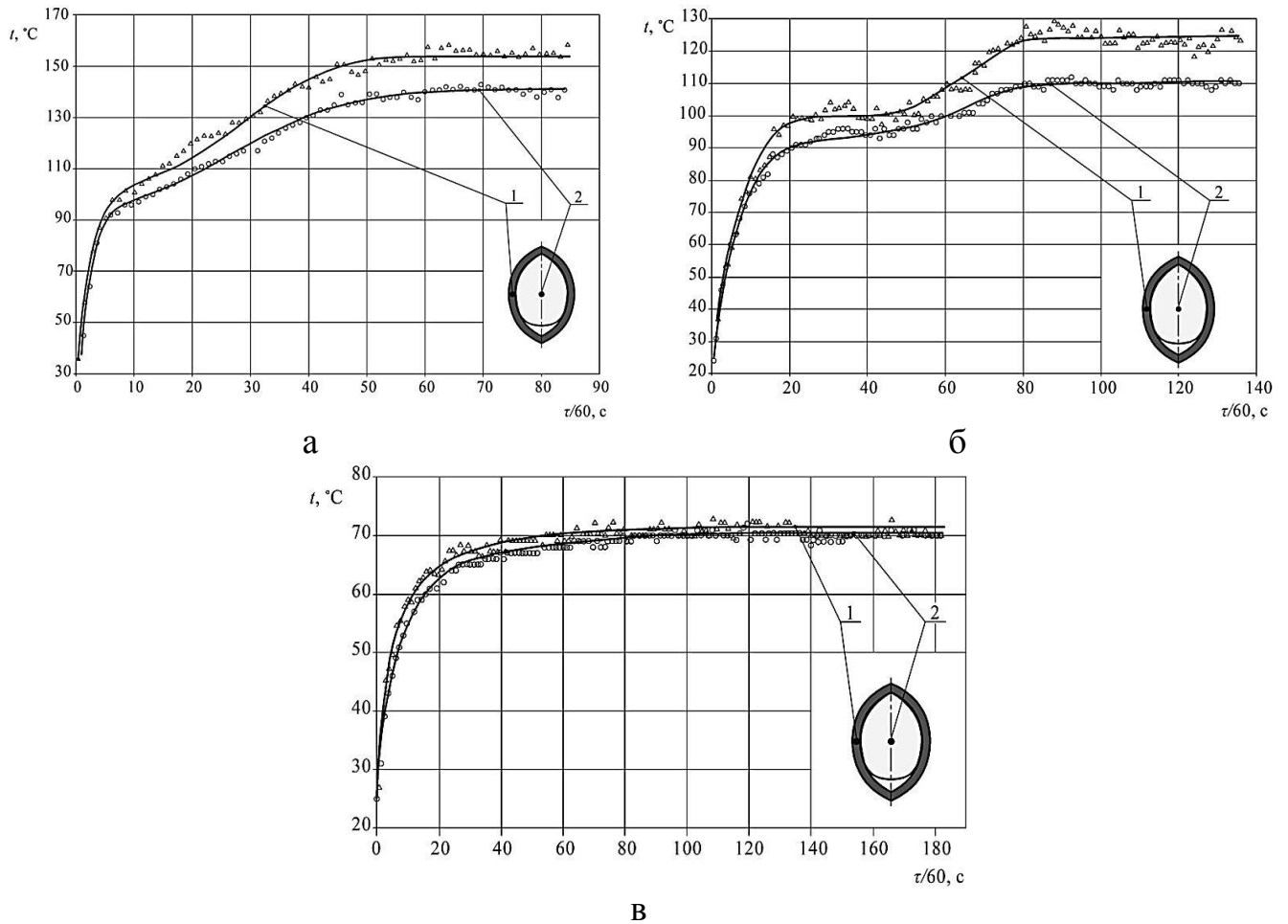


Рисунок 4.19 - Термограммы косточек абрикоса в зависимости от плотности теплового потока ИК-облучения: а - 1400 Вт/м^2 ; б - 900 Вт/м^2 ; в - 400 Вт/м^2

Так, при его значении 1400 Вт/м^2 в конце процесса температурный градиент достигает 13°C (рисунок 4.19, а), а при 400 Вт/м^2 - 1°C (рисунок 4.19, в). Величина плотности теплового потока влияет также и на форму термограмм. При значении 400 Вт/м^2 термограммы имеют два участка: крутой в начале процесса, которому соответствует интенсивное повышение температуры продукта, и плавный - соответствует практически неизменной до конца процесса температура продукта.

При других исследуемых значениях плотности теплового потока термограммы имеют более сложный характер: между крутым и пологим участками присутствует промежуточный участок, имеющий переменную

крутизну. Этому участку соответствует в основном связанная влага продукта, поэтому ее появление вызвано, на наш взгляд, прогревом продукта до температуры около 100°C , что значительно повышает долю бародиффузии в процессе миграции влаги.

На рисунке 4.20 приведены термограммы, полученные при сушке отдельно оболочек и ядер косточек абрикоса при плотности теплового потока ИК-облучения 1400 Вт/м^2 (они соответствуют кривым сушки и скорости сушки, приведенным на рисунке 4.12).

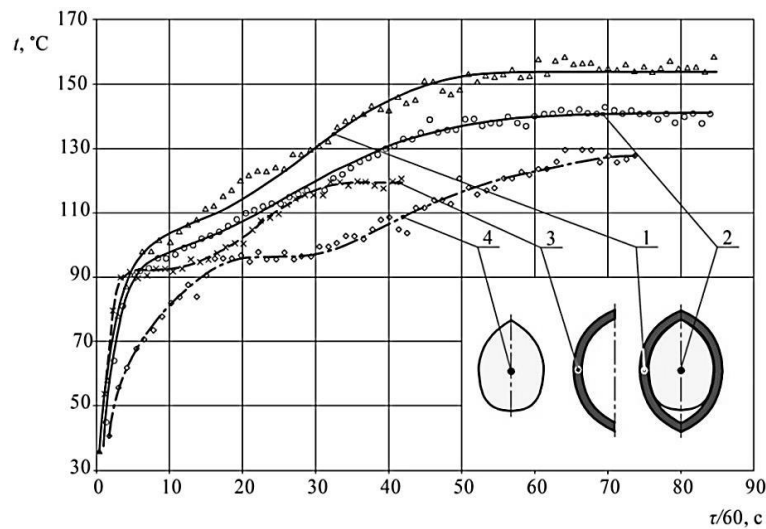


Рисунок 4.20 - Термограммы косточек абрикоса, их оболочек и ядер при плотности теплового потока ИК-облучения 1400 Вт/м^2 :

- 1 – оболочка (в составе косточки); 2 – ядро (в составе косточки);
3 – оболочка (отдельно); 4 – ядро (отдельно)

Рядом с ними для сравнения приведены термограммы, полученные при сушке целых косточек (рисунок 4.19, а).

Анализ кривых на рисунке 4.20 показывает, что при отдельной сушке оболочек и ядер продукт нагревается меньше, чем при сушке целых косточек. Так, максимальная температура нагрева ядер составляет 128°C , оболочек - 121°C , тогда как целых косточек в центре ядра - 141°C . Аналогичная тенденция наблюдается и при других значениях плотности теплового потока инфракрасного облучения. Характер термограмм для оболочек и ядер подобный аналогичным

термограммам целых косточек. Однако, есть некоторые различия. На термограмме оболочек второй пологий участок соответствует удалению свободной влаги в отличие от аналогичного участка термограммы центра ядра, наличие которого, как и в случае термограммы целых косточек, вызван прогревом продукта до температуры 100°C , и, соответственно, повышением доли бародиффузии в процессе миграции влаги.

Аналогичный характер имеют термограммы, полученные при сушке косточек вишни и черешни. Для первой они приведены на рисунке 4.21.

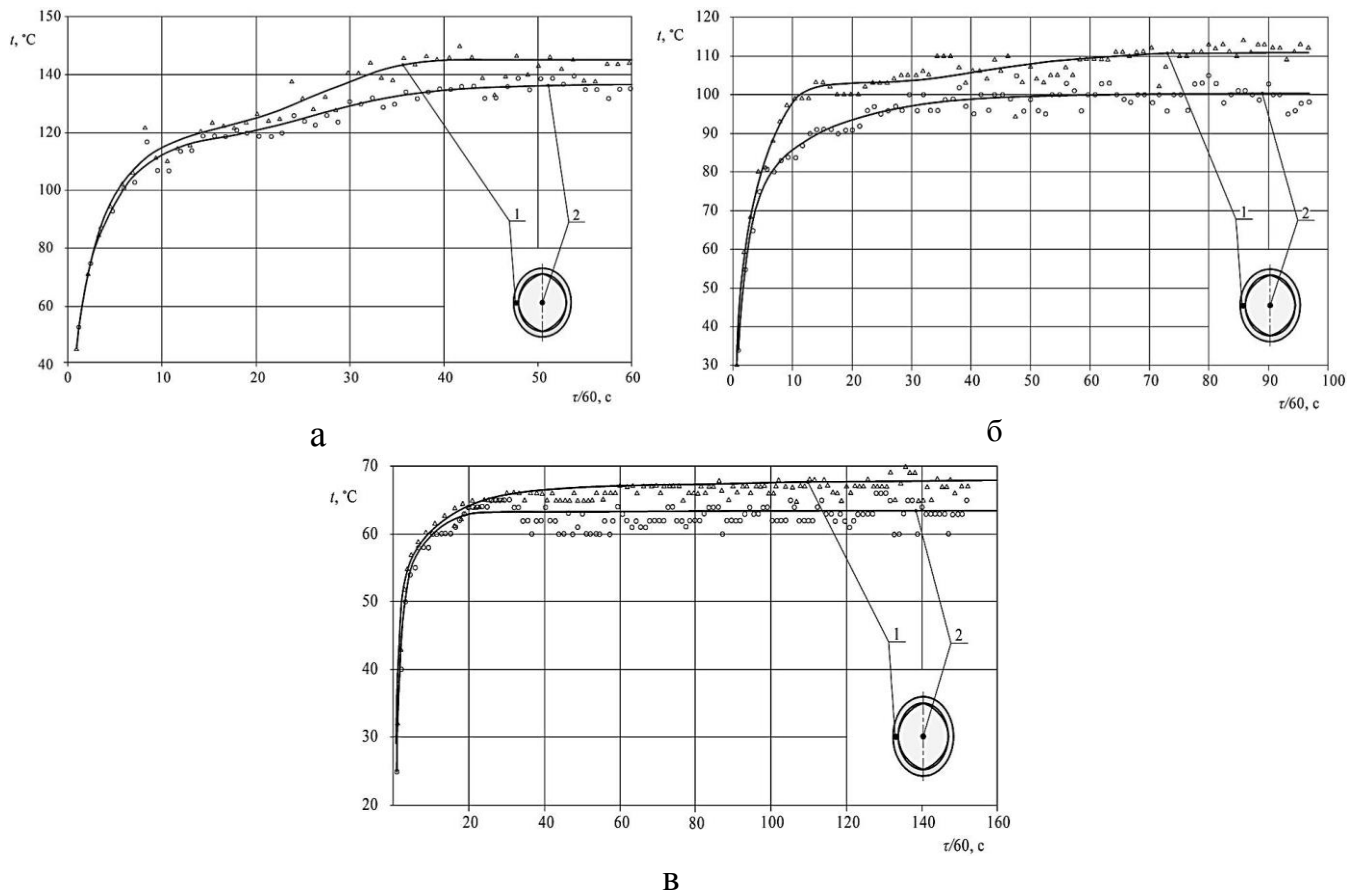


Рисунок 4.21 - Термограммы косточек вишни в зависимости от плотности теплового потока ИК-облучения: а - 1400 Вт/м^2 ; б - 900 Вт/м^2 ; в - 400 Вт/м^2

Некоторое отличие заключается в меньшем нагреве продукта и меньшем значении температурного градиента между центрами оболочки и ядра в конце процесса.

Так, например, для косточек вишни при плотности теплового потока 1400 Вт/м^2 температурный градиент составил 9°С , черешни - 7°С , тогда как для косточек абрикоса, как уже упоминалось, 13°С .

Для оценки химических преобразований в ядрах косточек в процессе сушки нами определен в соответствии с [167] один из основных показателей качества растительного масла - кислотное число. Полученные графики изменения этого показателя в процессе сушки косточек абрикоса приведены на рисунке 4.22.

Все кривые имеют одинаковую форму при изменении кислотного числа в зависимости от температуры нагрева ядер косточек наблюдаются три периода [168,169]. В первом из них происходит рост кислотного числа по мере повышения температуры ядер до $40...60^\circ\text{С}$, что обусловлено повышением активности ферментных систем, в частности, липазы, которая способствует гидролизу жиров.

Во втором периоде происходит снижение кислотного числа по мере повышении температуры ядер до $70...85^\circ\text{С}$, что обусловлено связыванием

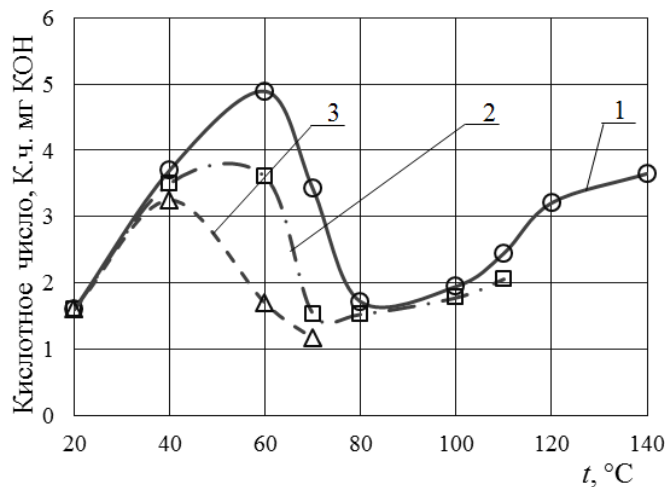


Рисунок 4.22 - Кривые изменения кислотного числа ядер косточек абрикоса от температуры при различных значениях плотности теплового потока

ИК-облучения: 1 - 1400 Вт/м^2 ; 2 - 900 Вт/м^2 ; 3 - 400 Вт/м^2

свободных жирных кислот с образованием белково-липидных комплексов. В третьем периоде происходит рост кислотного числа по мере повышения температуры ядер выше 85°С , что обусловлено термическим распадом

триглицеридов с образованием низкомолекулярных кислот. Кроме того, нагрев ядер выше 120°C приводит к их потемнению - результат карамелизация сахаров и растрескивание оболочки.

Не смотря на то, что форма кривых одинакова, имеет место смещение экстремумов кривых в сторону больших температур при повышении плотности теплового потока ИК-облучения. Это явление обусловлено, соответственно, более высоким темпом нагрева продукта. Следует отметить также, что при плотности теплового потока 400 Вт/м² на кривой изменения кислотного числа не наблюдается третьего периода, что является оптимальным с позиции качества высушенного продукта.

Таким образом, анализируя полученные показатели кислотного числа, согласно техническим условиям ГОСТ 30306-95 «Масло из плодовых косточек и орехов миндаля», при сушке плодовых косточек ИК-излучением в виброкипящем слое можно утверждать, что сушку косточек целесообразно проводить при плотностях теплового потока 400-900 Вт/м². Это позволяет достичь высокой интенсивности протекания процесса с сохранением качества масла, содержащегося в ядрах косточек.

Конечное значение кислотного числа находится в прямо пропорциональной зависимости от среднеинтегральной температуры продукта при сушке, что хорошо видно из рисунка 4.23.

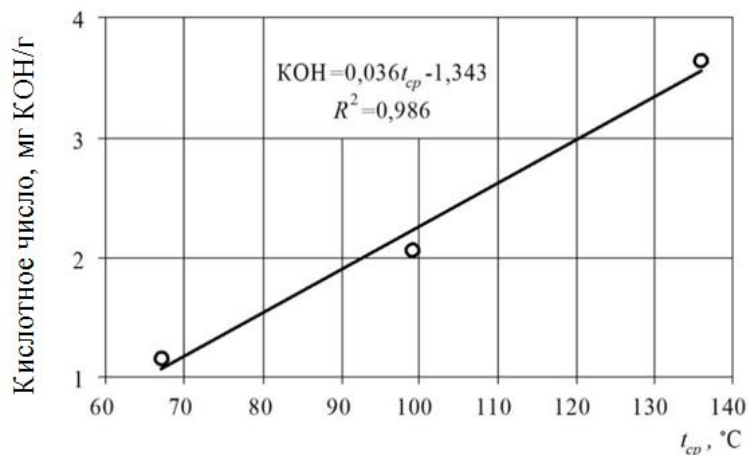


Рисунок 4.23 - Зависимость конечного значения кислотного числа ядер косточек абрикоса от его среднеинтегральной температуры в процессе сушки

Подводя итог анализу изменения температуры в процессе сушки косточек плодов и их составляющих обратим внимание также на среднеинтегральную и максимальную температуру в процессе сушки отдельно ядер абрикоса (они определяются по термограмме), которые составили соответственно 104° и 128°С.

Это существенно ниже соответствующих значений температуры центра ядра при сушке целых косточек (136° и 141°С). Поэтому, с точки зрения качества продукта, можно утверждать, что целесообразнее сушить целые косточки, а не оболочки и ядра отдельно.

Данные по кинетике нагрева в процессе сушки исследуемых плодовых косточек в зависимости от плотности теплового потока ИК- облучения сведены в таблицу 4.17.

Таблица 4.17 - Данные по кинетике нагрева плодовых косточек в процессе сушки

Параметры	Плотность теплового потока, Вт/м ²		
	1400	900	400
Косточки абрикоса			
Среднеинтегральная температура центра ядра, °С	136	99	67
Максимальная температура центра ядра, °С	141	110	70
Кислотное число, мг КОН/г	3,65	2,06	1,17
Косточки вишни			
Среднеинтегральная температура центра ядра, °С	125	96	63
Максимальная температура центра ядра, °С	135	100	64
Кислотное число, мг КОН/г	3,98	2,38	1,86
Косточки черешни			
Среднеинтегральная температура центра ядра, °С	119	105	54
Максимальная температура центра ядра, °С	137	109	56
Кислотное число, мг КОН/г	3,92	2,27	1,79

4.6. Количественные закономерности процесса сушки плодовых косточек

Процесс сушки отличается большой сложностью и представляет собой целый комплекс тесно связанных друг с другом явлений, протекающих в материале и вблизи его поверхности.

Характер процесса сушки, отражаемый кривыми сушки, скорости сушки и нагрева, в основном, определяется физико-химическими и структурно-механическими свойствами материала, от которых зависят формы связи влаги с ними, диффузионной природой явления, а также методом энергоподвода. Многообразие факторов и их взаимная связь весьма затрудняет получение аналитических зависимостей кинетики сушки конкретного материала. Поэтому, при описании сушки обычно используются эмпирические зависимости. Более прогрессивным является создание приближенных методов расчета кинетики сушки, основанных на изучении общих закономерностей процесса, что сближает теорию и практику сушки [58].

Исследование количественных закономерностей процесса обезвоживания плодовых косточек осуществляли с помощью основного уравнения кинетики сушки, которое позволяет рассчитать тепловой поток, поглощаемый продуктом в процессе сушки [58]:

$$q = \rho_0 R_v r_g \frac{du}{d\tau} (1 + Rb), \quad (4.1)$$

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

R_v – отношение объема частиц продукта к площади испарения;

r_g – удельная теплота испарения влаги продукта, кДж/кг;

$du/d\tau$ – скорость сушки, %/с;

Rb – число Ребиндера.

В уравнении (4.1) ρ_0 и R_v являются практически постоянными величинами. Остальные величины изменяются в процессе сушки и являются функциями влагосодержания продукта и его температуры. Поэтому расчет теплового потока проведем в три этапа.

Построение обобщенных кривых скорости сушки

Методом приведенной скорости сушки, на основе анализа данных экспериментальных исследований процесса сушки плодовых косточек, установлена связь между скоростью сушки и влажностью материала. Для

моделирования кривых скорости сушки плодовых косточек во втором периоде (рисунки 4.15-4.17), исходя из их достаточной сложной формы, воспользуемся уравнением К. Филоненко [98]:

$$\frac{du/d\tau}{N} = \frac{(u - u_p)^n}{A + B(u - u_p)^n}, \quad (4.2)$$

где: N – скорость сушки в первом периоде;

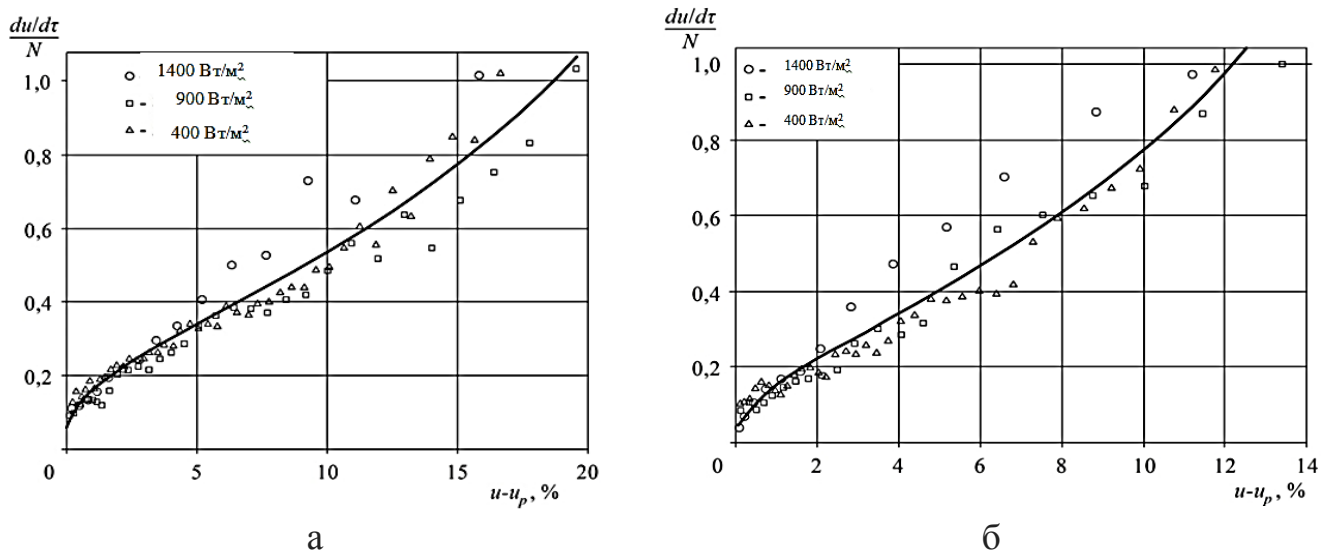
n – константа уравнения, которая определяется видом продукта;

A и B – константы уравнения, которые зависят от размеров продукта, удельной нагрузки и потенциала сушки (определяются из конкретных условий эксперимента).

Для каждого исследуемого вида плодовых косточек нами рассчитаны уравнения обобщенных кривых скорости сушки в координатах $(u - u_p) - (du/d\tau)/N$ по данным, приведенным на рисунках 4.13-4.15.

Соответствующие вычисления проведены нами в математическом пакете Mathcad с помощью метода наименьших квадратов. Программа вычисления коэффициентов регрессии уравнения обобщенной кривой скорости сушки косточек абрикоса приведена в приложении А.

Полученные кривые изображены на рисунке 4.24.



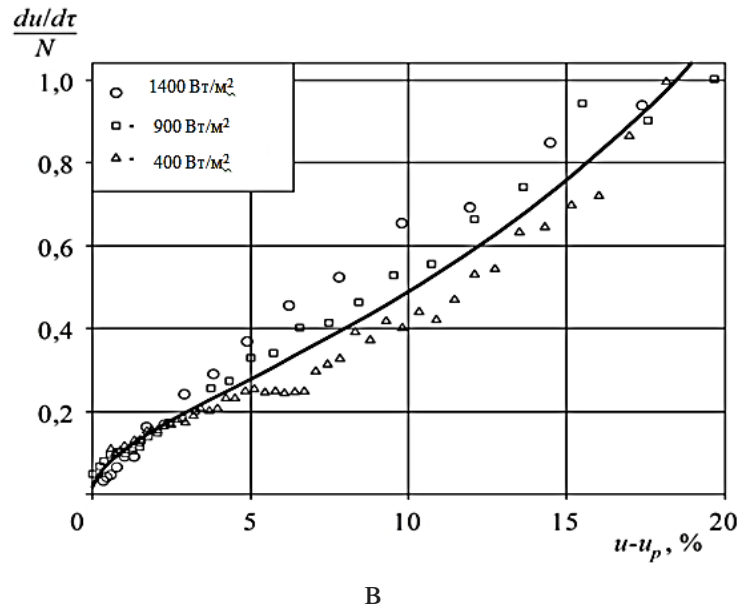


Рисунок 4.24 – Обобщенная кривая скорости сушки плодовых косточек:
а – абрикоса; б – вишни; в - черешни

Значения коэффициентов регрессии и показатели статистической оценки соответствующих уравнений приведены в таблице 4.18.

Таблица 4.18 - Результаты вычислений коэффициентов регрессии уравнений обобщенных кривых скорости сушки плодовых косточек

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

Таким образом, для второго периода сушки получены следующие уравнения обобщенных кривых скорости сушки:

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

$$\begin{aligned} & \text{- для косточек вишни} \quad \frac{du/d\tau}{N} = \frac{(u - u_p)^{0,365}}{9,59 - 2,85(u - u_p)^{0,365}}; \\ & \text{- для косточек черешни} \quad \frac{du/d\tau}{N} = \frac{(u - u_p)^{0,403}}{12,22 - 2,78(u - u_p)^{0,403}}. \end{aligned}$$

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

Для вычисления продолжительности сушки до заданного конечного влагосодержания u_k воспользуемся выражением, которое К. Филоненко получил в результате интегрирования уравнения (4.2):

$$\tau = \frac{1}{N} \left[(u_0 - u'_{кр}) + \frac{A}{1-n} \left[(u'_{кр} - u_p)^{1-n} - (u_k - u_p)^{1-n} \right] + B(u'_{кр} - u_k) \right], \quad (4.3)$$

где: u_0 – начальное влагосодержание, %;

$u'_{кр}$ – приведенное первое критическое влагосодержание, %;

u_p – равновесное влагосодержание, %.

Для определения приведенного первого критического влагосодержания левая часть уравнения (4.2) была приравнена нами к 1 и полученное уравнение с помощью логарифмирования преобразовано к следующему виду:

$$u'_{кр} = e^{\frac{\ln \frac{A}{1-B}}{n}} + u_p. \quad (4.4)$$

В таблице 4.19 представлены полученные по (4.4) значения приведенного первого критического влагосодержания.

Таблица 4.19 - Приведенное критическое влагосодержание

Вид косточек	Плотность теплового потока, Вт/м ²		
	1400	900	400
Косточки абрикоса	23,0	23,9	27,9
Косточки вишни	14,3	15,2	18,2
Косточки черешни	20,4	20,8	25,0

Вычисление удельной теплоты испарения влаги из продукта

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

Для определения энергии связи влаги с продуктом воспользуемся методикой, приведенной в [170]. По этой методике энергия L , которую необходимо потратить для отрыва от продукта 1 моль воды, определяется уравнением, полученным П.А. Ребиндером из основных термодинамических отношений:

$$L = RT \ln \varphi_n, \quad (4.5)$$

где: $R=8,31$ Дж/(моль·К) – газовая постоянная;

T – абсолютная температура сушильного агента (воздуха);

φ_n – относительная влажность воздуха, которая соответствует влажности продукта в состоянии равновесия.

Зависимость относительной влажности воздуха от влажности продукта W_p определяется из изотермы десорбции. Для косточек абрикоса при температуре воздуха $T=293^\circ$ К (при этой температуре проводились наши экспериментальные исследования по сушке косточек абрикоса) изотерма десорбции определяется следующим уравнением [170]:

$$W_p = \begin{cases} \frac{30 + \varphi_n}{7,21} \text{ при } \varphi_n < 45 \%, \\ \frac{6(\varphi_n - 45)}{48 - (\varphi_n - 45)} + 10,4 \text{ при } \varphi_n > 45 \%. \end{cases} \quad (4.6)$$

С учетом (4.6) уравнение (4.5) в пересчете на 1 кг воды принимает вид:

$$L = \begin{cases} RT \ln \left(\frac{100}{7,21W_p - 30} \right) \cdot \frac{1000}{18} & \text{при } W_p < 10,4\%, \\ RT \ln \left[\frac{100}{45 + \frac{48(W_p - 10,4)}{(W_p - 10,4) + 6}} \right] \cdot \frac{1000}{18} & \text{при } W_p > 10,4\%. \end{cases} \quad (4.7)$$

Изменение удельной теплоты испарения влаги, которая равна сумме теплоты парообразования свободной влаги (2240 кДж/кг) и энергии связи влаги с продуктом (4.7), представлено на рисунке 4.25 как функция влагосодержания продукта.

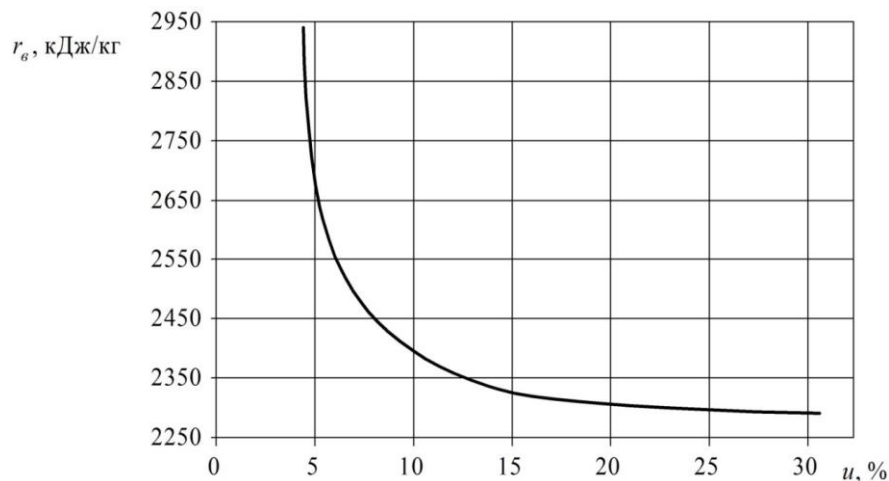


Рисунок 4.25 - График зависимости удельной теплоты испарения влаги из косточек абрикоса от влагосодержания

Построение графиков изменения числа Ребиндера в процессе сушке

Установление взаимосвязи между теплообменом и массообменом возможно при помощи основного критерия кинетики процесса сушки – критерия Ребиндера, который зависит от температурного коэффициента сушки (основная характеристика кинетики сушки), удельной теплоемкости влажного тела и удельной теплоты испарения влаги.

Число Ребиндера определяли по формуле [58]:

$$Rb = \frac{c_n}{r_e} \cdot b, \quad (4.8)$$

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

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

Для определения температурного коэффициента сушки в координатах t_{cp} – u были построены температурные кривые, приведенные на рисунке 4.26.

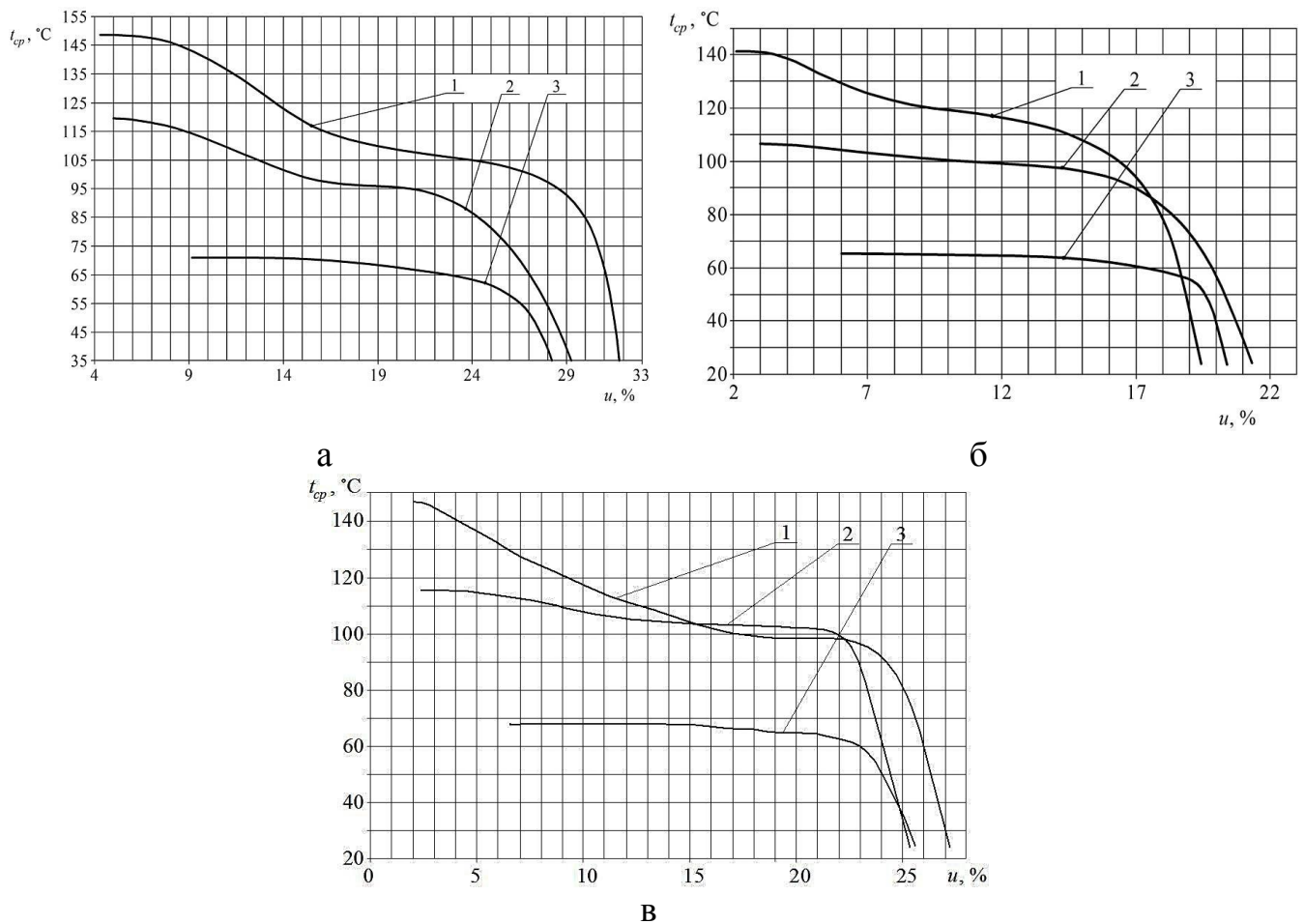


Рисунок 4.26 - Температурные кривые косточек абрикоса (а), вишни (б), черешни (в) при разных значениях плотности теплового потока

ИК- облучения: 1 - 1400 Вт/м²; 2 - 900 Вт/м²; 3 - 400 Вт/м²

Среднеобъёмная температура продукта t_{cp} определялась при этом по термограммам на рисунке 4.19 в предположении параболического распределения температуры по сечению косточки и ее сферической формы [136]:

$$t_{cp} = t_u + \frac{3}{5}(t_u - t_{об}), \quad (4.9)$$

где: t_u – температура центра ядра, °С;

$t_{об}$ – температура центра оболочки, °С.

С помощью графического дифференцирования построенных температурных кривых вычислялись значения температурного коэффициента для различных значений влагосодержания продукта.

Графики изменения удельной теплоемкости косточек абрикоса в зависимости от текущего влагосодержания, которые построены согласно методике 2.1.2 с учетом массовых долей составляющих продукта (их значения приняты из [137]), приведены на рисунке 4.27.

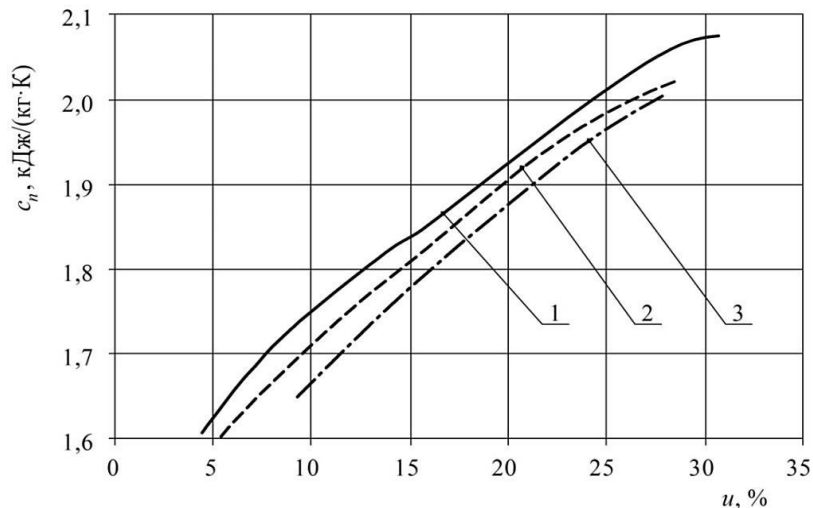


Рисунок 4.27 - Изменение удельной теплоемкости косточек абрикоса в процессе сушки при различных значениях плотности теплового потока

ИК- облучения: 1 - 1400 Вт/м²; 2 - 900 Вт/м²; 3- 400 Вт/м²

На основании графиков, приведенных на рисунках 4.26 и 4.27, а также с помощью графического дифференцирования температурных кривых на рисунке 4.28 построены кривые изменения числа Ребиндера косточек абрикоса в процессе сушки.

Характер кривых для всех опытов одинаков - в начале процесса сушки число Ребиндера резко уменьшается от начального влагосодержания до

влажностности 20...25%. Этот участок отражает период максимального расхода теплоты на нагрев продукта. Далее число Ребиндера медленно уменьшается к концу процесса. Для кривых 1 и 2 при влажностности около 15% имеет место локальный максимум, который соответствует началу второго участка интенсивного повышения температуры продукта на соответствующих температурных кривых (рисунок 4.19). Очевидно, крутизна этого экстремума увеличивается с повышением плотности теплового потока ИК- облучения.

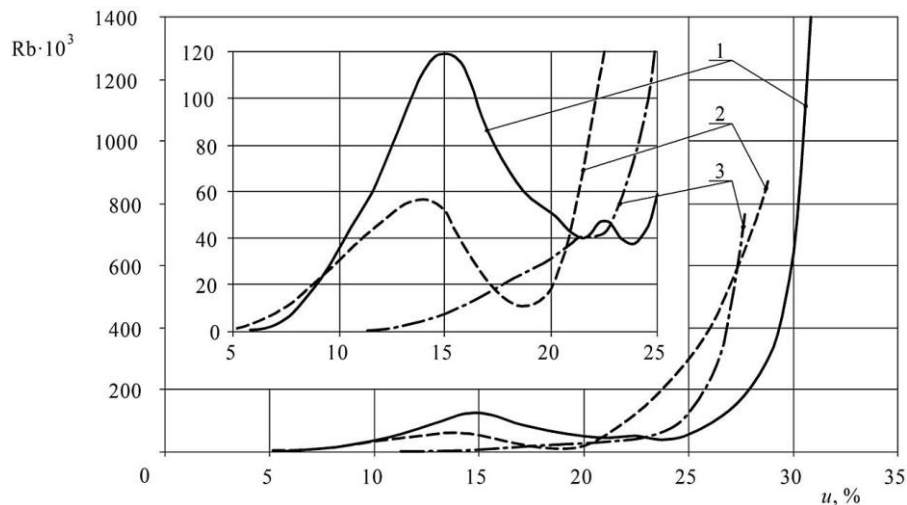


Рисунок 4. 28 - Изменение числа Ребиндера косточек абрикоса в процессе сушки при различных значениях плотности теплового потока ИК-облучения: 1 - 1400 Вт/м²; 2 - 900 Вт/м²; 3 - 400 Вт/м²

Построение кривых изменения теплового потока, поглощаемого в процессе сушки

Результаты, полученные ранее позволили, используя уравнение (4.12) рассчитать тепловой поток, поглощаемый косточками абрикоса в процессе сушки.

На рисунке 4.29 приведены графики изменения этой величины в зависимости от влажностности продукта при различных значениях плотности теплового потока ИК- облучения. Все кривые имеют похожую форму - участок резкого уменьшения теплового потока в начале процесса, соответствует интенсивному прогреву продукта, который сменяется участком плавного

уменьшения теплового потока до равновесного влагосодержания. Для плотности теплового потока 1400 Вт/м^2 имеет место промежуточный горизонтальный участок, который отвечает периоду постоянной скорости сушки.

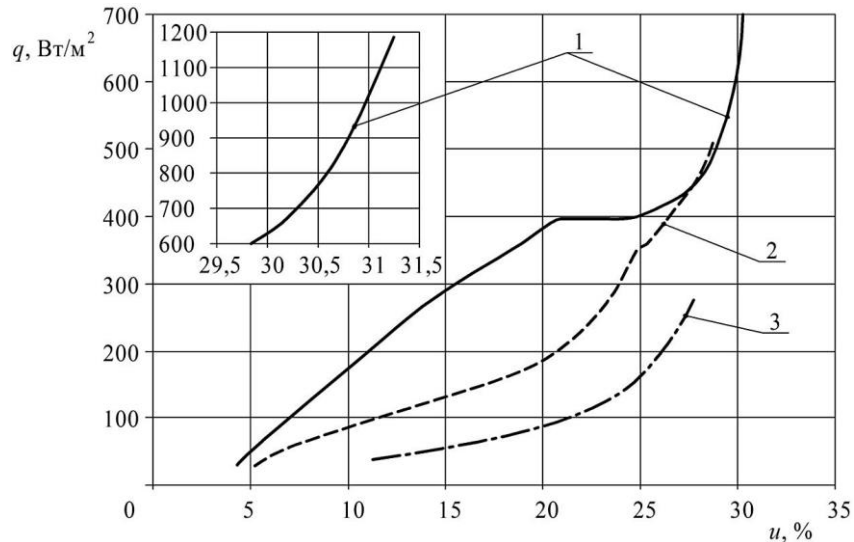


Рисунок 4.29 - Изменение теплового потока, поглощаемого косточками абрикоса в процессе сушки, в зависимости от плотности теплового потока ИК-облучения: 1 - 1400 Вт/м^2 ; 2 - 900 Вт/м^2 ; 3 - 400 Вт/м^2

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

4.7. Выводы по разделу

1. Исследованы теплофизические характеристики плодовых косточек. Получены их эмпирические зависимости в заданном диапазоне влагосодержаний и температур.

2. Впервые для плодовых косточек и их ядер определен ряд физико-геометрических характеристик и осуществлен их статистический анализ.

Получены уравнения регрессии в виде мультипликативных моделей описывающие связь между линейными размерами косточек и ядер и их объемом.

По всем полученным вариационным кривым размеров и массы плодовых косточек можно сделать выводы о большей склонности к нормальному закону распределения характеристик:

- косточек абрикоса - длины, ширины и массы, их ядер - длины;
- косточек вишни - толщины, ширины и массы, их ядер - толщины и массы;
- косточек черешни - толщины и массы, их ядер - толщины.

Полученные зависимости, описывают связь между линейными размерами плодовых косточек и ядер и их объемом и сделан их гранулометрический анализ.

Результаты, которые получены, создают предпосылки для моделирования процесса тепло,- массообмена, использование их в разработке промышленного оборудования для сушки плодовых косточек.

3. Исследования по воздействию параметров вибрации на свойства слоя плодовых косточек выявили целесообразные параметры вибрации при которых происходит соединение интенсивного движения плодовых косточек с созданием и соблюдением постоянного их переворота ($A = 3\text{мм}$, ускорение вибрации $45\text{...}55\text{ м/с}^2$). При выбранных параметрах вибрации происходит интенсификация процесса сушки за счет равномерного воздействия ИК-лучей на весь объем продукта.

4. Исследовано влияние плотности теплового потока ИК-излучения на кинетику, качественные показатели и энергозатраты при сушке косточек абрикоса, вишни и черешни (использован диапазон плотности теплового потока $400\text{...}1400\text{ Вт/м}^2$).

5. Анализ плотности теплового потока на показатели эффективности процесса сушки показал одинаковую тенденцию для всех исследованных плодовых косточек: снижение энергозатрат, повышение производительности и уменьшение продолжительности сушки до равновесного влагосодержания при увеличении плотности теплового потока ИК- излучения.

6. Подтверждена эффективность использования комбинированного процесса сушки – ИК-излучения и вибрационного воздействия с целью получения качественных показателей сушки плодовых косточек и их составляющих. Установлено, что процесс сушки исследуемых плодовых косточек целесообразно проводить при плотности теплового потока ИК-излучения в диапазоне 400...900 Вт/м², что позволяет достичь высокой интенсивности процесса с сохранением качества масла, содержащегося в ядрах косточек.

7. Впервые исследованы количественные закономерности процесса сушки плодовых косточек на основе анализа данных экспериментальных исследований. Получены уравнения обобщенных кривых скорости сушки, описывающие конвективный тепло- и массообмен при взаимодействии теплового потока ИК-излучения.

8. Получены значения массообменных коэффициентов и критических влагосодержаний, характеризующих перемещение влаги внутри плодовых косточек, позволяющие определить интенсивность процесса сушки.

9. Впервые установлена взаимосвязь между теплообменом и массообменом при помощи основного критерия кинетики процесса сушки - критерия Ребиндера. Для этого определены значения изменения удельной теплоемкости, удельной теплоты испарения, температурного коэффициента сушки плодовых косточек в зависимости от текущего влагосодержания.

Материалы главы опубликованы в работах [90,155,171-185].

РАЗДЕЛ 5

РАЗРАБОТКА СПОСОБА И ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СУШКИ ПЛОДОВЫХ КОСТОЧЕК

5.1. Способ сушки плодовых косточек

В предлагаемом способе сушки применяется вибротранспортирование плодовых косточек с подбрасыванием - периодическим отрывом от желоба с переориентацией (поворотом другой стороной) и прерывистое осциллирующее облучение - при прекращении подачи ИК-лучей температура на нижней поверхности косточек снижается вследствие продолжения интенсивного испарения, а температурный градиент меняет свое направление, поскольку температура в середине косточек больше чем на наружной поверхности и влага начинает перемещаться из центральных слоев к поверхностным под действием градиентов температуры и влагосодержания.

На рисунке 5.1 изображена принципиальная схема предлагаемого способа сушки плодовых косточек.

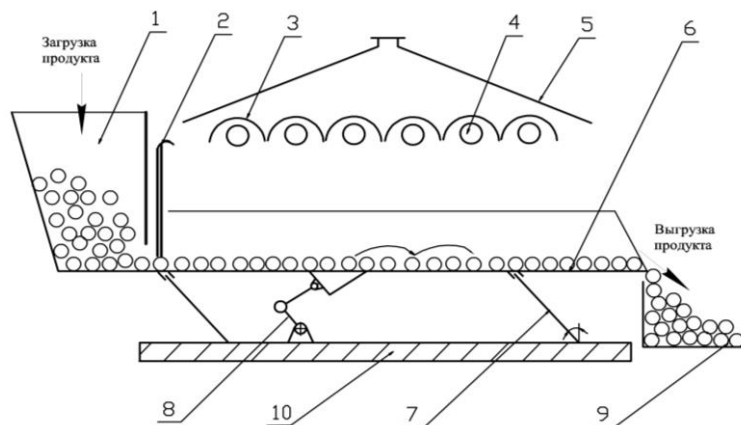


Рисунок 5.1 - Схема способа сушки плодовых косточек для промышленной реализации

Способ реализуется следующим образом. Предварительно очищенные от мякоти и избыточной поверхностной влаги плодовые косточки загружают на

рабочий орган одномассного вибрационного конвейера 6 через загрузочный бункер-питатель 1 с шибером 2. Рабочий орган конвейера 6 под действием плоских рессор 7, установленных под углом β и жестко закрепленных в основании 10 совершает возвратно- поступательные (колебательные) движения, которые передаются ему при помощи кривошипно-шатунного или любого другого вибрационного привода 8; при этом плодовые косточки на поверхности конвейера 6 перемещаются вдоль блоков ИК-излучателей 4 с отражателями лучей 3, осуществляя импульсные движения с подбрасыванием под углом около 30° и переворотом при этом на 180° . Такой режим движения обеспечивает равномерную обработку плодовых косточек и ускорение удаления влаги. Скорость виброперемещения - около 0,05 м/с. Высушенные плодовые косточки выгружаются в лоток 9. Водяной пар, образующийся при сушке косточек, удаляется через вентиляционный короб 5.

Предложенный способ сушки в виброкипящем слое имеет следующие преимущества по сравнению с конвективной сушкой без вибрационного перемещения: позволяет более равномерно высушить продукт посредством воздействия вибрации; позволяет снизить энергозатраты на процесс сушки; позволяет повысить качество готового продукта за счет равномерной тепловой обработки, которая обеспечивается характерным движением продукта, в результате проведения процесса импульсами ИК- нагрева в сочетании с периодами «отдыха».

На описанный способ, получен декларационный патент Украины на полезную модель [186], приложение Б.

5.2. Конструкция вертикальной вибросушилки с ИК-излучателями для промышленной реализации

Целью создания вибросушилки, главный вид которой представлен на рисунке 5.2, является интенсификация процесса за счет применения виброкипящего слоя и инфракрасного нагрева.

Сушилка [188] представляет собой конструкцию, состоящую из загрузочного бункера 2 с шибером 1 для регулирования количества продукта, поступающего в рабочую камеру, ограждения с теплоизоляцией 3, лотка спирального 4 смонтированного на колонне-трубе конической 7, ИК-излучателей (ТЭНов) 5, отражателей 6, патрубка для удаления влаги 8, разгрузочного лотка 9, смотрового люка 10, пружин витых-амортизаторов 12, подставки 13 и стойки для крепления кожуха 14.

Привод 11 состоит из двух самосинхронизированных дебалансных вибровозбудителей со встроенными электродвигателями, которые размещены с двух сторон от вертикальной оси вибрационного подъемника. Они сообщают колонне движение, которое состоит из винтовых крутильных колебаний - вокруг оси вертикальной колонны и вдоль ее оси. Вибраторы прикреплены к колонне таким образом, что колебания их происходят в плоскости, направленной под углом около 20° к направлению транспортировки груза.

Работает сушилка следующим образом. Включаются блоки ИК-излучателей 5 и установка разогревается до рабочего режима. Затем включается привод 11, который сообщает конической колонне 7 с закрепленным на ней грузонесущим органом 4 сложное колебательное движение. Предварительно очищенные от мякоти и избыточной поверхностной влаги плодовые косточки через загрузочный бункер 2 с шибером 1 попадают равномерно по ширине на нижний лоток. Косточки транспортируются по поверхности лотка в спиральном направлении вверх. При этом продукт высушивается ИК-излучателями 5 в соответствии с технологическим режимом. Оператор органолептически оценивает качество сушки продукта и может в процессе эксплуатации увеличивать или уменьшать мощность нагрева. Готовый продукт ссыпается в разгрузочный лоток 9. Водяные пары, образующиеся при сушке косточек, удаляются через патрубок для удаления влаги 8 в вентиляционный зонт 15.

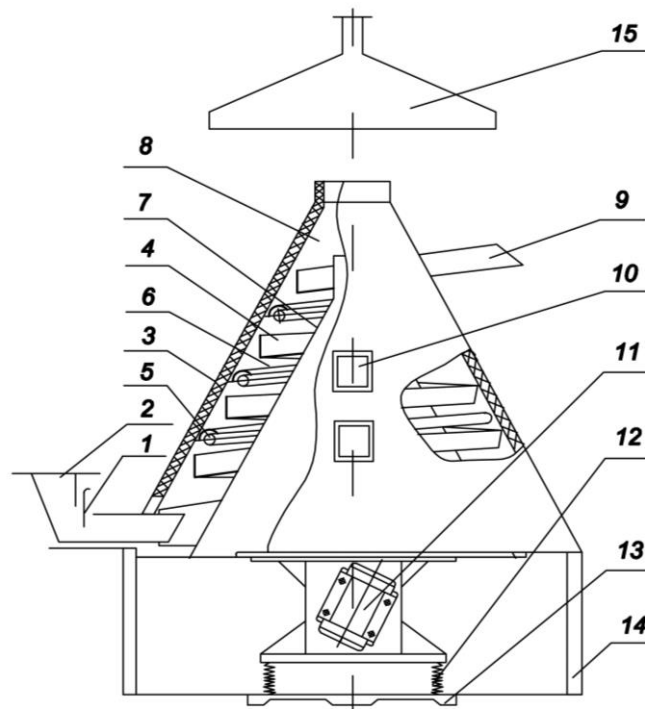


Рисунок 5.2 - Вертикальная вибросушилка с ИК-излучением

- 1- шибер; 2- загрузочный бункер; 3- ограждения с теплоизоляцией - кожух разъемный; 4- лоток спиральный; 5- ИК-излучатель (ТЭН); 6- отражатель; 7- труба коническая; 8- патрубок удаления влаги; 9- разгрузочный лоток; 10- смотровой люк; 11- привод мотор-вибратор; 12- пружина витая-амортизатор; 13- подставка; 14- стойка крепления кожуха; 15- вентиляционный зонт

Скорость транспортировки продукта и, соответственно, время его пребывания в сушилке регулируется параметрами вибрации (амплитудой, частотой). Угол наклона вибrolотка и направление колебаний, также влияют на скорость транспортировки и учитываются при конструировании сушилки для конкретного дискретного материала.

Параметры вибрации выбирают таким образом, чтобы материал передвигался по лотку в режиме непрерывного подбрасывания, когда частицы его касаются днища только в отдельные моменты времени, находясь, остальное время в полете. Такой режим приводит к возникновению в слое частиц (косточек) насосного эффекта.

Техническая характеристика вертикальной вибросушилки с ИК-излучением: производительность по сырью (косточкам) – 202 кг/ч; влагосодержание продукта на выходе – не более 10%; удельный расход электроэнергии – 0,47 кДж/кг исп.вл.; ускорение вибрации – 43...50 м/с²; амплитуда колебаний лотка – 2...5 мм; продолжительность сушки 0,83...2,1 ч; количество нагревателей 29 шт; - мощность инфракрасных излучателей – 29,25 кВт; габаритные размеры – длина- 4,87 м, ширина – 1,8 м, высота – 2,64 м.

Преимущество вертикальных аппаратов - компактность, что позволяет эффективно совмещать процесс сушки с вертикальной транспортировкой дискретного материала.

Если вибрационный подъемник используется для технологической цели, в том числе для сушки, теплообмена и т.д., то угол подъема рабочего органа выбирают в зависимости от определенной (необходимой) продолжительности пребывания продукта на грузонесущей органе.

Нами предлагается широко распространенный в таких устройствах привод, состоящий из двух самосинхронизированных дебалансных вибровозбудителей со встроенными электродвигателями, которые размещены с двух сторон от вертикальной оси вибрационного подъемника. Могут быть применены также инерционные и электромагнитные вибраторы. Установка вибровозбудителя с размещением их осей под углом к вертикали обеспечивает необходимые винтовые колебания грузонесущего органа.

Применение нами в сушилке вибрационного подъемника обусловлено следующими преимуществами по сравнению с другими:

- эксплуатационная надежность в связи с отсутствием цепных, винтовых, ленточных, тяговых органов; высокая степень герметичности и, соответственно, отсутствие пылеобразования; возможность совмещения процесса вертикальной транспортировки сыпучих грузов с технологической обработкой; сохранение производственных площадей благодаря совмещению технологических и транспортирующих операций в одном агрегате; благоприятные условия для комплексной механизации и автоматизации производственных процессов.

Амплитуда перемещения отдельных точек грузонесущего органа разная и пропорциональна расстоянию их от оси машины.

В действующих конструкциях с гармоническими колебаниями достигается скорость транспортировки до 15...20 м/мин.

5.3. Конструкция протирочно-сушильного аппарата

Основная задача разработки заключалась в получении аппарата, который позволит отделить косточку от мякоти плодов, не повредив структуру косточки, а также получить протертую массу отделенной мякоти, при этом обеспечить предварительную сушку косточки и мякоти.

Протирочно-сушильный аппарат, который предлагается, изображен на рисунке 5.3 [189].

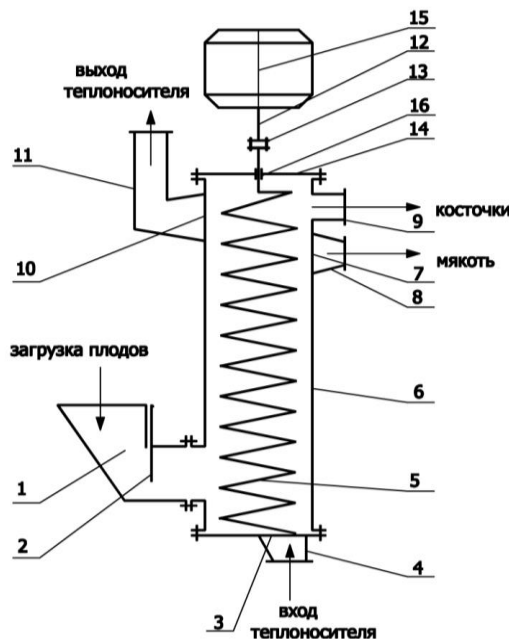


Рисунок 5.3 - Протирочно-сушильный аппарат

- 1- бункер для загрузки; 2- заслонка; 3,7,10- решетки; 4,8,9,11- патрубки;
 5- гибкий шнековый транспортер; 6- корпус; 12- приводной вал;
 13-муфта; 14- крышка; 15- мотор-редуктор; 16- подшипниковый узел

Корпус аппарата 6 представляет собой трубу, внутри которой находится

рабочий орган - гибкий шнековый транспортер 5. На боковой поверхности корпуса в его нижней части находится бункер для загрузки косточковых плодов 1. Бункер имеет регулируемую заслонку 2 для дозирования подаваемого продукта. Для осуществления процесса очистки и подсушивания в рабочую камеру через патрубок 4 и решетку 3 подается горячий воздух, который одновременно транспортирует косточковые плоды по криволинейной траектории шнекового транспортера.

Отработанный воздух выходит через решетку 10 и патрубок 11 в циклон, а очищенные косточки и отделенная мякоть, соответственно, через патрубок 9 и патрубок 8 с решеткой 7. Рабочий орган приводится в действие от мотор-редуктора 15 через приводной вал 12, муфту 13 и подшипниковый узел 16. Привод аппарата смонтирован на верхней крышке 14.

Работает протирочно-сушильный аппарат следующим образом. Косточковые плоды через бункер для загрузки 1, который имеет регулируемую заслонку 2, поступают в рабочую камеру 6, где под влиянием вращения гибкого шнекового транспортера 5 (изготовленного в виде спирали из частично сплюсненной проволоки из высокопрочной устойчивой к коррозионному воздействию нержавеющей стали) и горячего теплоносителя, который подается снизу через патрубок 4 и решетку 3, поднимаются по спиральной траектории, благодаря которой они отбрасываются на внешнюю стенку канала. При этом происходит столкновение плодов друг с другом и со стенкой, вследствие чего уменьшается скорость их движения и увеличивается концентрация газовой смеси, что еще более усиливает сложность движения. Суммарная относительная скорость продукта приближается к скорости теплоносителя.

Таким образом, указанные факторы обуславливают интенсивное протекание процессов тепло-, и массообмена, увеличивая поверхность контакта фаз, что исключает возможность налипания отделенной мякоти на стенки аппарата.

Благодаря центробежной силе, возникающей при вращении рабочего органа и действующего потока теплоносителя по спиральной траектории, очищенные косточки попадают через патрубок 9 в подставленную тару, а отделенная мякоть

через решетку 7 и патрубок 8 в циклон. Отработанный теплоноситель через решетку 10 и патрубок 11 также удаляется в циклон.

Простота конструкции, снижает ее металлоемкость, упрощает вопросы монтажа, эксплуатации аппарата и дает возможность работы как в вертикальном и наклонном положениях (от 90° до $30...45^\circ$), так и при любом произвольном изгибе сушильной камеры и рабочего органа в пространстве.

5.4. Конструкция промышленной вибрационной радиационной сушилки

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования легли в основу создания конструкции промышленной сушилки непрерывного действия [183]. Схема сушилки изображена на рисунке 5.4 (главный вид) и рисунке 5.5 (сечение).

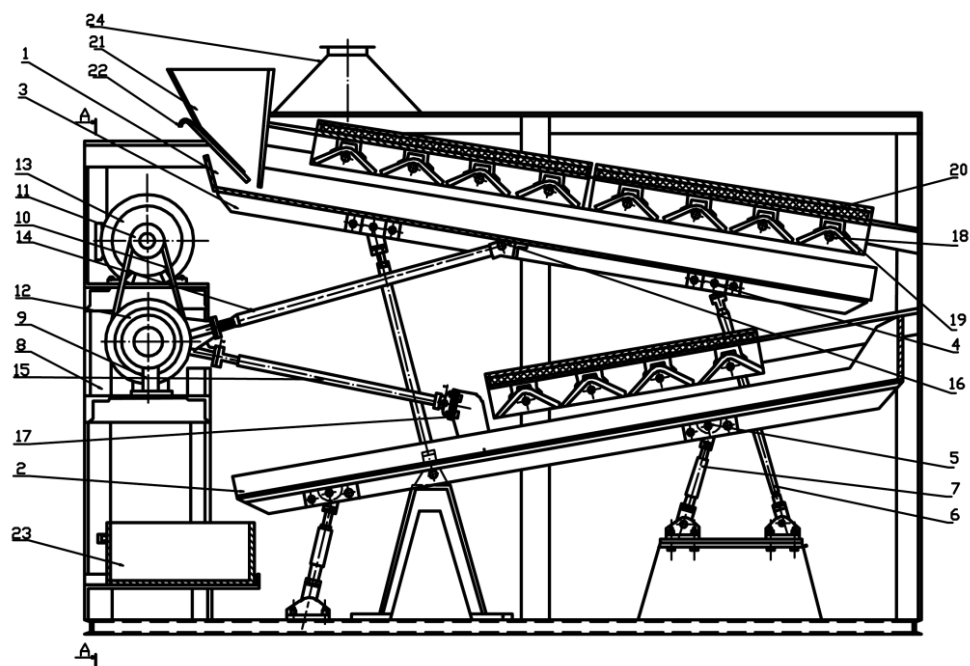


Рисунок 5.4 - Схема промышленной вибрационной радиационной сушилки
(главный вид)

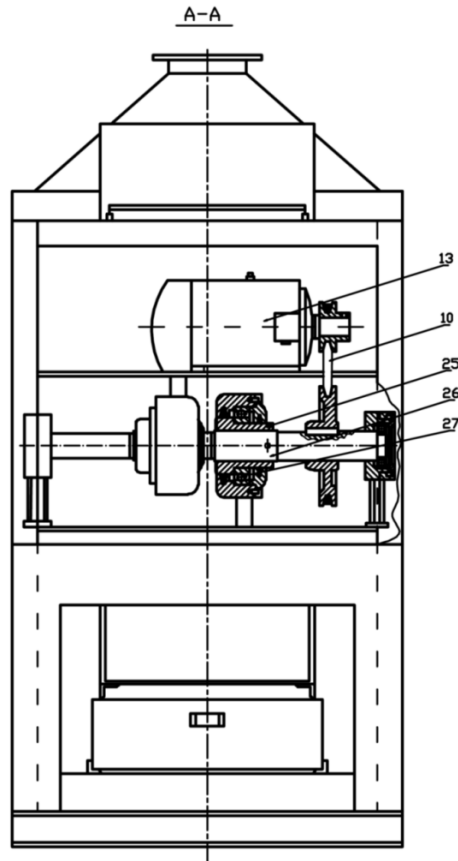


Рисунок 5.5 - Схема промышленной вибрационной радиационной сушилки
(сечение)

Сушилка представляет собой раму 8, на которой расположены рабочие органы - два вибрирующих желоба 1, 2 из нержавеющей стали, расположенных один над другим. Вдоль желобов с нижней стороны проходит ребро жесткости 3. Желоба 1 и 2 с помощью ушек 4, и шарниров 5 связаны с шарнирными опорами 6 и 7, закрепленными на раме 8. Длина шарнирных опор регулируется специальными стяжками. Благодаря такому техническому решению желоба могут совершать колебательные движения. Эксцентриковый привод состоит из эксцентрикового вала 26, установленного в опорах 9, его вращение осуществляется через клиноременную передачу 10 и шкивы 11 и 12 от электродвигателя 13. Привод имеет регулируемый эксцентриситет, которым устанавливается необходимая амплитуда колебаний. Это достигается следующим образом. На приводном валу есть два эксцентриковых узла для обеспечения двустороннего (симметричного) привода грузонесущих органов - желобов;

каждый эксцентриковый узел состоит из эксцентриковой втулки 25, насаженной на эксцентриковом валу 26 с помощью штифта. На наружной поверхности втулки 25 находится шарикоподшипник шатуна 27. Жесткие шатуны 14, 15 с помощью ушек 16, 17 шарнирно крепятся к рабочим органам - желобам 1 и 2. Такая кинематическая связь узлов привода обеспечивает колебания грузонесущих органов установки с одинаковыми по величине, но разными по знаку амплитудами. Изменение амплитуды колебаний желобов 1 и 2 осуществляется за счет поворота эксцентриковой втулки 25 относительно эксцентрикового вала 26.

Над желобами 1 и 2 на раме 8 смонтирован блок ИК-излучателей 18 с отражателями 19 и теплоизоляцией 20. В качестве ИК-излучателей 18 используются кварцевые лампы, расстояние от них до слоя материала может меняться. Сушилка имеет загрузочный бункер - питатель 21 с шибером 22, лоток для разгрузки продукта 23 и также снабжена также крышкой с вентиляционным патрубком 24 для удаления водяных паров, образующихся при сушке косточек.

Работает вибрационная радиационная сушилка следующим образом. Включаются блоки ИК-излучателей 18 и установка разогревается для эксплуатации. Затем включается электродвигатель 13, т.е. вибрационный привод, приводящий в колебательные движения желоба 1 и 2. Предварительно очищенные от мякоти и избыточной поверхностной влаги плодовые косточки через загрузочный бункер - питатель 21 с шибером 22 попадают равномерно по ширине на верхней желоб 1, транспортируются вдоль него, затем пересыпаются на желоб 2 и движутся в обратном направлении. При этом косточки высушиваются ИК-излучателями 18 в соответствии с технологическим режимом. Оператор органолептически оценивает качество сушки продукта и может в процессе эксплуатации увеличивать или уменьшать мощность нагрева. Готовый продукт ссыпается в лоток для разгрузки продукта 23. Водяные пары, образующиеся при сушке косточек, удаляются через вентиляционный патрубок 24. Толщина слоя плодовых косточек на поверхности желоба составляет 6...8 мм, скорость виброперемещения - около 0,05 м/с. Продолжительность сушки регулируется изменением частоты колебаний эксцентрикового привода, путем установления

преобразователя частоты питающего электродвигатель электрического тока, а также изменением угла наклона желобов благодаря удлинению или укорачиванию опор 6 и 7.

5.5. Методика расчета промышленной вертикальной вибросушилки с ИК-излучателями

Методику расчета промышленной сушилки проиллюстрируем на примере косточек черешни.

В таблице 5.1 приведены исходные данные для расчета.

Таблица 5.1-Исходные данные для расчета

Параметры	Обозначения	Единицы измерения	Значения
Начальное влагосодержание продукта	U_0	%	25,4
Конечное влагосодержание продукта	U_k	%	2,4
Диаметр продукта	d	м	0,01
Плотность теплового потока	q	Вт/м ²	900
Плотность продукта	ρ	кг/м ³	1100

Расчет установки состоит из определения основных габаритных размеров, количества испаренной влаги, расхода воздуха, и теплового расчета.

5.5.1. Расчет вибрационного конвейера

Скорость транспортирования продукта виброконвейером зависит от амплитуды и частоты колебаний, характера транспортируемого продукта, угла наклона лотка вибросушилки к горизонту.

$$v = (k_1 - k_2 \cdot \sin \alpha) A \omega \cos \beta \sqrt{1 - \frac{1}{\Gamma^2}},$$

где: v – скорость вибротранспортирования, м/с;

k_1 и k_2 – эмпирические коэффициенты, зависящие от физико-механических свойств транспортируемого груза (для зернистых $k_1 = 1$, $k_2 = 1,6$);

A – амплитуда колебаний грузонесущего элемента, м;

ω – угловая частота колебаний, с^{-1} ;

β – угол направления колебаний, который образуется между вектором скорости броска и осью конвейера, $\beta = 30^\circ$;

α – угол наклона грузонесущего лотка к горизонту, $\alpha = 15^\circ$;

Γ – коэффициент режима работы вибрационного рабочего органа.

Амплитуда колебаний вибрлотка определяется в зависимости от величины эксцентриситета:

$$A = 2l,$$

где l – эксцентриситет приводного вала вибропривода, $l = 1,5$ мм.

$$A = 2 \cdot 1,5 = 3 \text{ мм.}$$

Угловую частоту колебаний определяем по формуле:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30},$$

где n – частота вращения эксцентрического вала, мин^{-1} .

$$\omega = \frac{\pi \cdot 750}{30} = 78,5 \text{ с}^{-1}.$$

Коэффициент режима работы вибрлотка:

$$\Gamma = \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \sin \beta}{(g \cdot \cos \alpha)} = \frac{0,003 \cdot 78,5^2 \cdot \sin 30^\circ}{(9,81 \cdot \cos 15^\circ)} = 0,65,$$

Для сыпучих продуктов с подбрасыванием должно выполняться условие $1 < \Gamma \leq 3,3$. Поэтому принимаем коэффициент работы конвейера $\Gamma = 2,8$.

Скорость вибротранспортирования продукта

$$v = (1 - 1,6 \cdot \sin 15^\circ) \cdot 0,003 \cdot 78,5 \cdot \cos 30^\circ \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{2,8^2}} = 0,07 \frac{\text{м}}{\text{с}} \approx 4,2 \frac{\text{м}}{\text{мин}}.$$

Производительность вибрационного конвейера, кг/ч:

$$\Pi = 3600 \cdot F_n \cdot \varphi \cdot \rho_n \cdot v,$$

где F_n – площадь поперечного сечения слоя, размещенного на лотке продукта, м^2 . Получаем при 4 слоях продукта $h_c = 0,025$ м; ширина лотка $b = 0,12$ м.

$$F_n = 0,12 \cdot 0,025 = 0,0025 \text{ м}^2.$$

φ – коэффициент заполнения поперечного сечения, $\varphi = 0,5$;

ρ_n – насыпная плотность косточек черешни, $\rho_n = 640 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Тогда $\Pi = 3600 \cdot 0,0025 \cdot 0,5 \cdot 640 \cdot 0,07 = 202 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$.

Длины лотка виброконвейера:

$$L_{\text{кон}} = \frac{\Pi \cdot \tau}{b \cdot h_c \cdot \rho_n} = \frac{202 \cdot 0,83}{0,12 \cdot 0,025 \cdot 640} = 87 \text{ м},$$

где τ – продолжительность сушки косточек черешни, $\tau = 50$ мин $\approx 0,83$ ч;

b – ширина потока, $b = 0,12$ м.

Принимаем конструктивное устройство сушилки в виде усеченного конуса; диаметры установки:

нижнего основания – 1650 мм,

верхнего основания – 825 мм.

Длина витка по среднему диаметру составит:

$$l_{\text{вит}} = \pi \cdot d_{\text{ср}} = \pi \cdot 1238 = 3889 \text{ мм} \approx 4 \text{ м}.$$

Количество витков:

$$n_{\text{вит}} = \frac{L_{\text{кон}}}{l_{\text{вит}}} = \frac{87}{4} = 22 \text{ витка}.$$

Определяем высоту установки при шаге между витками $t_{\text{вит}} = 0,12$ м:

$$H_{\text{устан}} = n_{\text{вит}} \cdot t_{\text{вит}} = 22 \cdot 0,12 = 2,64 \text{ м}.$$

5.5.2. Расчет количества испаренной влаги и определение количества расхода воздуха

Масса влажного продукта, загружаемого в аппарат, согласно закону сохранения вещества, равна массе готового продукта и массе испаренной влаги:

$$g_1 = g_2 + W,$$

где g_1 – масса загружаемого влажного продукта, кг/ч;

g_2 – масса высушенного продукта, кг/ч;

W – масса испаренной влаги, кг/ч.

Масса абсолютно сухого продукта в процессе термообработки постоянна.

На основании этого можно записать:

$$g_1 = \frac{g_{\text{с.в.}}}{1 - \frac{W_1}{100}}, \quad g_2 = \frac{g_{\text{с.в.}}}{1 - \frac{W_2}{100}}$$

где $g_{\text{с.в.}}$ – масса абсолютно сухого вещества продукта, кг/ч;

W_1 и W_2 – начальная и конечная влажность продукта, $W_1 = 25,4\%$,

$W_2 = 2,4\%$.

$$\frac{g_1}{g_2} = \frac{100 - W_2}{100 - W_1}, \quad \frac{W}{g_1} = \frac{W_1 - W_2}{100 - W_2}, \quad \frac{W}{g_2} = \frac{W_1 - W_2}{100 - W_1},$$

где $\frac{W}{g_1}$ – масса испаренной влаги, которая приходится на 1 кг загружаемого

влажного продукта, кг/кг;

$\frac{W}{g_2}$ – масса испаренной влаги, которая приходится на 1 кг высушенного

продукта, кг/кг;

Откуда

$$W = g_1 \cdot \frac{W_1 - W_2}{100 - W_2} = g_2 \cdot \frac{W_1 - W_2}{100 - W_1}.$$

Согласно полученных данных часовая производительность вибросушилки

$$g_2 = 202 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Определяем массу загружаемого влажного продукта:

$$g_1 = g_2 \cdot \frac{W_1 - W_2}{100 - W_1} = 202 \cdot \frac{100 - 2,4}{100 - 25,4} = 264 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Количество испаренной влаги:

$$W = g_1 - g_2 = 264 - 202 = 62 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Тогда масса испаренной влаги, которая приходится на 1 кг влажного продукта:

$$\frac{W}{g_1} = \frac{62}{264} = 0,235 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

а масса испаренной влаги, которая приходится на 1 кг высушенного продукта:

$$\frac{W}{g_2} = \frac{62}{202} = 0,307 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

Воздух в полужакрытой ИК-установке является только влагоносителем и расход его определяется максимальным допустимым влагосодержанием.

Параметры воздуха в цехе принимаем:

$$t_1 = 20^\circ\text{C}, \quad \varphi_1 = 70\%, \quad d_1 = 0,01042 \frac{\text{кг}}{\text{кг}};$$

Параметры воздуха в установке:

$$t_2 = 85^\circ\text{C}, \quad \varphi_2 = 40\%, \quad d_2 = 0,191 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}.$$

Количество воздуха, необходимого для процесса сушки, в час:

$$V = \frac{W}{d_1 - d_2} = \frac{62}{0,191 - 0,01042} = 343 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}.$$

5.5.3. Тепловой расчет

Энергия ИК-излучателей поглощается продуктом, который высушивается, стенками рабочей камеры, желобом виброконвейера и находящимся в аппарате воздухом.

Уравнение теплового баланса аппарата:

$$dQ_{\text{изл}} = dQ_{\text{пр}} + dQ_{\text{огр}} + dQ_{\text{тр}} + dQ_{\text{в}},$$

где $dQ_{\text{изл}}$, $dQ_{\text{пр}}$, $dQ_{\text{огр}}$, $dQ_{\text{тр}}$, $dQ_{\text{в}}$ – соответственно энергия, излучаемая ИК-нагревателями, поглощаемая продуктом, ограждениями рабочей камеры, желобом виброконвейером, воздухом.

Общий тепловой поток, поглощаемый продуктом $dQ_{\text{пр}}$, находится из суммирования тепловых потоков, сообщаемых излучателями и стенками ограждения рабочей камеры.

Лучистый теплообмен в установке рассмотрим как теплообмен в замкнутой системе, состоящей из серых параллельных и взаимно перпендикулярных поверхностей [64,85], рисунок 5.6.

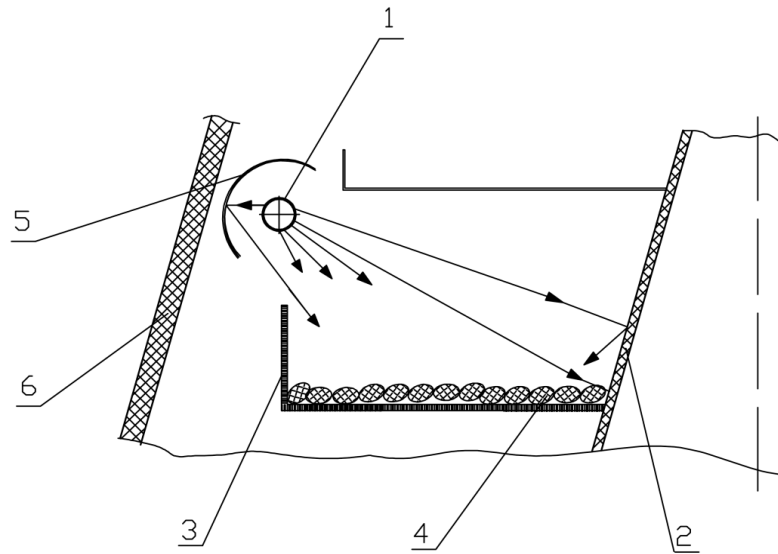


Рисунок 5.6 - Схема лучистого теплообмена в установке для сушки плодовых косточек: 1- излучатель; 2,3- боковые стенки желоба; 4- продукт; 5- отражатель; 6- теплоизоляция блока ИК- излучателей;

Тогда:

$$dQ_{\text{пр}} = dQ_{14} + 2 \cdot dQ_{24},$$

где dQ_{14} и dQ_{24} – результирующие потоки между поверхностями 1 и 4, 2 и 4 соответственно. Индексы 1, 4, 2 относятся к условным поверхностям излучения, материала и ограждения установки.

Результирующие потоки теплоты между поверхностями:

$$dQ_{14} = c_{\text{пр}14} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_4}{100} \right)^4 \right] \cdot F_1 \cdot \varphi_{14} \cdot K,$$

$$dQ_{24} = c_{\text{пр}24} \cdot \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_4}{100} \right)^4 \right] \cdot F_2 \cdot \varphi_{24} \cdot K,$$

где K – коэффициент заполнения поверхности вибрлотка, $K = 0,95$;

φ_{14} и φ_{24} – угловые коэффициенты, $\varphi_{14} = \varphi_{41} = 0,5$.

Площади условных поверхностей:

– излучения (площадь ТЭНов) $F_1 = 2,73 \text{ м}^2$;

– материала (площадь продукта) $F_4 = 0,12 \cdot 87 = 10,44 \text{ м}^2$;

– ограждения (половина площади поверхности сушилки) $F_2 = 10,38 \text{ м}^2$.

Длина вибрлотка $l_0 = \frac{87}{2} = 43,5 \text{ м}$, ширина вибрлотка $b_0 = 0,12 \text{ м}$, высота
– $h_0 = 0,04 \text{ м}$.

Приведенные коэффициенты излучения продукта:

$$c_{\text{пр}14} = \varepsilon_{\text{пр}14} \cdot c_0,$$

$$c_{\text{пр}24} = \varepsilon_{\text{пр}24} \cdot c_0,$$

где c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $c_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К})}$,

$\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты.

$$c_{\text{пр}14} = \varepsilon_{\text{пр}14} \cdot c_0 = \frac{c_0}{1 + \varphi_{14} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) + \varphi_{41} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_4} - 1\right)},$$

Для стальной условной поверхности степень черноты $\varepsilon_1 = 0,6$, для продукта
– $\varepsilon_4 = 0,7$. Тогда:

$$c_{\text{пр}14} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8}}{1 + 0,5 \cdot \left(\frac{1}{0,6} - 1\right) + 0,5 \cdot \left(\frac{1}{0,7} - 1\right)} = 3,66 \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)}.$$

$$c_{\text{пр}24} = \varepsilon_{\text{пр}24} \cdot c_0 = \frac{c_0}{1 + \varphi_{24} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) + \varphi_{42} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_4} - 1\right)},$$

Боковые стенки вибрационного лотка и ограждения блока ИК-излучателей
выполним из нержавеющей стали: $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0,55$.

Угловые коэффициенты для плоскостей 2 и 4: $\varphi_{24} = 0,3$,

$$\varphi_{42} = \frac{F_2 \cdot \varphi_{24}}{F_4} = \frac{10,38 \cdot 0,3}{10,44} = 0,3.$$

$$c_{\text{пр}24} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8}}{1 + 0,3 \cdot \left(\frac{1}{0,55} - 1\right) + 0,3 \cdot \left(\frac{1}{0,7} - 1\right)} = 4,13 \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)}.$$

Таким образом, для нахождения Q_{14} и Q_{24} необходимо определить температуру условно выбранной серой поверхности излучения T_1 . Температура продукта $T_4 = 293 \text{ К}$.

Для нахождения T_1 разделим $Q_{\text{пр}}$ на $F_4 \cdot d\tau$, что дает выражение для определения облученности продукта:

$$q = \frac{Q_{\text{пр}}}{F_4 \cdot d\tau} = c_{\text{пр}14} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_4}{100}\right)^4 \right] \cdot \frac{F_1}{F_4} \cdot \varphi_{14} + 2c_{\text{пр}24} \cdot \left[\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_4}{100}\right)^4 \right] \cdot \frac{F_2}{F_4} \cdot \varphi_{24},$$

Максимальная облученность продукта составит 1400 Вт/м^2 .

Таким образом,

$$1400 = 3,66 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{293}{100}\right)^4 \right] \cdot \frac{2,73}{10,44} \cdot 0,5 + 2 \cdot 4,13 \cdot \left[\left(\frac{373}{100}\right)^4 - \left(\frac{293}{100}\right)^4 \right] \cdot \frac{10,38}{10,44} \cdot 0,3,$$

$$\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 = 2382,$$

$$T_1 = 698 \text{ К}.$$

Тогда

$$Q_{14} = 3,66 \cdot \left[\left(\frac{698}{100}\right)^4 - \left(\frac{293}{100}\right)^4 \right] \cdot 2,73 \cdot 0,5 \cdot 0,95 = 10916 \text{ Вт},$$

$$Q_{24} = 4,13 \cdot \left[\left(\frac{373}{100}\right)^4 - \left(\frac{293}{100}\right)^4 \right] \cdot 10,38 \cdot 0,3 \cdot 0,95 = 1465 \text{ Вт}.$$

Результирующий тепловой поток, поглощаемый косточками черешни, будет равен:

$$Q_{\text{пр}} = Q_{14} + 2 \cdot Q_{24} = 10916 + 2 \cdot 1465 = 13846 \text{ Вт}.$$

Проверим величину облученности продукта в ИК-установке:

$$q = 3,66 \cdot \left[\left(\frac{698}{100} \right)^4 - \left(\frac{293}{100} \right)^4 \right] \cdot \frac{2,73}{10,44} \cdot 0,5 + 2 \cdot 4,13 \cdot \left[\left(\frac{373}{100} \right)^4 - \left(\frac{293}{100} \right)^4 \right] \cdot \frac{10,38}{10,44} \cdot 0,3 = 1396 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Из полученного близкого значения q к принятому ранее можно сделать вывод о целесообразности замены излучателей условной серой поверхностью излучения, что намного упрощает расчет и дает надежные данные о величине создаваемой облученности.

Расчет потерь теплоты через ограждения и с воздухом

Тепловой поток, который поглощается одной стенкой ограждения:

$$Q_{12} = c_{\text{пр}12} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F_1 \cdot \varphi_{12},$$

Угловые коэффициенты $\varphi_{12} = 0,12$ и $\varphi_{21} = 0,23$.

Приведенный коэффициент излучения:

$$c_{\text{пр}12} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8}}{1 + 0,12 \cdot \left(\frac{1}{0,6} - 1 \right) + 0,23 \cdot \left(\frac{1}{0,55} - 1 \right)} = 4,47 \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)}.$$

Тогда:

$$Q_{12} = 4,47 \cdot \left[\left(\frac{698}{100} \right)^4 - \left(\frac{373}{100} \right)^4 \right] \cdot 2,73 \cdot 0,12 = 3192 \text{ Вт}.$$

Допустимые тепловые потери через стенки аппарата при наличии изоляции определяются из соблюдения санитарных условий труда. Температура наружных стен терморрадиационных аппаратов не должна превышать 303... 313 К.

Теплота, которая поглощается желобом вибрационного конвейера:

$$Q_{\text{тр}} = c_{\text{тр}} \cdot m_{\text{тр}} \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{п}}) \cdot \frac{1}{\tau} = 462 \cdot 30 \cdot (110 - 20) \cdot \frac{1}{300} = 4158 \text{ Вт}.$$

Потери теплоты с вентиляционным воздухом $Q_{\text{в}}$:

$$Q_{\text{в}} = c_{\text{п}} \cdot \frac{W_1}{d_2 - d_1} \cdot (t_2 - t_1) \cdot G,$$

где c_p – массовая теплоемкость воздуха при постоянном давлении, $c_p = 1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$,

G – секундная производительность аппарата, кг/с.

$$Q_{\text{в}} = 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,254}{0,191 - 0,01042} \cdot (85 - 20) \cdot \frac{202}{3600} = 5130 \text{ Вт.}$$

Тепловой баланс аппарата:

$$Q_{\text{изл}} = Q_{\text{пр}} + Q_{\text{огр}} + Q_{\text{тр}} + Q_{\text{в}},$$

$$Q_{\text{изл}} = 13846 + 3192 + 4158 + 5130 = 26326 \text{ Вт} \approx 26,3 \text{ кВт.}$$

Приняв $K_{\text{н}} = 0,9$ – коэффициент неучтенных потерь, определяем необходимую мощность излучателей:

$$P_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{изл}}}{K_{\text{н}}} = \frac{26326}{0,9} = 29251 \text{ Вт} \approx 29,25 \text{ кВт.}$$

Принимаем к установке трубчатые ИК-нагреватели мощностью 1кВт каждый. Число нагревателей:

$$n = \frac{29,25}{1} \approx 29 \text{ шт.}$$

Удельный расход тепла при высушивании плодовых косточек в установке:

$$q_{\text{уд}} = \frac{Q_{\text{пр}}}{W} = \frac{13,846 \cdot 3600}{62} = 804 \frac{\text{кДж}}{\text{кг исп. вл.}}$$

Удельные затраты электроэнергии в установке:

$$i_{\text{уд}} = \frac{P_{\text{н}}}{W} = \frac{29,25}{62} = 0,472 \frac{\text{кДж}}{\text{кг исп. вл.}}$$

К.п.д. установки:

$$\eta = \frac{Q_{\text{изл}}}{P_{\text{н}}} \cdot 100\% = \frac{26,3}{29,25} \cdot 100\% = 90\%.$$

5.6. Внедрение результатов исследования в производство

Научно-техническая документация на вибрационную радиационную сушилку передана на внедрение в производство предприятия г. Донецка: ООО «Радуга». Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения сушилки в

производство составляет 2142091 руб. Экономический расчет приведен в приложении Б.

Внедрение в производство новых видов аппаратного обеспечения процессов сушки позволяет повысить рентабельность производства. Акт внедрения приведен в приложении В.

Справка о внедрении результатов исследования диссертационной работы в учебный процесс приведена в приложении Г.

5.7. Выводы по разделу

На разработанный способ сушки плодовых косточек и конструкцию промышленной сушилки непрерывного действия для ее реализации, получены декларационные патенты Украины. Предложенный способ имеет ряд преимуществ перед способом сушки без использования вибрации, основным из которого является равномерная тепловая обработка, обеспечивающая характерное движение продукта, в результате проведения процесса импульсами в сочетании периодов «отдыха» и конвективного действия потока воздуха.

Предварительные аналитические и экспериментальные исследования позволили разработать методику расчета предложенной промышленной сушилки.

Данная методика позволяет рассчитывать количество испаряемой влаги, основные габаритные размеры и тепловые параметры рабочей камеры сушилки.

Предложены технологическая и машинно-аппаратурная схемы обработки плодовых косточек.

Схема охватывает процесс производства высушенных плодовых косточек от их отправки на хранение до реализации.

Результатом практического применения полученных результатов является внедрение конструкторской документации на вибрационную радиационную сушилку на предприятия г. Донецка. Суммарный ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения составляет 2142091 руб.

ВЫВОДЫ

1. Впервые исследованы количественные закономерности процесса сушки плодовых косточек на основе анализа данных экспериментальных теплофизических исследований. Получены уравнения обобщенных кривых скорости сушки, описывающие конвективный теплообмен при взаимодействии теплового потока ИК-излучения для плодовых косточек.

2. Получены значения массообменных коэффициентов и критических влагосодержаний, характеризующих перемещение влаги внутри плодовых косточек, позволяющие определить интенсивность процесса сушки.

3. Впервые установлена взаимосвязь между теплообменом и массообменом при помощи основного критерия кинетики процесса сушки - критерия Ребиндера. Для этого определены значения изменения удельной теплоемкости, удельной теплоты испарения, температурного коэффициента сушки плодовых косточек в зависимости от текущего влагосодержания.

4. Разработан аппаратно-методический комплекс для исследования теплофизических и физико-геометрических характеристик, особенностей влияния параметров вибрации на характер перемещения, изменения кинетики сушки плодовых косточек.

5. Получена модель процесса сушки плодовых косточек, связывающая продолжительность сушки, плотность теплового потока ИК-излучения, начальное влагосодержание продукта и амплитуду колебаний.

6. Впервые получены и исследованы эмпирические зависимости теплофизических характеристик плодовых косточек. Выявлено, что при повышении температуры нагрева и плотности теплового потока ИК-излучения происходит уменьшение коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости, плотности и температуропроводности исследуемого продукта.

7. Впервые для плодовых косточек и их ядер определен ряд физико-геометрических характеристик и осуществлен их статистический анализ. Получены уравнения регрессии в виде мультипликативной модели, которая

описывает количественную связь между линейными размерами косточек и ядер и их объемом, играющая важную роль для моделирования процессов сушки.

8. Установлены общие закономерности влагопотерь, скорости протекания процесса и термограмм, характерные для сушки плодовых косточек при радиационном теплоподводе.

9. Подтверждена эффективность использования комбинированного процесса сушки – ИК-излучения и вибрационного воздействия с целью получения более качественных показателей сушки плодовых косточек и их составляющих. Установлено, что процесс сушки исследуемых плодовых косточек целесообразно проводить при плотности теплового потока ИК-излучения в диапазоне 400...900 Вт/м², что позволяет достичь высокой интенсивности процесса с сохранением качества масла, содержащегося в ядрах косточек.

10. Установлены новые научные данные о рациональных рабочих параметрах процесса сушки ИК-излучением в виброкипящем слое: параметры вибрации: амплитуда колебаний рабочего органа - 3мм, частота колебаний рабочего органа - 21 Гц; ускорение вибрации – 45...55 м/с²; плотность теплового потока ИК-излучения в диапазоне 400...900 Вт/м².

11. Разработаны запатентованные способ и конструкция промышленной вибросушилки с ИК-излучением с учетом полученных теоретических и экспериментальных данных.

12. Разработана инженерная методика проектного расчета промышленной сушильной установки.

13. Реализованы внедрения результатов исследований в производство и определена их социально-экономическая эффективность. Экономический эффект от внедрения составляет 2142091 руб.

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ПК – персональный компьютер

ИК - инфракрасный

ТВЧ – токи высокой частоты

СВЧ – сверхвысокая частота

ВКС - виброкипящий слой

ТФХ – теплофизические характеристики

БАВ – биологически активное вещество

СТП – смешанный теплоподвод

ТФХ – теплофизические характеристики

ТЭН – трубчатый электронагреватель

КПД – коэффициент полезного действия

НД – нормативный документ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вторичные сырьевые ресурсы пищевой и перерабатывающей промышленности АПК и охрана окружающей среды [Текст]: справочник. –М.: Пищепромиздат, 1999. – 465 с.
2. Алейников, И.Н. Превратим отходы в доходы [Текст] / И.Н. Алейников // Пищевая промышленность. – 2001. – №12. – С. 34-35.
3. Ангилеев, О.Г. Комплексная утилизация побочной продукции растениеводства [Текст]/ О.Г. Ангилеев. - М.: Роагропромиздат, 1990. – 160 с.
4. Банк данных технологий переработки вторичных ресурсов в пищевой промышленности. – М.: АгроНИИТЭИПП, 1994. – 232с.
5. Экономический механизм интенсификации использования сырья в пищевой промышленности [Текст] / И.Д. Блаж [и др.]. М.: Штица – Кишнев. - 1990. - С. 10-30.
6. Использование вторичных сырьевых ресурсов в пищевой промышленности за рубежом [Текст] // АгроНИИТЭИПП. – М.: Наука. – 1992. – С. 17-29.
7. Использование вторичных материальных и энергетических ресурсов в народном хозяйстве [Текст] // Экономические и социально-правовые принципы безотходности. - М.: Колос. – 1991. – С. 27-32.
8. Донченко, Л.В. Безопасность пищевого сырья и продуктов питания [Текст] / Л.В. Донченко, В. Д. Надыкта // Пищевая промышленность. - 1999. - 352 с.
9. Гарин, В.М. Тенденции в решении проблемы утилизации отходов [Текст] / В.М. Гарин, А.Г. Хвостиков // Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда и окружающей среды: межвуз. сб. науч. тр./ Рост.-на-Дону гос. акад. с.-х. машиностроения. – 2005. – С. 54-62.
10. Джаруллаев, Д.С. Новое в технике и технологии при переработке плодов и овощей [Текст] /Д.С. Джаруллаев, М.С. Аминов // Махачкала: Дагкнигоиздат, 1996. - 83 с.

11. Камилов, Р.К. Обоснование методов и режимов сушки отходов и технология переработки плодов и овощей [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Камилов Р.К. – Махачкала, 2003. – 156 с.

12. Комаров, В.И. Переработка вторичных сырьевых ресурсоважнейшее направление повышения эффективности производства / В.И. Комаров, Т.А. Мануйлова: обз. инф. // АгроНИИТЭИПП. – М, 1995. – сер. 28, Вып. 3. – 31 с.

13. Лебедев, В.Н. Концепция мало-и безотходной технологии [Текст] / В.Н. Лебедев, В.В. Девяткин // Технология сер. "Ресурсосберегающие процессы, оборудование, материалы". – 1992. – №1. – С.11-16.

14. Лебедев, Е.И. Комплексное использование сырья в пищевой промышленности [Текст] / Е.И. Лебедев // Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 239 с.

15. Черненко, В.И. О путях совершенствования технологии комплексной переработки вторичных ресурсов виноделия [Текст] / В.И. Черненко, А.В. Бодякова // Пищевая индустрия. – 2012. – №3. – С. 14-15.

16. Алейникова, А.В. Разработка метода и сушилки для сушки плодовых косточек [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук / А.В. Алейникова. - Киев, 1988. -134 с.

17. Улумиев, А.А. К обоснованию предпочтительного метода сушки отходов переработки продуктов растительного происхождения для кормопроизводства [Текст] / А.А. Улумиев, Р.К. Камилов, Н.Б. Литвинова // Кормопроизводства. – 1998. – №11. – С. 24-27.

18. Гафуров, К.Х. Изменение биохимических свойств ядер плодовых косточек и качества масла при тепловой обработке [Текст] / К.Х. Гафуров // Техника и технология пищевых производств: тезисы докладов IX Международной научно технической конференции / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия». – Могилев, 2013. – С. 84.

19. Арапов, В.М. Критерии допустимых температурных режимов конвективной сушки пищевых продуктов [Текст] / В.М. Арапов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2002. – № 11. – С. 23-26.

20. Гришин, М.А. Химические показатели земляники и абрикосов комбинированной сушки [Текст] / М.А. Гришин [и др.] // Известия вузов. Пищевая технология. – 1983. – №5. – С. 130-132.

21. Деревенко, В.В. Основные технологические параметры конвективной сушки выжимки винограда сорта каберне [Текст] / В.В. Деревенко [и др.] // Известия вузов. Пищевая технология. – 2011. – № 5-6. – С. 103-105.

22. Толстых, В.К. Идентификация модели теплообменного аппарата ректификационной колонны воздуходелительной установки [Текст] / В.К. Толстых, К.А. Пшеничный // Вестник ДонНУ. Сер. А: Естественные науки. – 2016. – № 4. – С. 80-86.

23. Халецкая, О.А. Вакуумная сушка изоляции предварительно изолированных трубопроводов неразрушающим методом / О.А. Халецкая, С.В. Гридин // Металлургия XXI столетия глазами молодых: материалы II-й межд. науч.-практ. конф. студ. - Донецк: ДонНТУ. – 2016. – С.279-280.

24. Sagar V.R. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review / V.R. Sagar, P. Suresh Kumar // J Food Sci Technol. – 2010. – No. 47(1). – P. 15-26.

25. Jongmin C. Influence of the expansion device on the performance of a heat pump using R407C under a range of charging conditions / C. Jongmin, K. Yongchan // International Journal of Refrigeration. – 2004. – No.27. – P. 378-384.

26. Drying in the Process Industry / C.M. van 't Land. – First Edition. – John Wiley & Sons, 2012. – 381 p.

27. Modern Drying Technology. Volume 5: Process Intensification / Edited by Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar. – First Edition. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2014. – 372 p.

28. Tolstykh, V.K. Optimization for Systems Governed by Partial Differential Equations, The Electronic International Journal "Advanced Modeling and Optimization". – 2012. – N 3. – P. 703-716.

29. Избасаров, Д.С. Влияние сушки на содержание биологически активных веществ плодов [Текст] / Д.С. Избасаров [и др.] //Известие вузов. Пищевая технология. – 1985. – №1. – С. 101-102.

30. Попова, С.Б. Совершенствование процесса сушки в технологии плодоовощных концентратов: автореф. дисс. канд. техн. наук. [Текст] / С.Б. Попова. - М, 2004. - 25с.

31. Решетин, О.Л. Теория переноса тепла и влаги в капиллярно-пористом теле / О.Л. Решетин, С.Ю. Орлов // Журнал технической физики. – 1998. – № 2. – С. 140-142.

32. Берник, М.П. Комбинация нагрева и кипящего слоя при сушке виноградных косточек / Берник М.П., М.М. Мацько, В.И. Оцел, М.В. Вакарчук // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. 5 Международ. науч. техн. конф., 21-22 мая 2009 г., Могилев / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред). – Могилев.: УО МГУП. – 2009. – С.73-79.

33. Гафуров, К.Х. Установка для сушки ядер плодовых косточек / К.Х. Гафуров // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. 5 Международ. науч. техн. конф., 21-22 мая 2009 г., Могилев / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред). – Могилев: УО МГУП. – 2009. – С.75-89.

34. Атаназевич, В.И. Сушка пищевых продуктов [Текст] / В.И. Атаназевич. – М.: ДеЛи, 2000. – 295 с.

35. Гаджиев, А.К. Исследование технологии комплексной переработки плодовых косточек [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.К. Гаджиев.- Ташкент, 1974. – 24 с.

36. Технология переработки продукции растениеводства [Текст] / Под ред. Н.М. Личко. – М.: Колос, 2000. - 552 с.

37. Справочник по витаминам и минеральным веществам [Текст]/ ЭрлМинделл. - М.: Медицина и питание, 2000. - 392 с.

38. Образование и использование вторичных материальных ресурсов [Текст]: Справочник / Пищевая промышленность, 1999. – 476 с.
39. Марчук, Г.С. Перспективы полной утилизации плодовых косточек [Текст] / Г.С. Марчук. – М.: Консервная, овощес. и пищеконд. пром-сть, 1980. – № 5. – 43 с.
40. Лыштван О.Ю. Модели тепломассообмена в технических системах / О.Ю. Лыштван, Я.А. Гусенцова // Вестник ВНУ им. В. Даля. – 2013. – №8 (162) . – С. 138-142.
41. Марчук, Г.С. Технология подготовки плодовых косточек к производству кондитерских изделий [Текст]/ Г.С. Марчук, А.В. Пурич. – М.: Пищепром, сер. конд. пром-сть. – 1965. – № 10. – С. 1-12.
42. Разработка технологии обработки и сушки семян и косточек [Текст]: ОТИПП им. М.В. Ломоносова / отчет по НИР - Одесса, 1966. – 68 с.
43. Дасковский, В.Б. Повышение эффективности использования материальных ресурсов [Текст]/ В.Б. Дасковский.–М.: Пищевая промышленность, 1985. – 28с.
44. Отходы консервного производства [Текст]: Справочник технолога плодоовощного консервного производства / под ред. В.И. Рогачева. – М.: Легкая и пищевая пром-ть. – 1983. – С. 322-329.
45. А.с. 1725812 СССР, А 47J 23/00. Устройство для извлечения косточек из плодов круглой формы/ С.Д. Анисимов, Р.Ф. Хамидулин (СССР). - № 1303130; Заявлено 22.08.89, Бюл. №14. – 6 с.
46. А.с. 568433 СССР, А47J 23/00. Устройство для извлечения косточек из плодов / А.И. Касап (СССР). - № 568433; Заявлено 12.09.74, Бюл. № 30. – 5 с.
- 47.А.с. 49596 СССР, А47J 23/00. Устройство для извлечения косточек из плодов, например вишен / Н.Л. Кузнецова, И.И. Околот (СССР). - № 188046; Заявлено 29.03.74, Бюл. № 33. – 5 с.
48. Поперечний, А.М. Сушіння харчової сировини у псевдозрідженому шарі: монографія / А.М. Поперечний, Н.М. Варваріна, І.В. Жданов. - Донецьк: ДонНУЕТ, 2012. - 303 с.

49. Черевко, О.І. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник [Текст]/ О.І.Черевко, А.М. Поперечний. – Х.: Світ книг, 2014. – 496 с.

50. Гришин, М.А. Установки для сушки пищевых продуктов [Текст]: Справочник / М.А.Гришин, В.И.Атаназевич, Ю.Г. Семенов. – М.: Агропромиздат, 1989. – 215с.

51. Безбах, И.В. Исследование процесса сушки плодов и ягод во взвешенном слое [Текст] / И.В.Безбах, Н.В.Бахмутян // Наукові праці ОНАХТ. – 2006. – Вип.28, Том 2. – С.112 – 116.

52. Малезик, И.Ф. Конвективно - высокочастотная сушка косточковых фруктов [Текст] / И.Ф. Малезик, В.П.Тарлев, А.С. Лупашко // Техн. Ун-т Молдовы. Ch.: UTM, 2005. – 472 с.

53. Антипов, С.Т. Тепло- и массообмен при конвективной сушке в движущемся слое продукта [Текст] / С.Т. Антипов // Модернизация существующего и разработка новых видов оборудования для пищевой промышленности : Сб. науч. тр . – 2003. – Вып. 13. – С. 6-9.

53. Снежкін, Ю.Ф. Зниження енерговитрат при переробці фруктово-овочевої сировини [Текст]/ Ю.Ф. Снежкін, Р.О. Шапар, Є.Ю. Снежкін // Наук. Праці ОНАХТ. – 2006. – Вип. 28., Т.2. – С.71-73.

55. Толстых, В.К. Численное моделирование и управление процессами теплопереноса в противоточных теплообменных аппаратах [Текст] / В.К. Толстых, К.А. Пшеничный // Информатика и кибернетика. – 2017. – С. 34-42.

56. Лупашко, А.С. Влияние комбинированной сушки на качество винограда бессемянных сортов [Текст] / А.С. Лупашко// Техника и технология пищевых производств: тез. докл. 7 Международ. науч. техн. конф., 2009 г., Могилев / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред). – Могилев: УО МГУП. – 2009. – С.79-83.

57. Улумиев, А.А. К обоснованию предпочтительного метода сушки отходов переработки продуктов растительного происхождения для

кормопроизводства [Текст] /А.А. Улумиев, Р.К. Камилов., Н.Б.Литвинова // Известия вузов М.: Кормопроизводства. – 1998. – №11. – С 24- 27.

58. Лыков, А.В. Теория сушки: учеб. пособие для высших технических учебных заведений [Текст]/ А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

59. Гинзбург, А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / [Текст]/ А.В. Гинзбург. - М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.

60. Езенков, А.А. Конвективная и сверхвысокочастотно- конвективная сушка семян подсолнечника [Текст]/ А.А. Езенков, С.П. Рудобашта // Проблемы ресурсо - и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК (ПРЭТ-2014): сборник трудовV Междунар. науч-техн.конф. – Россия: Иван. гос. хим. технолог. ун-т. Иваново. – 2014. –Т.1. – С. 155-160.

61. Калашников, Г.В. Кинетические закономерности комбинированной конвективно-СВЧ- сушки плодов и овощей [Текст]/ Г.В. Калашников, Е.В. Литвинов // Проблемы ресурсо - и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК (ПРЭТ-2014): сборник трудовV Междунар. науч-техн.конф. – Россия: Иван. гос. хим. технолог. ун-т. Иваново. – 2014. –Т.1. – С. 237-241.

62. Безбах И.В. Повышение энергоэффективности технологической линии с применением комбинированного способа сушки [Текст]/ И.В. Безбах, Е.В. Воскресенская // Наук. Праці ОНАХТ. – 2008. – Вип. 32. – С. 86-92.

63. Безбах И.В. Тепло-массообменная аппаратура на базе двухфазных модулей [Текст]/ И.В. Безбах, А.В. Зыков, В.И. Донкоглов, Омар Саид Ахмед // Наук. Праці ОНАХТ. – 2008. – Вип. 32. – С. 301-305.

64. Потапов, В.О. Раціональні режими сушіння овочів змішаним теплопідводом [Текст]: автореф. дис. ...канд. техн. наук / В.О. Потапов.- Одеса, 1994. - 16 с.

65. Потапов, В.О. Наукові основи аналізу та керування кінетикою сушіння харчової сировини [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук / В.О. Потапов.- Харків, 2007. - 35 с.

66. Пак, А.О. Розробка процесу сушіння плодово-ягідної сировини змішаним теплопідводом зі штучним пароутворенням [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.О. Пак.- Харків, 2008. - 19 с.

67. Лупашко, А.С., Дикусар О.Ф. Кинетика сушки ядер абрикос с использованием ТВЧ [Текст]/ А.С. Лупашко, О.Ф. Дискур//Электронная обработка материалов. – 2007. – №2. – С. 66-70.

68. Лупашко, А.С. Основные направления совершенствования процесса сушки томатов [Текст]/ А.С. Лупашко, В.П. Тарлев, О.А. Ротарь// Техника и технология пищевых производств: тез. докл. 7 Международ. науч. техн. конф., 2009 г., Могилев / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред). – Могилев: УО МГУП. – 2009. – С.81-98.

69. Лупашко, А.С. Влияние комбинированной сушки на качество винограда бессемянных сортов [Текст]/ А.С. Лупашко// Техника и технология пищевых производств: тез. докл. 7 Международ. науч. техн. конф., 2009 г., Могилев / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред). – Могилев: УО МГУП. – 2009. – С.79-86.

70. Лупашко, А.С. Особенности производства сушеного винограда с применением микроволновой энергии [Текст]/ А.С. Лупашко, Г.К. Дикусар, Н.Н. Нетреба// Техника и технология пищевых производств: тез. докл. 7 Международ. науч. техн. конф., 2009 г., Могилев / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред). – Могилев: УО МГУП. – 2009. – С.80-94.

71. Абдурахмонов, О.Р. Сушка в акустическом поле [Текст]/ О.Р. Абдурахмонов // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. 7 Международ. науч. техн. конф., 2009 г., Могилев / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред). – Могилев: УО МГУП. – 2009. – С.74-82.

72. Гусенцова, Я.А. Динамические характеристики теплогенерирующих объектов [Текст] / Я.А. Гусенцова, Э.И. Кулешова, И.Д. Пастушкова, Г.Е. Чередниченко, А.А. Коваленко // Материалы 10 международной научно-практической конференции «Бъдещите изследвания». София. «Бял ГРАД-БГ» ООД. – 2014. – Том 45. – С. 82-91.

73. Хабибов, Ф.Ю. Совершенствование процесса сушки в производстве сухопродуктов с обработкой при импульсном звуковом и тепловом воздействии [Текст]/ Ф.Ю. Хабибов // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. 7 Международ. науч. техн. конф., 2009 г., Могилев / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред). – Могилев: УО МГУП. – 2009. – С. 88-99.

74. Кретов, И.Т. Способ сублимационной сушки пищевых продуктов в сверхвысокочастотном поле [Текст]/ И.Т. Кретов, С.В. Шахов, А.С. Белозерцев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2001. – №9. – С. 24-25.

75. Кутовой, В.А. Энергосберегающие, экологически чистые вакуумные установки для сушки дисперсных материалов [Текст]/ В.А. Кутовой, А.А. Николаенко, А.А. Германов. Е.Н. Соколенко // Наук. праці ОНАХТ. – 2008. – Вып, 32. – С. 7-12.

76. Антипов, С.Т. Комплексное использование криогенных жидкостей в процессе вакуум-сублимационной сушки [Текст]/ С.Т. Антипов, В.Е. Добромиров, А.С. Белозерцев А.С. Кумицкий // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2007. – №5. – С. 79-81.

77. Попов, А.М. Экспериментальное исследования вакуумной сушки брусники [Текст]/ А.М. Попов, В.В. Гурин, А.Н. Расщепкин, Е.А. Расщепкина // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2007. – №9. – С. 30-32.

78. Касаткин, В.В. Тепломассообмен в сублимационных сушильных установках непрерывного действия с СВЧ- и УЗИ- источниками при непрерывном потоке газа [Текст]/ В.В. Касаткин, Н. Ю. Литвинюк, И.Г. Поспелова, И.В. Возмищев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2007. – №10. – С. 75-77.

79. Веселовська, Т.Е. Дослідження кінетики інфрачервоного сушіння яблучних вичавок [Текст]/ Т.Е. Веселовська [та ін.] // Наук. праці ОНАХТ. – 2006. – Вип. 28, Т.2. – С. 27-29.
80. Малезик, І.Ф. Дослідження кінетики сушіння морквяних вичавок за допомогою інфрачервоного випромінювання [Текст]/ І.Ф. Малезик[та ін.] // Наук. праці ОНАХТ. – 2009. – Вип. 35, Т.2. – С. 190-192.
81. Гафуров, К.Х. Системный анализ процесса термообработки ядер плодовых косточек [Текст] / К.Х. Гафуров, У.А. Саидмуратов. - Бухара.: Техника и технология пищевых производств. – 2011. – С. 62-63.
82. Лаго, Л.А. Инфракрасная сушка виноградной выжимки [Текст]/ Л.А. Лаго, А.А Завалий, И.В. Янович. - г. Симферополь.: ГП «ПКТИ Плодмашпроект», 2014. – С.143.
83. Филатов, В. В. Исследования аддитивных составляющих теплового потока в термических камерах технологического оборудования с инфракрасным энергоподводом [Текст]/ В. В. Филатов // Хранение и переработка сельхозсырья: теорет. журн. – 2011. – № 5. – С.16-19.
84. Филатов, В. В. Методика аналитического расчета продолжительности термообработки капиллярно-пористых коллоидных материалов в термических камерах ИК-установок [Текст]/ В. В. Филатов // Хранение и переработка сельхозсырья: теорет. журн. – 2011. – № 1. – С.15-18.
85. Филатов, В. В. Исследования термической обработки капиллярно-пористых коллоидных материалов инфракрасным излучением [Текст]/ В. В. Филатов // Хранение и переработка сельхозсырья: теорет. журн. – 2010. – № 5. – С.16-23.
86. Завалий, А.А. Устройства инфракрасной сушки термолабильных материалов / А.А. Завалий, Ю.Ф. Снежкин. – Россия.: Проблемы ресурсо - и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК (ПРЭТ-2014): сборник трудов V-й Междунар. науч-техн. конф. – 2014. –Т.1. – С. 91-96.

87. Филатов, В. В. Обработка зерна сои при инфракрасном энергоподводе [Текст]/ В. В. Филатов // Хранение и переработка сельхозсырья: теорет. журн., 2008. – № 5. – С.34-37.

88. Поперечный, А.Н. Комплексная обработка плодовых косточек кизила [Текст] /А.Н. Поперечный, Н.А. Миронова // Наукові праці ОНАХТ. – 2006. – Вип.28 , Т.2. – С. 356 – 357.

89. Поперечный, А.М. Дослідження процесу сушіння кісточок плодів гліду у віброкиплячому шарі за допомогою ІЧ – нагрівання [Текст] / А.М.Поперечный, Н.О.Миронова // Наукові праці Донецького національного університету економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. – 2007. – С. 98-99.

90. Поперечный, А.М. Кинетика процесу сушіння плодовых кісточок у віброкиплячому шарі ІЧ-випромінюванням [Текст]/ А.М. Поперечный, Н.О. Миронова // Науковий журнал Харківського державного університету харчування та торгівлі / Міністерство освіти і науки України. – 2008. – Вип. 7. – С. 93-100.

91. Демидов, А.С. Совершенствование процесса сушки масличных семян инфракрасным излучением на основе математического моделирования [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.С. Демидов - Санкт-Петербург, 2012. – 112 с.

92. Аношин, И.М. Теоретические основы массообменных процессов пищевых производств [Текст]. - М.: Пищевая пром-сть, 1970. - 344 с.

93. Шодиев, С.С. Интенсификация процесса тепловой обработки косточковых маслосодержащих материалов с использованием нетрадиционных методов подвода энергии [Текст]: Дис. ... маг. техн. наук / С.С. Шодиев. - Бухара, 2010. - 81с.

94. Ильясов, С.Г. Физические основы инфракрасного облучения пищевых продуктов [Текст] /С.Г. Ильясов, В.В. Красников.- М.: Пищевая промышленность, 1978. – 358 с.

95. Членов, В.А. Виброкипящий слой [Текст]/ В.А. Членов, Н.В. Михайлов. - Москва.: Наука, 1972. – 342 с.

96. Гинзбург, А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности: монография [Текст]/ А.С. Гинзбург. – М.: Пищевая пром-сть, 1966. – 407 с.
97. Романков, П.Г. Сушка во взвешенном состоянии [Текст]/ П.Г. Романков, Н.Б. Рашковская. – Ленинград.: Химия, 1968. – 358 с.
98. Филоненко, Г.К. Сушка пищевых растительных материалов. [Текст]/ Г.К. Филоненко [и др.]; под. общ. ред.. Г.К. Филоненко // Пищ. пром.-ть. - Москва, 1971. – 440 с.
99. Гришин, М.А. Интенсификация процесса сушки пищевых растительных материалов [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук / М.А. Гришин. - Одесса, 1973. – 58 с.
100. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса [Текст]/ А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. - М.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
101. Крейт, Ф. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. -512 с.
102. Беляев, Н. М. Основы теплопередачи [Текст] / Н. М. Беляев. – Киев.: Высшая школа, 1989. – 342 с.
103. Поперечный, А.Н. Определение коэффициента теплопроводности плодовых косточек/ А.Н. Поперечный, И.В. Жданов, Н.А. Миронова, Д.В. Амангалиев // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. IX Международ. науч. конф. студентов и аспирантов, 24-25 апреля 2014 г., Могилев / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред). – Могилев.: УО МГУП. – 2014. –43-44с.
104. Платунов, Е. С. Теплофизические измерения и приборы. Л.: Машиностроение, 1986. - 256 с.
105. Буляндра, А.Ф. Теплофизические основы расчета терморadiационных сушильных установкой пищевой промышленности [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Ф. Буляндра. - Киев, 1967. – 24 с.
106. Кармазин, В.Д. Техника и применение вибрирующего слоя [Текст] /В.Д. Кармазин. – К.: Наукова думка, 1977. – 175 с.
107. Чернявский, А.И. Пути интенсификации процессов сушки некоторых

материалов [Текст]/ А.И. Чернявский // Повышение эффективности и совершенствование процессов и аппаратов химических производств: тез. докл. III Республиканской конф. – Львов. – 1973. – С. 178-179.

108. Погожих, И.Н. Научные основы теории и техники сушки пищевого сырья в массообменных модулях [Текст]: дис... д-ра техн. наук: 05.18.12 / И.Н. Погожих. – Харьков, 2002. – 331 с.

109. Щербаков, В.Г. Химия и биохимия переработки масличных семян [Текст]/ В.Г. Щербаков. – М.: Пищевая промышленность, 1977. – 162 с.

110. Белобородов, В.В. Массоперенос в твердых пористых телах [Текст] / В.В. Белобородов, Б.А. Воронеж: СПб, 1999. – 146 с.

111. Антипов, С.Т. Тепло- и массообмен при сушке в аппаратах с вращающимся барабаном [Текст] / С.Т. Антипов, В.Я. Валуйский, Н.М. Меснянкин // Воронеж.гос.технол.акад. – Воронеж, 2001. – 308 с.

112. Куцакова, В.Е. Некоторые кинетические закономерности процесса сушки в барабанных агрегатах при кондуктивно-конвективном теплоподводе [Текст] / В.Е. Куцакова, Л.И. Логинов, С.В. Петров. // Журнал прикладной химии. – 2007. - том 3, вып. 1. - С. 146-150.

113. Гержой, А.П. Зерносушение и зерносушилки [Текст]/ А.П. Гержой В.Ф. Самочетов. – М.: Колос, 1967. – 255 с.

114. ГОСТ 24346-80. Вибрация. Термины и определения [Текст].- М.: Издательство стандартов, 1980. – 23 с.

115. Ливитский, Н.И. Колебания в механизмах [Текст] / Н.И. Ливитский.- М.: Наука, 1988. - 336 с.

116. Спиваковский, А.О. Вибрационные конвейеры, питатели и весовспомогательные устройства [Текст] / А.О. Спиваковский, И.Ф. Гончаревич.- М.: Машиностроение, 1972.- 328 с.

117. Диментберг, Ф.М. Вибрация в технике и человек [Текст] / Ф.М. Диментберг. - М.: Знание, 1987. - 160 с.

118. Спиваковский, А.О. Горнотранспортные вибрационные машины [Текст] /А.О. Спиваковский, И.Ф. Гончаревич.-М.: Углетехиздат, 1969. – 220 с.

119. Блехман, И.И. О выборе основных рабочих параметров вибрационных конвейеров [Текст] // Обогащение руд. – 1959. – № 2. – С. 20-25.

120. Волошин, Л.Н. К теории и расчету вибрационных сушилок [Текст] / Л.Н Волошин // Изв. ВУЗов. Пищевая технология. – 1966. – № 2. – С. 138-144.

121. Гинзбург, А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности [Текст] /А.С. Гинзбург. -М.: Агропромиздат, 1985. - 336 с.

122. Повидайло, В.А. Расчет и конструирование вибрационных питателей [Текст] / В.А. Повидайло. - Киев: Машгиз, 1962. – 151 с.

123. Чернобыльский, И.И. Сушильные установки химической промышленности [Текст] / И.И. Чернобыльский, Ю.Н. Тонанайко.- Киев, Техника, 1969. - 279 с.

124. Михеев, М. А. Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева.- М.: Энергоиздат, 1977. – 366 с.

125. Лыков, А.В. Теория сушки: учеб. пособие для высших технических учебных заведений / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

126. Лыков, А.В. Тепло-и массообмен в процессах сушки [Текст]/ А.В. Лыков.- М.: Госэнергоиздат, 1956. – 464 с.

127. Плаксин, Ю. М. Научно-технические основы пищевой технологии при ИК-энергоподводе. Дис. ... д. т. н.- М.: МГАПП, 1993. – 203 с.

128. Геращенко, О.А., Федоров В.Г. Техника теплотехнического эксперимента. - Киев.: Наука, 1964. - 170 с.

129. Панин, А. С. Исследование теплофизических процессов обработки полупродуктов хлебопекарного производства. Дис. канд. техн. наук -М.: МТИПП, 1979. -195 с.

130. Карслоу, Г., Егер Л. Теплопроводность твердых тел. - М.: Наука, 1964. - 300 с.

131. Гинзбург, А.С.. Теплофизические характеристики пищевых продуктов [Текст]/ А.С. Гинзбург, М.А. Громов, Г.И. Красовская // Справочник. - М: Агропромиздат, 1990. - 258 с.

132. Артемьев, Б.Г. Поверка и калибровка средств измерений [Текст] / Б.Г. Артемьев, Ю.Е. Лукашев. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2006. – 406 с.

133. ГОСТ Р 8.568-97. Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения [Текст]. – Введ. 1997-11-10. – М.: Стандартинформ, 1997. – 11 с.

134. ГОСТ Р 8.879-2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению [Текст]. – Введ. 2014-11-20. – М.: Стандартинформ, 2015. - 8 с.

135. Гинзбург, А.С. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов [Текст] / А.С. Гинзбург, М.А. Громов. - М.: Агропромиздат, 1987. - 272 с.

136. ГОСТ 30256-94. Межгосударственный стандарт. Метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом. Основные положения [Текст]. – Введ. 1996-01-01. – М.: Стандартинформ, 1996. – 11 с.

137. Щербаков, В.Г. Биохимия и товароведение масличного сырья: учебник для вузов / В.Г. Щербаков. – М.: Агропромиздат, 1991. – 304 с.

138. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для вузов / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л: Химия, 1987. – 576 с.

139. ГОСТ 15139-69. Межгосударственный стандарт Пикнометрический метод определения плотности. Основные положения [Текст]. – Введ. 1970-01-07. – М.: Стандартинформ, 1970. – 18 с.

140. Георги, Вълчев, Иван Киряков, Виолета Рашева. Основни геометрични и физични параметри на гроздови семки. Пловдив «Хранителна наука, техника и технологии». – 2007. – С. 350-355.

141. Деревенко, В.В. Физико-механические и аэродинамические характеристики семян тыквы / В.В. Деревенко, А.С. Коробченко, И.Н. Аленкина // Процессы и аппараты пищевых производств: электр. науч. журнал – СПб: СПбГУНиПТ. – 2010. – Вып.2. – С. 102-111.

142. Жданов, І.В. Дослідження фізико-механічних характеристик насіння соняшнику / І.В. Жданов, А.В. Шульга, Ю.О. Волков // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. – Харків, ХДУХТ. – 2012. – Вип. 1(15). – С. 484-489.
143. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов [Текст]/ В.Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.
144. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика: для инженеров и научных работников [Текст]/ А.И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
145. Шашков, В.Б. Обработка экспериментальных данных и построение эмпирических формул: учебн. пособие [Текст]/ В.Б. Шашков. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. – 150 с.
146. Муштаев, В.И. Сушка дисперсных материалов [Текст]: монография / В.И. Муштаев, В.М. Ульянов.– М: Химия, 1988. – 352 с.
147. Берк, К. Анализ данных с помощью MicrosoftExcel: пер. с английского / К. Берк, П. Кейри. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 560 с.
148. Лялин, В.С. Статистика: теория и практика в Excel: учеб. пособие / В.С. Лялин, И.Г. Зверева, Н.Г. Никифорова. – М.: Финансы и статистика; ИНФА-М, 2010. – 448 с.
149. Поперечный, И.А. Облучение кофейных зерен при терморadiационной обжарке // Технология и качество пищевых продуктов: Сб. науч. тр. / Харьк. ин-т обществ. питания. – Харьков. – 1992. – С. 39-51.
150. ГОСТ 31319-2006. Межгосударственный стандарт. Вибрация. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Требования к проведению измерений на рабочих местах. Основные положения [Текст]. – Введ. 2008-07-01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 11 с.
151. ГОСТ 15113.4-77. Межгосударственный стандарт. Концентраты пищевые. Методы определения влаги. Основные положения [Текст]. – Введ. 1979-01-01. – М.: Стандартинформ, 1979. – 7 с.
152. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 278 с.

153. Вавилова, Г.В. Математическая обработка результатов измерения: учебное пособие // Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 98с.

154. Тихомиров, В.Б. Планирование и анализ эксперимента. -М.: Легкая индустрия,1974. - 263 с.

155. Поперечный, А.М. Кінетика процесу сушіння плодкових кісточок у віброкиплячому шарі при інфрачервоному нагріванні/ А.М. Поперечный, Н.О. Миронова // Науковий журнал Харківського державного університету харчування та торгівлі. – 2007. – Вип. 7. – С. 122-128.

156. Поперечный, А.М. Передумови аналітичних досліджень сушіння плодкових кісточок / А.М. Поперечный, І.В. Жданов, Н.О. Миронова // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: Міжнародна науково-практична конференція, 22 травня 2014 р.: [тези у 2-х ч.] / редкол.: О.І. Черевко [та ін.]. - Харків: ХДУХТ. – 2014. – Ч.1. – С. 255-257.

157. Поперечный, А.Н. Теоретические предпосылки ИК-нагрева плодовых косточек/ А.Н. Поперечный, И.В. Жданов, Н.А. Миронова //Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: Міжнародна науково-практична конференція 2 червня 2014 р.: [тези у 2-х ч.] / редкол.: О.І. Черевко [та ін.]. - Харків: ХДУХТ. – 2014. – Ч.1. – С. 162-164.

158. Гончаревич, И.Ф. Вибрационная техника в пищевой промышленности/ И.Ф. Гончаревич, Н.Б. Урьев, М.А. Талейсник. – М.: Пищевая пром-сть, 1977. – 278 с.

159. Членов, В.А. Виброкипящий слой/ В.А. Членов, Н.В. Михайлов.-М.: Наука, 1972. - 342 с.

160. Блехман, И.И. Вибрационное перемешивание / И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе.- М.: Наука, 1964. - 410 с.

161. Гончаревич, И.Ф. Вибрационные машины в строительстве / И.Ф. Гончаревич, П.А. Сергеев. - М.: Машгиз, 1963. – 311 с.

162. Гончаревич, И.Ф. Динамика вибрационного транспортирования / И.Ф. Гончаревич. - М.: Наука, 1972. – 244с.
163. Гончаревич, И.Ф. Теория вибрационной техники и технологии / И.Ф. Гончаревич, В.А. Фролов. - М.: Наука, 1981. – 320 с.
164. Гордеев, А.С. Повышение эффективности и качества процесса сушки, путем применения вибрационных сушильных установок / А.С. Гордеев, А.М. Абдыров, С.Ю. Щербаков. – Воронеж.: Высокие технологии энергосбережения: Труды международной школы конференции. – 2005. – С. 159-161.
165. Цуркан, Н.М. Разработка рациональных режимов производства сушеного быстровосстанавливаемого картофеля: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.М. Цуркан. – Харьков, 2000. – 19 с.
166. Жданов, І.В. Сушіння рослинної сировини у відцентровому псевдозрідженому шарі: автореф. дис. ... канд. техн. наук / І.В. Жданов. – Донецьк, 2011. – 20 с.
167. ГОСТ 10858-77. Семена масличных культур. Промышленное сырье. Методы определения кислотного числа.– М.: Стандартинформ, 2010. – 7 с.
168. Копейковский, В.М. Технология производства растительных масел: учебник для вузов пищ. пром-ть / В.М. Копейковский [и др.]. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 416 с.
169. Акаева, Т.К. Основы химии и технологии получения и переработки жиров. Ч. 1. Технология получения растительных масел: учеб. пособие / Т.К. Акаева, С.Н. Петрова. – Иваново: ГОУВПО Иван. гос. хим.- технол. ун-т; Иваново, 2007. – 124 с.
170. Гинзбург, А.С. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов: справочник / А.С. Гинзбург, И М. Савина. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1982. – 280 с.
171. A.N. Poperechnyi, I.V. Zhdanov, N.O. Mironova, A.V. Shulga. Drying of plant materials in a Vibro-Fluidized Bed with Infrared Heating// Academic message at the 4th edition of BIOATLAS International Conference, taking place at Transilvania University from Brasov, Faculty of Food and Tourism, May, 15-17. – 2014. – С. 66-70.

172. Поперечний, А.М. Дослідження фізико-механічних характеристик кісточок абрикосу [Текст]/ А.М. Поперечний, І.В. Жданов, Н.О. Миронова //Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. Наук. пр. . – 2014. – Вип. 32. – С. 74-82.

173. Поперечный, А.Н. Основные геометрические и физические параметры плодовых косточек [Текст]/ А.Н. Поперечный, Н.А. Миронова // Техника и технология пищевых производств. – г. Могилев, 24-25 апреля. – 2008. – С. 43-44.

174. Поперечний, А.М. Кінетика сушіння кісточок вишні при радіаційному теплопідведенні [Текст] / А.М. Поперечний, І.В. Жданов, Н.О. Миронова // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Актуальні проблеми харчової промисловості». Тернопіль, 8-9 жовтня 2013 р.: матеріали конференції.- Тернопіль: В-во ТНТУ. – 2013. – С. 41-42.

175. Поперечний, А.М. Кінетика сушіння кісточок черешні при радіаційному теплопідведенні [Текст] / А.М. Поперечний, І.В. Жданов, Н.О. Миронова // Матеріали тез Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Сучасні тенденції та перспективи розвитку технології харчових виробництв» 27-29 листопада 2013 р. / За ред. проф. В.Г. Ткаченко.- Луганськ: «Елтон-2» . – 2013. - С. 70-72.

176. Поперечний, А.М. Кінетика сушіння кісточок абрикосів під час радіаційного теплопідведення [Текст] / А.М. Поперечний, І.В. Жданов, Н.О. Миронова // Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг: Міжнародна науково-практична конференція, 19 листопада 2013 р / редкол.: О.І. Черевко [та ін.]; Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі.-Х.: ХДУХТ. – 2013. - Ч. 1. - С. 368-369.

177. Поперечный, А.Н. Сушка плодовых косточек с применением инфракрасного теплоподвода [Текст] / А.Н. Поперечный, И.В. Жданов, Н.А. Миронова // Техника и технология пищевых производств. - г. Могилев, 24-25 апреля. – 2014. - С. 65-67.

178. Поперечный, А.М. Экспериментальні дослідження процесу подрібнення плодкових кісточок [Текст] / А.М. Поперечный, В.Г. Корнійчук, І.В. Жданов, Н.О. Миронова // Наук. Праці ОНАХТ. – Одеса. – 2014. – Вип. 45, Т. 2. – С. 38-41.

179. Поперечный, А.Н. Анализ влияния температуры нагрева ядер косточек на качество получаемого масла при их обработке [Текст] / А.Н. Поперечный, Ю.О.Лесишина, И.В. Жданов, Н.А. Миронова //Проблемы ресурсо - и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК (ПРЭТ-2014): сборник трудовV Междунар. науч-техн.конф. – Россия: Иван. гос. хим. технолог. ун-т. Иваново. – 2014. –Т.1. – С. 186-189.

180. Поперечный, А.М. Кінетика сушіння кісточок у віброкиплячому шарі при радіаційному теплопідведенні [Текст] / А.М. Поперечный, І.В. Жданов, Н.О. Миронова // Міжвузовський науково-практичний семінар «Нові технології і обладнання харчових виробництв». Полтава, 26 березня 2014 р.: матеріали семінару.- Полтава: ПУЕТ. – 2014. – С. 21-22.

181. Поперечный, А.Н. Кинетика сушки плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое [Текст] / А.Н. Поперечный, Н.А. Миронова // Научный журнал НИУ ИТМО серия «Процессы и аппараты пищевых производств» . – 2015. – №1. – С. 142-149.

182. Поперечный, А.Н. Интенсификация процессов переработки плодовых косточек [Текст] / А.Н. Поперечный, В.Г. Корнійчук, Н.А. Миронова // VII Междунар. науч.-техно. конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, 17-20 ноября 2015 г.). Ч. II: Материалы конференции. – СПб.: Университет ИТМО. – 2015. – С. 11-14.

183. Поперечный, А.Н. Влияние параметров сушки плодовых косточек на качество получаемого масла [Текст] / А.Н. Поперечный, Н.А. Миронова, И.В. Жданов, С.А. Боровков // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – Россия, Санкт-Петербург.– 2016. –№2.–С. 3-12.

184. Поперечный, А.Н. Моделирование процесса сушки плодовых косточек [Текст] / А.Н. Поперечный, Н.А. Миронова, // Междунар. науч.-техн. конференция «Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и

смежных отраслях промышленности» (Москва, ФГБОУ ВО МГУДТ, 8-9 сентября 2016 г.). Ч. I: сборник научных трудов конференции, посвященной 105-летию со дня рождения А.Н. Плановского. – 2016. – С. 79-83.

185. Поперечный, А.Н. Кинетические закономерности процесса сушки плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое [Текст] / А.Н. Поперечный, Н.А. Миронова, // Вестник ДонНТУ: международный научно-технический журнал. – 2016. – №6(6) . – С. 44-52.

186. Пат. України № 95859, ПМК (2014) А 23 L3/005. Спосіб сушіння плодкових кісточок / Поперечний А.М., Миронова Н.О., Жданов І.В.; заявник і власник Донецьк. нац. ун-т економ. і тогр. ім. Михайла Туган-Барановського.- заявл 14.07.2014; опубл. 10.10.2014, Бюл. №4. - 4с.: іл..

187. Пат. України № 95857, ПМК (2014) А 23 L 3/005. Вібраційна радіаційна сушарка / Поперечний А.М., Миронова Н.О., Жданов І.В.; заявник і Донецьк. нац. ун-т економ. і тогр. ім. Михайла Туган-Барановського.- заявл 14. 07.2014; опубл. 10.10.2014, Бюл. №4. - 4с.: іл..

188. Поперечный, А.Н., Миронова Н.А. О конструировании теплообменного аппарата вибрационного типа / Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сентября 2016 г. – Донецк: МСМ. – 2016. – Т.2. – С. 103-107

189. Пат. України № 21856, ПМК (2006) А23N 4/00, А23N 12/00. Протирально-сушильний апарат / Поперечний А.М., Миронова Н.О., Варваріна Н.М.; заявник і власник Донецьк. нац. ун-т економ. і тогр. ім. Михайла Туган-Барановського.- заявл 18.08.2006; опубл. 10.04.2007, Бюл. №4. - 4с.: іл..

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Программа расчета в пакете Mathcad коэффициентов регрессии уравнения обобщенной кривой скорости сушки косточек абрикоса

Обозначения:

u – разница текущего и равновесного влагосодержания продукта;

ψ – приведенная скорость сушки;

C_0, C_1, C_2 – коэффициенты регрессии уравнения Г.К. Филоненко (соответственно, n, A, B);

C – вектор-столбец с вычисленными коэффициентами регрессии;

$b(u)$ – найденное уравнение.

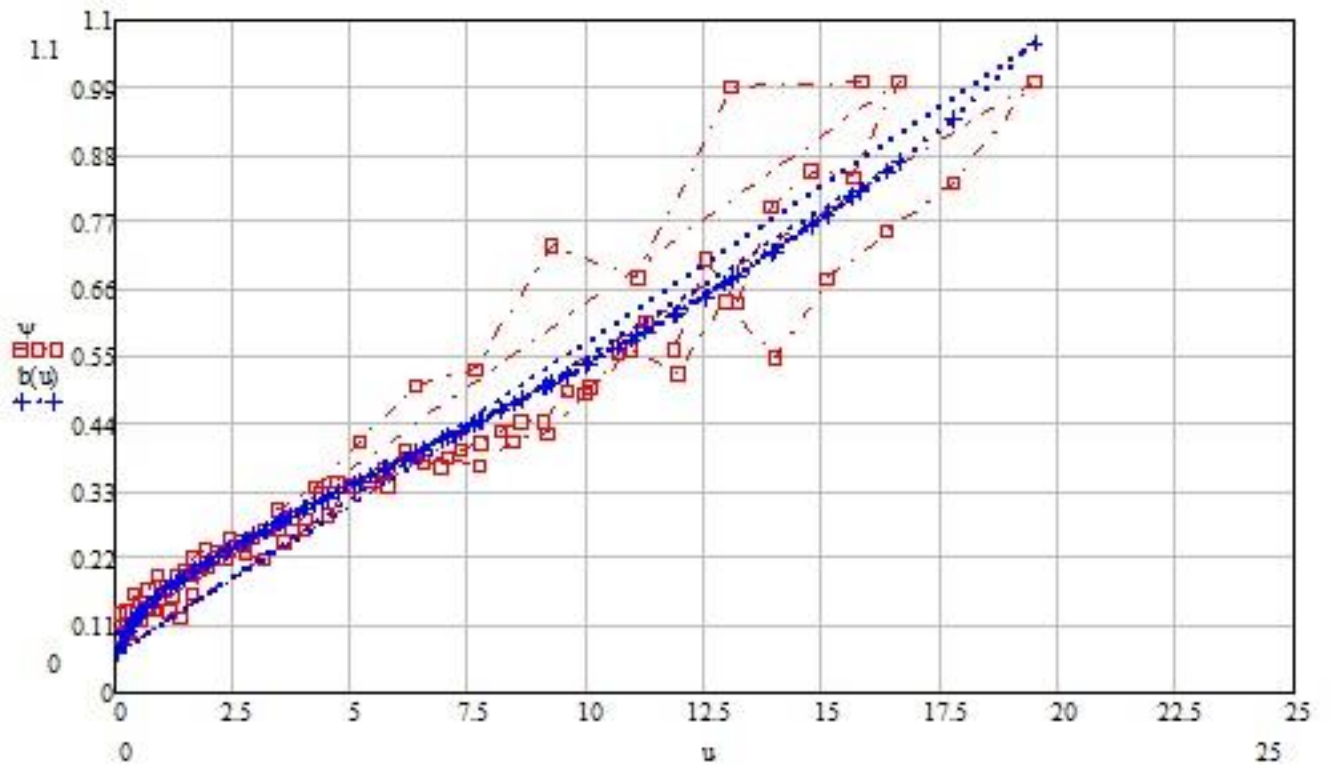
u и ψ – векторы-столбцы, которые содержат данные из кривых сушки и скорости сушки (в программе не показаны, поскольку не помещаются на одной странице).

$$Y(u, C) := \begin{bmatrix} \frac{u^{C_0}}{C_1 + C_2 \cdot u^{C_0}} \\ \frac{u^{C_0} \cdot \ln(u)}{C_1 + C_2 \cdot u^{C_0}} - \frac{C_2 \cdot u^{2 \cdot C_0} \cdot \ln(u)}{(C_1 + C_2 \cdot u^{C_0})^2} \\ \frac{u^{C_0}}{(C_1 + C_2 \cdot u^{C_0})^2} \\ \frac{u^{2 \cdot C_0}}{(C_1 + C_2 \cdot u^{C_0})^2} \end{bmatrix}$$

$$z := \begin{pmatrix} 0 \\ 10 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$C := \text{genfit}(u, \psi, z, Y)$$

$$C = \begin{pmatrix} 0.198 \\ 11.777 \\ -5.597 \end{pmatrix} \quad b(u) := \frac{u^{C_0}}{C_1 + C_2 \cdot u^{C_0}}$$



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Расчёт экономической эффективности работы вибрационной сушилки с ИК-излучением для сушки плодовых косточек.

За базу сравнения показателей экономической эффективности принята шахтная сушилка консервного завода. По действующей технологии сушки свежих плодовых косточек ведется в шахтной сушилке производительностью 3 т/час, при удалении влажности 4% за один цикл.

Для удаления влаги от 23% до 11% необходимо провести 3 цикла. Разработка инфракрасной сушилки для непрерывной сушки косточек с начальным влагосодержанием 23...25% за один цикл позволит:

- интенсифицировать процесс сушки плодовых косточек в 3 раза;
- снизить себестоимость процесса сушки косточек.

Исходные данные для расчета

Показатели	Единицы измерения	Шахтная сушилка	Вибрационная инфракрасная сушилка
Производительность за один цикл при снижении влажности 4% за один цикл	кг/ч	3000	650
Расход жидкого топлива за один цикл	кг/ч	50	-
Расход электроэнергии	кВт/ч	30	48
Площадь, занимаемая оборудованием	м ²	70	5
Снижение влажности за один цикл	%	4	12
Срок службы	год	10	10
Объем внедрения в 2016 году	установок	-	3

Объем производства

Расчет экономического эффекта приведен на одну сушилку. Экономический эффект от производства и использования вибрационной инфракрасной сушилки рассчитывается по формуле:

$$\Xi = (C_1 + E_n \cdot K_1) \cdot \frac{B_2}{B_1} \cdot \frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n} + \frac{(I_1 - I_2) - E_n \cdot (K_2 - K_1)}{P_2 + E_n} - (C_2 + E_n \cdot K_2) \cdot A_2,$$

где: K_1 – удельные капитальные вложения по базовой, руб.;

K_2 – удельные капитальные вложения, включая производственные затраты, приведенные по фактору времени к расчетному году по новой технике, руб.;

$\frac{B_2}{B_1}$ – коэффициент учета роста производительности единицы нового вида

техники по сравнению с базовым;

B_1 и B_2 – годовые объемы продукции (работы), производимые при использовании единицы соответственно базового и нового видов техники, натуральные единицы;

$\frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n}$ – коэффициент учета изменения срока службы нового вида техники

по сравнению с базовым;

P_1 и P_2 – доли отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление (реновацию) базового и нового видов техники (рассчитываются как величины, обратные срокам службы, определяемым с учетом их морального износа), доли единицы;

$\frac{(I_1 - I_2) - E_n \cdot (K_2 - K_1)}{P_2 + E_n}$ – экономия потребителя на текущих издержках

эксплуатации и отчисления от сопутствующих капитальных вложений за весь срок службы нового вида техники по сравнению с базовым, руб.;

K_1 и K_2 – сопутствующие капитальные вложения потребителя (капитальные вложения без учета стоимости базового и нового видов техники) при их использовании в расчете на объем продукции (работы), производимой с помощью нового вида техники, руб.;

C_1 и C_2 – себестоимость единицы при использовании базового и нового видов техники в расчете на объем продукции (работы), производимой с помощью нового вида техники; в этих издержках учитывается только часть амортизации, предназначенная на капитальный ремонт техники, то есть без учета средств на их

реновацию (при сроке службы более одного года), а также амортизационные отчисления по сопутствующим капитальным вложениям; при этом текущие издержки определяются не по полной себестоимости продукции, а без учета общецеховых, общезаводских и внепроизводственных расходов, то есть по изменению только прямых затрат и расходов по содержанию и эксплуатации оборудования, руб.;

I_1 и I_2 – эксплуатационные издержки потребителя;

A_2 – объем производства нового вида техники в расчетном году, натуральные единицы.

Коэффициенты эквивалентности

Коэффициент учета роста производительности инфракрасной сушилки:

$$\frac{B_2}{B_1} = \frac{650}{1000} = 0,65$$

Коэффициент учета срока службы:

$$\frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n} = \frac{\frac{1}{10} + 15}{\frac{1}{10} + 15} = 1$$

Капитальные вложения

Показатели	Шахтная сушилка, руб. (K_1)	Вибрационная инфракрасная сушилка, руб. (K_2)
Стоимость оборудования	1850000	650000
Стоимость транспортировки 10% от стоимости оборудования	185000	65000
Стоимость монтажа оборудования 20% от стоимости оборудования	370000	130000
Итого	2405000	845000

Сопутствующие капитальные затраты по базовому варианту корректируются в расчете на производительность вибрационной инфракрасной сушилки:

$$K_1 = 555000 \cdot 0,65 = 360750 \text{ руб.}$$

Текущие издержки у потребителя. Затраты на электроэнергию. При работе шахтной установки для удаления влаги от 23% до 11% необходимо провести 3 цикла.

Расход электроэнергии составит:

$$90/3000 = 0,03 \text{ кВт/кг.}$$

В расчете на 1 т продукции расход электроэнергии составляет:

$$0,03 \cdot 1000 = 30 \text{ кВт.}$$

Стоимость электроэнергии составит:

$$3,97 \cdot 30 \cdot 400 = 47640 \text{ руб.}$$

При работе на вибрационной инфракрасной сушилке процесс снижения влаги с 23% до 11% происходит в один цикл, расход электроэнергии составляет:

$$48/650 = 0,074 \text{ кВт/кг.}$$

В расчете на 1 т продукции расход электроэнергии составляет:

$$0,074 \cdot 1000 = 74 \text{ кВт.}$$

Стоимость электроэнергии за процесс сушки 400 т плодовых косточек составляет:

$$3,97 \cdot 74 \cdot 400 = 117512 \text{ руб.}$$

Расход жидкого топлива при работе на шахтной установке составляет:

$$150/3000 = 0,05 \text{ кг/кг.}$$

На 1 т:

$$0,05 \cdot 1000 = 50 \text{ кг.}$$

Стоимость жидкого топлива за процесс сушки 400 т плодовых косточек:

$$25 \cdot 50 \cdot 400 = 500000 \text{ руб.}$$

Наименование установки	Амортизационные отчисления (при норме 14% от стоимости оборудования), руб.		Затраты на текущий ремонт и содержание оборудования, (при норме 10%), руб.	
	Всего за год	В расчете на 1 т	Всего за год	В расчете на 1 т
Шахтная сушилка	259000	647,5	185000	462,5
Вибрационная инфракрасная сушилка	91000	227,5	65000	162,5

Сводная таблица текущих издержек у потребителя

Статьи затрат, руб.	Шахтная сушилка (I_1)	Вибрационная инфракрасная сушилка (I_2)
Затраты на электроэнергию	47640	117512
Затраты на жидкое топливо	500000	-
Амортизационные отчисления	259000	91000
Отчисления на текущий ремонт и содержание оборудования	185000	65000
Итого	991640	273512

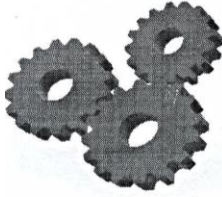
Годовые текущие издержки по базовому варианту корректируются в расчете на производительность вибрационной инфракрасной сушилки:

$$I_1 = 991640 \cdot 0,65 = 644566 \text{ руб.}$$

Экономический эффект:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = & (1850000 + 0,15 \cdot 360750) \cdot 0,65 + (644566 - 227336) - 0,15 \cdot (195000 - 360750) / 0,1 + 0,15 - \\ & - (650000 + 0,15 \cdot 195000) \cdot 1 = 2142091 \text{ руб.} \end{aligned}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

**ООО «РАДУГА»***ДНР, 83085, г. Донецк, ул. Прокофьева, 9 в**р/с 26005010620100 в Отделении № 0001/26 г. Донецка ЦРБ ДНР**МФО 400019 ОКПО 31445274**Св-во 200090309 ИНН 314452705611**Тел/факс (062) 201-90-13, 387-11-70*

E-mail radugagroup@ukr.net

Акт**о внедрении результатов диссертационного исследования**

В 2016 г. ООО «Радуга» приняла к использованию техническую и конструкторскую документацию вертикальной вибросушилки с инфракрасными излучателями для промышленной реализации.

Техническая и конструкторская документация разработана соискателем ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского» Мироновой Надеждой Александровной в результате выполнения диссертационного исследования на тему «Экспериментальные исследования процесса сушки плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое».

Предложенная конструкция вертикальной вибросушилки характеризуется компактностью, что позволит эффективно совмещать процесс сушки с вертикальной транспортировкой дискретного материала, эксплуатационной надежностью в связи с отсутствием цепных, винтовых, ленточных, тяговых органов, высокой степенью герметичности и, соответственно, отсутствием пылеобразования, возможностью сохранения производственных площадей благодаря совмещению технологических и транспортирующих операций в одном агрегате, созданием благоприятные условия для комплексной механизации и автоматизации производственных процессов.

Директор ООО «Радуга»



В.Ф. Мещеряков

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



**Министерство образования и науки
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**Государственная организация высшего профессионального образования
«Донецкий национальный университет экономики и торговли
имени Михаила Туган-Барановского»**

ул. Щорса 31, г. Донецк, 283050 Тел.:342-90-40 Факс: (062)304-83-16 Эл. почта:info@donnuet.education

27.09.2017 № 08.14/1227 Диссертационный совет Д 01.016.03 при
на № _____ от _____ Донецком национальном университете

Г

Г

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Мироновой Н.А. на тему «Экспериментальные исследования процесса сушки
плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Результаты исследований, которые представлены в диссертационной
работе Мироновой Н.А. «Экспериментальные исследования процесса сушки
плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое»,
используются в учебном процессе при изложении дисциплин «Процессы и
аппараты пищевых производств», «Технологическое оборудование пищевых
производств в отрасли», а также «Теоретические основы и современные методы
интенсификации технологических процессов пищевых производств» для
студентов технических специальностей.

Использование в учебном процессе результатов диссертационной работы
Мироновой Н.А. является целесообразным для повышения уровня подготовки
студентов в направлении более углубленного овладения материала по
термической обработке продукта.



Первый проректор
д-р.э.н. профессор

Л.А. Омелянович