

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
ГО ВПО «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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2017

Работа выполнена на кафедре оборудования пищевых производств ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского», г. Донецк.

Научный
руководитель:

доктор технических наук, профессор
Поперечный Анатолий Никитович

Защита состоится « ____ » _____ 20__ года в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 01.016.03 при ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» по адресу: 83001, г. Донецк, проспект Театральный 13, ауд. 264.
Тел. факс: +38(062)302-06-00, e-mail: d0101603-donnu@ya.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донецкого национального университета по адресу: 83001, г. Донецк, ул. Университетская 24, <http://donnu.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.016.03

Моисеенко Игорь Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 аппаратурно-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 теплообмена 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и сформулировано направление исследований.

В первом разделе диссертации «Обзор и анализ литературных источников по переработке вторичных сырьевых ресурсов в пищевой промышленности» рассмотрены вопросы о существующих направлениях использования, способах и оборудовании для переработки вторичных сырьевых ресурсов плодоовощного производства.

Обоснован выбор объекта исследований на основе подтвержденных данных о повышенной пищевой и биологической ценности плодовых косточек, обобщены сведения о современных способах сушки и проведен анализ особенностей сушки

косточек, а также выполнен поиск рациональных способов сушки плодовых косточек.

Выявлено, что наиболее целесообразным способом сушки плодовых косточек является комбинация ИК-излучения и виброкипящего слоя.

Доказана необходимость дальнейших теоретических и экспериментальных исследований влияния различных параметров ИК-излучения и виброкипящего слоя на кинетику и продолжительность сушки плодовых косточек, а также удельные энергозатраты и определения рациональных параметров процесса сушки плодовых косточек с предложением конструктивного решения аппаратов для практического внедрения исследованных процессов.

Во втором разделе «Экспериментальные установки и методики исследований» представлены общие методики исследований: теплофизических и физико-геометрических характеристик плодовых косточек, параметров вибрации на характер перемещения продукта, тепло-массообмена (сушки) плодовых косточек ИК-излучением в виброкипящем слое.

Определение коэффициента теплопроводности осуществлялось зондовым методом в соответствии с ДСТУ Б В.2.7-40-95, ГОСТ 30256-94.

Для определения плотности плодовых косточек и их ядер использовали пикнометрический метод с постоянной меткой 100 мл.

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.

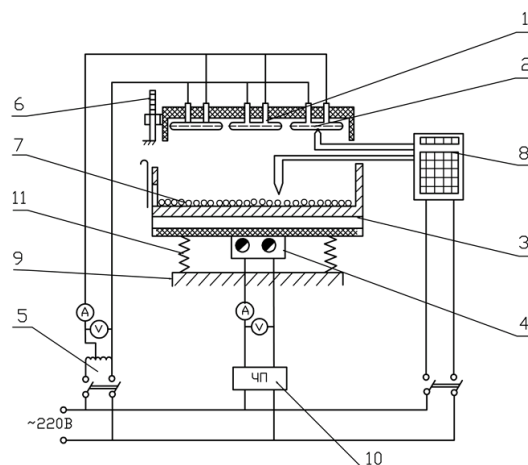
В качестве базовых геометрических характеристик плодовых косточек и их ядер определялись линейные размеры, масса и объем случайной выборки. Для косточек и ядер абрикоса также определялась площадь поверхности.

Анализ полученных физико-геометрических характеристик плодовых косточек проводили методом математической статистики. Проверка гипотезы о нормальном распределении линейных размеров и массы косточек и их ядер осуществляли по критерию Пирсона, показателям асимметрии и эксцесса. Теснота связей между отдельными характеристиками оценивались с помощью коэффициента корреляции. Количественные зависимости между отдельными характеристиками получены с помощью метода наименьших квадратов. Их адекватность проверена критерием Фишера, теснота связи экспериментальных и расчетных данных – коэффициентом корреляции, значимость коэффициентов регрессии – критерием Стьюдента.

Для исследования кинетики процесса сушки плодовых косточек ИК-излучением в виброкипящем слое и определения рациональных параметров процесса была создана экспериментальная установка, представленная на рисунке 1.



а



б

Рисунок 1: а - внешний вид экспериментальной установки;
 б - принципиальная схема экспериментальной установки для сушки плодовых косточек ИК-излучением в виброкипящем слое: 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

В третьем разделе «Моделирование процесса сушки плодовых косточек» проведено планирование полнофакторного эксперимента, обработка результатов экспериментальных исследований и выполнен их анализ.

Выявление рациональных условий проведения процесса сушки плодовых косточек осуществляли методом ротатбельного композиционного планирования второго порядка (план Бокса).

Функцией отклика, характеризующей процесс, была выбрана 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 (%).

В результате создания матрицы планирования эксперимента, расчетов коэффициентов регрессии и проверки их на значимость получена следующая модель процесса сушки плодовых косточек абрикоса:

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

Полученное уравнение регрессии для плодовых косточек черешни имеет вид:

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

В четвертом разделе «Результаты экспериментальных исследований процессов обработки плодовых косточек» представлены результаты экспериментальных исследований теплофизических и физико-геометрических характеристик плодовых косточек, влияния параметров вибрации на характер перемещения продукта, кинетики влагосодержания и температуры при сушке плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое.

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, описанным во втором разделе 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 влагосодержаний.

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 $29,8...5,2\%$:

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

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

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

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

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

Для косточек и их ядер определены ряд физико-геометрических характеристик и произведен их статистический анализ.

На рисунках 2, 3 приведены полученные вариационные кривые линейных размеров и массы косточек абрикоса.

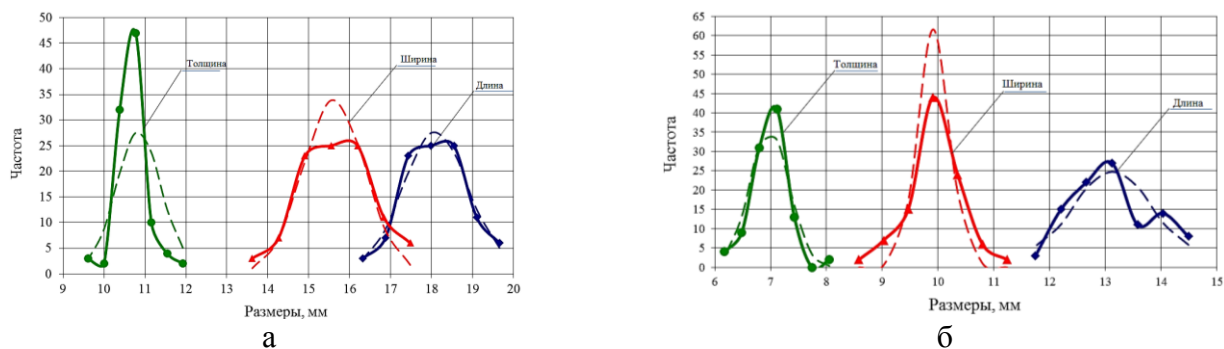


Рисунок 2 - Вариационные кривые линейных размеров косточек абрикоса (а) и их ядер (б)

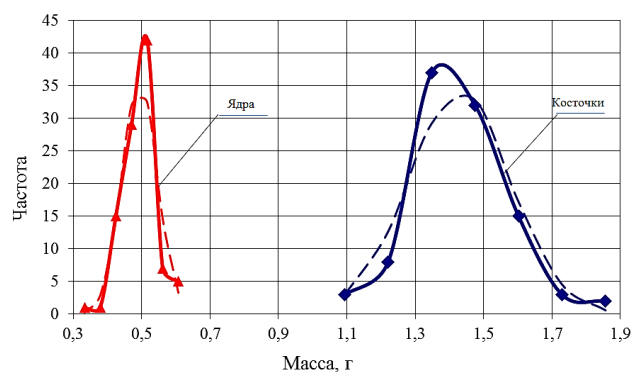


Рисунок 3 - Вариационные кривые массы косточек абрикоса и их ядер

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:

- для косточек абрикоса

$$V = 1,45_0 l^{0,7} a^{0,9} b^1, \quad (3)$$

- для ядер косточек абрикоса

$$V = 1,8_0 l^{0,48} a^{1,14} b^{0,85}, \quad (4)$$

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

Статистический анализ геометрических характеристик плодовых косточек показал целесообразность проведения сортировки перед их сушкой.

Экспериментальным путем были определены параметры вибрации рабочего органа, подтверждающие аналитические предпосылки о характере виброперемещения: амплитуда колебаний $A=3\text{мм}$, ускорение вибрации $a=45\dots55\text{м/с}^2$, которые обеспечивают протекание процесса сушки импульсами в сочетании периодов воздействия на косточки ИК-лучей и «отдыха». При соблюдении такого режима исключается возможность перегрева продукта, обеспечивается равномерное повышение температуры в полном объеме продукта и значительная интенсификации удаления влаги из него.

Обобщение результатов экспериментальных исследований процесса сушки плодовых косточек проводилось путем анализа кривых сушки и скорости сушки

(рисунки 4,5), термограмм (рисунок 6), температурных кривых, кривых изменения приведенных энергозатрат, продолжительности сушки, а также изменения числа Рейбиндера и теплового потока, поглощаемого продуктом, в процессе сушки (рисунок 9).

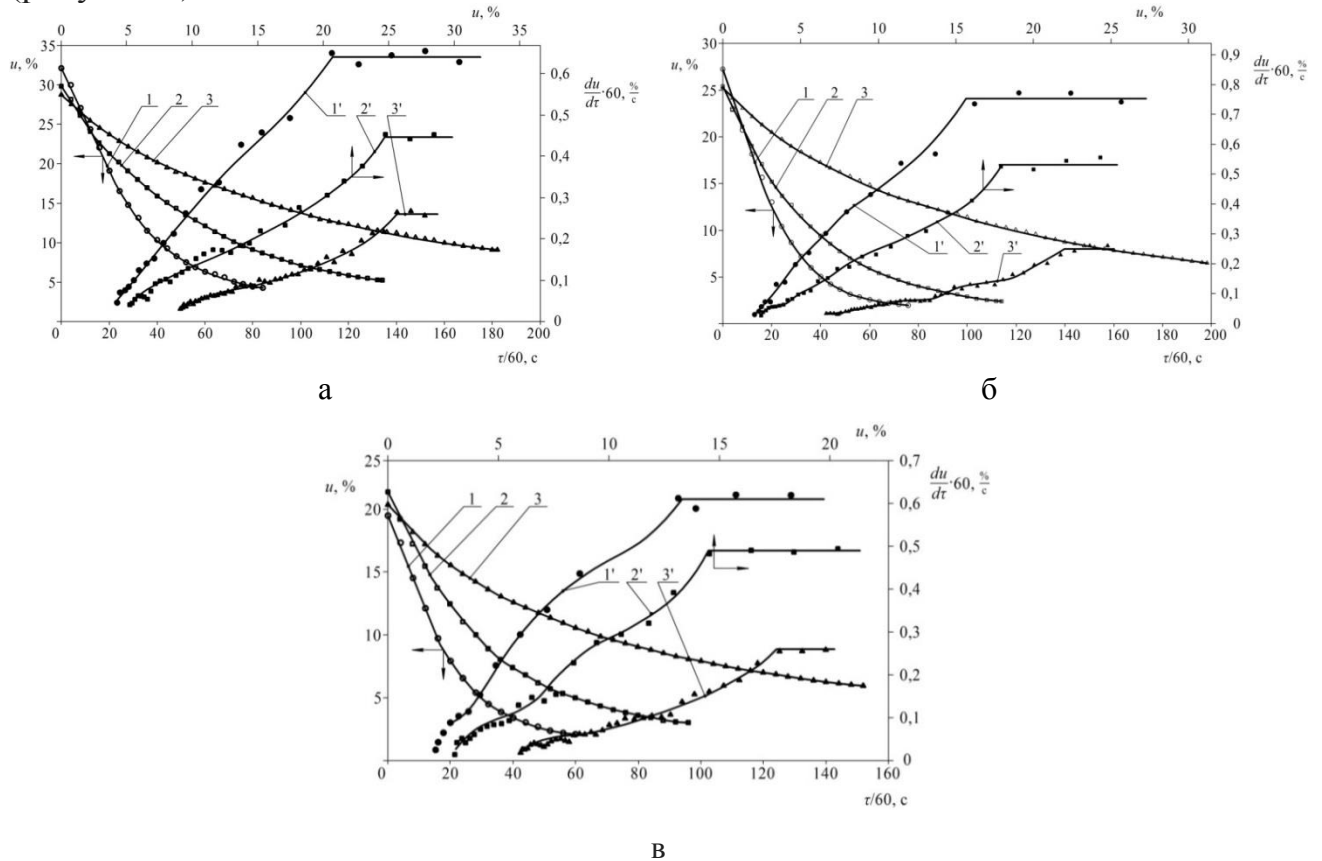


Рисунок 4 - Кривые сушки (1-3) и скорости сушки (1'-3 ') косточек (а- абрикоса; б- вишни; в- черешни) в зависимости от плотности теплового потока инфракрасного облучения:
1, 1' - 1400 W/m^2 ; 2, 2' - 900 W/m^2 ; 3, 3' - 400 W/m^2

Экспериментально установлено, что при сушке ядер и оболочек косточек отдельно значительно повышается интенсивность процесса, так для оболочек процесс сушки до равновесного влагосодержания протекает в 2 раза быстрее, для ядер - в 1,17 (рисунок 5).

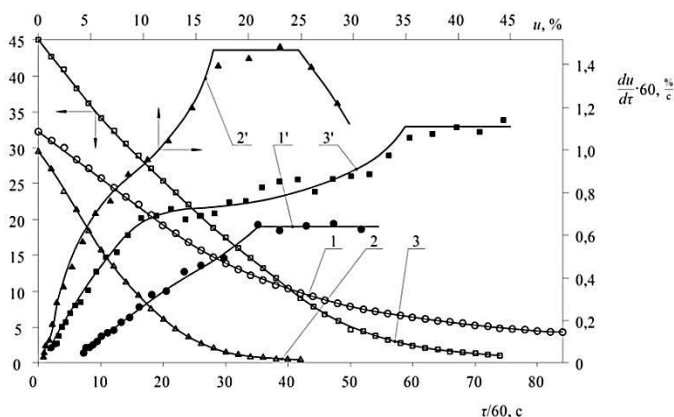


Рисунок 5 - Кривые сушки (1-3) и скорости сушки (1'-3 ') косточек абрикоса, их оболочек и ядер при плотности теплового потока инфракрасного облучения 1400 W/m^2 :
1, 1'- косточки; 2, 2'- оболочки;
3, 3' - ядра

Полученные данные по кинетике сушки исследованных плодовых косточек в зависимости от плотности теплового потока инфракрасного облучения сведены в таблицах 1-3.

Таблица 1- Данные кинетики 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

Таблица 2- Данные кинетики 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

Таблица 3- Данные кинетики 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

На рисунке 6 приведены термограммы косточек абрикоса, которые соответствуют кривым сушки и скорости сушки (рисунок 4а). Термограммы 1

соответствуют середине оболочки, термограммы 2 - центра 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 инфракрасного облучения.

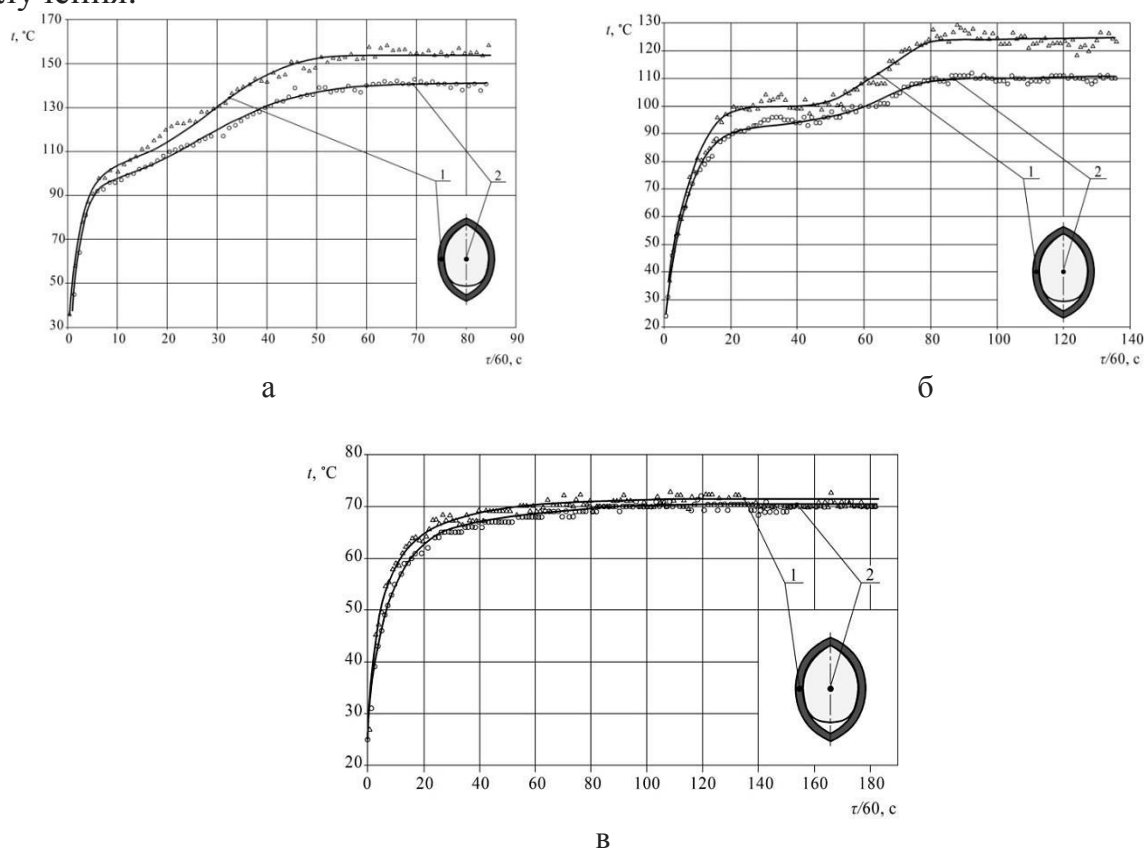


Рисунок 6 - Термограммы косточек абрикоса в зависимости от плотности теплового потока инфракрасного облучения:
а - 1400 Вт/м^2 ; б - 900 Вт/м^2 ; в - 400 Вт/м^2

Анализ кривых на рисунке 7 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.

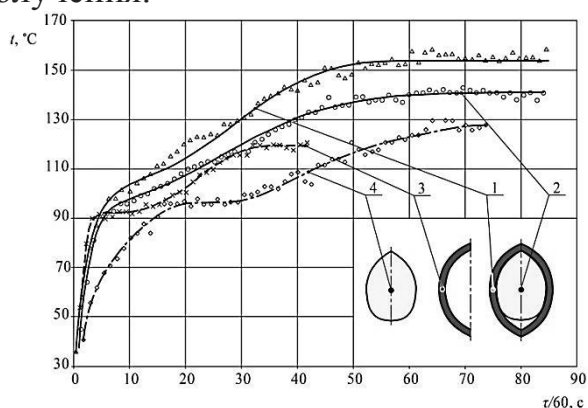


Рисунок 7 - Термограммы косточек абрикоса, их оболочек и ядер при плотности теплового потока инфракрасного облучения 1400 Вт/м^2 :
1 - оболочка (в составе косточки); 2 - ядро (в составе косточки); 3 - оболочка (отдельно); 4 - ядро (отдельно)

Для оценки химических преобразований в ядрах косточек в процессе сушки нами определен один из основных показателей качества растительного масла - кислотное число, полученные данные по кинетике нагрева плодовых косточек сведены в таблицу 4.

Таблица 4 - 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
Максимальна 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
Максимальна температура центра ядра, °С	137	109	56
Кислотное число, мг КОН/г	3,92	2,27	1,79

Анализируя полученные показатели кислотного числа, согласно техническим условиям ГОСТ 300306-95 «Масло из плодовых косточек и орехов миндаля можно утверждать, что сушку исследуемых плодовых косточек целесообразно проводить при плотности теплового потока 400...900 Вт/м², что позволяет достичь высокой интенсивности процесса с сохранением качества масла, которое содержится в ядрах косточек.

Исследование количественных закономерностей процесса сушки плодовых косточек проводили путем использования основного уравнения кинетики сушки, позволяющее рассчитать тепловой поток, поглощаемый продуктом в процессе сушки:

$$q = \rho_0 R_v r_g \frac{du}{d\tau} (1 + Rb), \quad (5)$$

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

Rv – 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.

Методом приведенной скорости сушки, на основе анализа данных экспериментальных исследований процесса сушки плодовых косточек, установлена связь между скоростью сушки и влажностью материала. Для этого были построены кривые скорости сушки плодовых косточек при использовании уравнения Филоненко. Для каждого исследованного вида косточек нами рассчитаны уравнения обобщенных кривых скорости сушки

При проведении соответствующих вычислений в математическом пакете Mathcad с помощью метода наименьших квадратов для второго периода сушки получены уравнения обобщенных кривых скорости сушки:

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

$$\text{- для косточек вишни } \frac{du/d\tau}{N} = \frac{(u - u_p)^{0,365}}{9,59 - 2,85(u - u_p)^{0,365}}; \quad (7)$$

$$\text{- для косточек черешни } \frac{du/d\tau}{N} = \frac{(u - u_p)^{0,403}}{12,22 - 2,78(u - u_p)^{0,403}}. \quad (8)$$

где: $du/d\tau$ – скорость сушки, %/с;

N – скорость сушки в первом периоде, %/с;

u – текущее влагосодержание, %;

u_p – равновесное влагосодержание, %.

Сравнение расчетного значения критерия Фишера с критическим свидетельствует об адекватности полученных уравнений.

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 определялось по формуле:

$$Rb = \frac{c_n}{r_g} \cdot b, \quad (9)$$

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

$b = 100dt/du$ – температурный коэффициент сушки,

r_g – удельная теплота испарения влаги, кДж/кг.

Получены графики изменения числа Ребиндера и теплового потока в процессе сушки (рисунки 8,9).

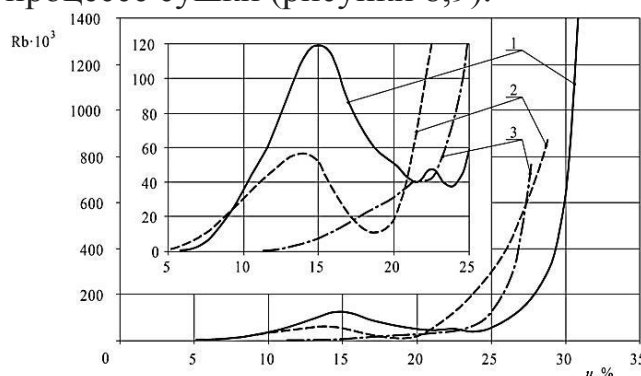


Рисунок 8 - Изменение числа Ребиндера косточек абрикоса в процессе сушки при различных значениях плотности теплового потока инфракрасного облучения: 1 - 1400 Вт/м²; 2 - 900 Вт/м²; 3 - 400 Вт/м²

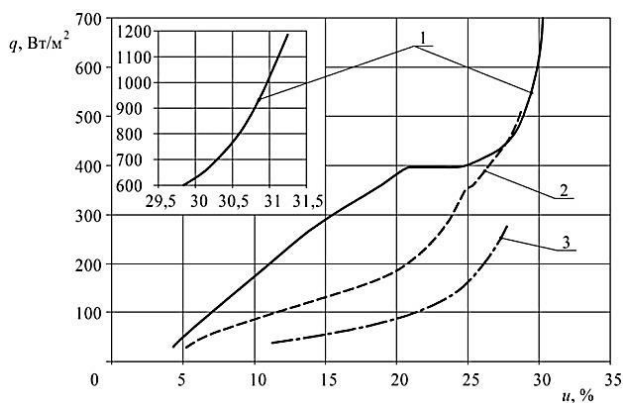


Рисунок 9 - Изменение теплового потока, который поглощается косточками абрикоса в процессе сушки, в зависимости от плотности теплового потока инфракрасного облучения: 1 - 1400 Вт/м²; 2 - 900 Вт/м²; 3 - 400 Вт/м²

Пятый раздел диссертации «Разработка способа и промышленного оборудования для сушки плодовых косточек» освещает вопросы разработки и реализации нового способа и оборудования для сушки плодовых косточек на консервных и масложировых предприятиях.

Описаны конструкции разработанных аппаратов, которые предложены для обработки плодовых косточек: протирочно-сушильный аппарат, вертикальная вибросушилка с ИК-излучением (рисунок 10).

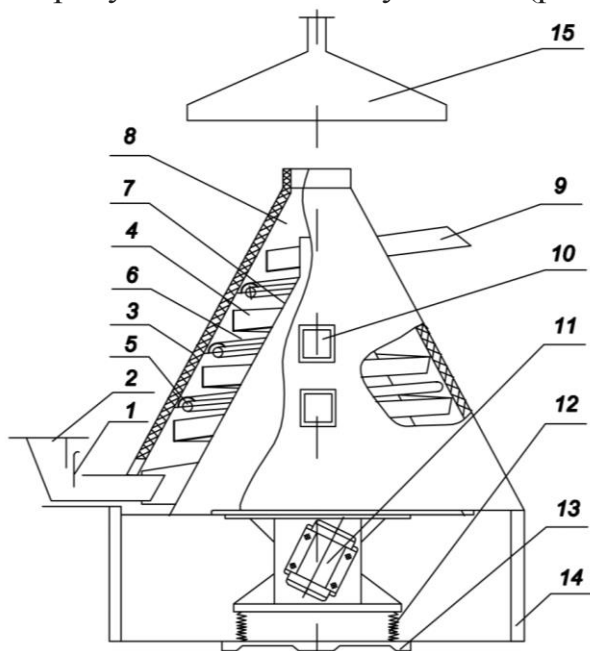


Рисунок 10 - Вертикальная вибросушилка с ИК-излучением:
 1- шибер; 2- загрузочный бункер;
 3- ограждения с теплоизоляцией - кожух разъемный; 4- лоток спиральный;
 5- ИК-излучатели (ТЭНы);
 6- отражатели; 7- труба коническая;
 8- патрубок удаления влаги;
 9- разгрузочный лоток; 10- смотровой люк; 11- привод мотор-вibrator;
 12- пружина витая-амортизатор;
 13- подставка; 14- стойка крепления кожуха; 15- вентиляционный зонт

Разработана инженерная методика проектного расчета промышленной сушильной установки.

Проведены внедрения результатов исследований в производство. экономический расчет показывает, что ожидаемый годовой эффект результатов исследований 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 аппаратурно-методический комплекс для исследования теплофизических и физико-геометрических характеристик, особенностей влияния параметров вибрации на характер перемещения продукта, 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, играющих 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.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в научных изданиях из перечня ВАК ДНР:

1. Поперечный, А.М. До визначення швидкості транспортування твердої частинки в апараті з пружно деформуючим робочим органом [Текст] / А.М. Поперечный, О.І. Баришев, **Н.О. Миронова** // Вісник ДонНУЕТ: науковий журнал №1(33), 2007.- Донецьк, 2007. – С. 93-100.

2. 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». – Россия: Санкт-Петербург, - №1, 2015. – С. 142-149.

3. 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 №6(6), 2016. – Донецк, 2016. – С. 44-52.

4. 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.

5. Поперечный, А.Н. Кинетика температурных полей плодовых косточек при инфракрасной сушке в виброкипящем слое: [Текст] / А.Н. Поперечный, **Н.А.Миронова** // Вестник ДонНТУ: международный научно-технический журнал №1(6), 2017.- Донецк, 2017. – С. 43-47.

Публикации в других научных изданиях.

6. Поперечный, А.М. Кінетика процесу сушіння плодкових кісточок у віброкиплячому шарі при інфрачервоному нагріванні [Текст] / А.М. Поперечный, **Н.О.Миронова** // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків, 2007. – Вип. 58. – С. 122 - 128.

7. Поперечный, А.М. Основні геометричні і фізичні параметри плодкових кісточок [Текст] / А.М. Поперечный, Н.М. Варваріна, В.Г. Корнійчук, **Н.О.Миронова** // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. – Донецьк, ДонДУЕТ, 2010. – Вип. 23. – С. 28-33.

8. Поперечний, А.М. Дослідження фізико-механічних характеристик кісточок абрикосу [Текст] / А.М. Поперечний, І.В. Жданов, **Н.О. Мironova** // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. / Голов. Ред. О.О. Шубін. - 2014. - Вип. 32. С. 74-82.

9. 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.
Поперечный А.Н.

10. Поперечный, А.Н. Теоретические предпосылки ИК-нагрева плодовых косточек [Текст] / А.М. Поперечний, І.В. Жданов, **Н.О. Мironova** // Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: вісник Харківського нац. техн. університету сільського господарства імені Петра Василенка. - Харків, 2014.- Вип. 152, С. 215-221.

11. Поперечный, А.Н. Теоретическое обоснование параметров и режимов вибрационного транспортирования плодовых косточек [Текст] / А.Н. Поперечный, **Н.А. Мironova** // Оборудование и технологии пищевых производств: темат. сб. наук. раб. №1(34), 2017. – Донецк, 2017. – С. 113-221.

12. Поперечний, А.М. Кінетика сушіння кісточок черешні при радіаційному теплопідведенні [Текст] / А.М. Поперечний, І.В. Жданов, **Н.О. Мironova** // 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.

13. Поперечный, А.Н. Сушка плодовых косточек с применением инфракрасного теплоподвода: [Текст] / А.Н. Поперечный, І.В. Жданов, **Н.А. Мironova** // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. IX Междунар. науч. конф. студентов и аспирантов, 24-25 апреля 2014 г., Могилев/УО «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев: УО МГУП, 2014. - С. 65-67.

14. Поперечний, А.М. Кінетика сушіння кісточок вишні при радіаційному теплопідведенні [Текст] / А.М. Поперечний, І.В. Жданов, **Н.О. Мironova** // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Актуальні проблеми харчової промисловості». Тернопіль, 8-9 жовтня 2013 р.: матеріали конференції.- Тернопіль: В-во ТНТУ, 2013.- С. 41-42.

15. Поперечный, А.Н. Основные геометрические и физические параметры плодовых косточек [Текст] / А.Н. Поперечный, **Н.А. Мironova** // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. VI Междунар. науч. конф. студентов и аспирантов, 24-25 апреля 2008 г., Могилев / УО «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев: УО МГУП, 2008. - С. 43-44.

16. Поперечний, А.М. Передумови аналітичних досліджень сушіння плодів кісточок [Текст] / А.М. Поперечний, І.В. Жданов, **Н.О. Мironova** // 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.

17. Поперечний, А.М. Дослідження процесу сушіння кісточок плодів гліду у віброкиплячому шарі за допомогою ІЧ – нагрівання [Текст] / А.М.Поперечний, **Н.О.Миронова** // Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка: Тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. 12-14 вересня м. Святогірськ. – Донецьк, ДонНУЕТ, 2007. - С. 98-99.

18. 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.-Ч. 1, С. 368-369.

19. Поперечний, А.М. Кінетика сушіння кісточок у віброкиплячому шарі при радіаційному теплопідведенні [Текст] / А.М. Поперечний, 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.

20. Поперечный, А.Н. Определение коэффициента теплопроводности плодовых косточек [Текст] / Д.В. Амангалиев, А.Н. Поперечный, И.В. Жданов, **Н.А. Миронова** // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. IX Междунар. науч. конф. студентов и аспирантов, 24-25 апреля 2014 г., Могилев / УО «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев: УО МГУП, 2014. - С. 43-44.

21. 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 трудов V Междунар. науч.-техн.конф. – Россия: Иван. гос. хим. технолог. ун-т. Иваново, 2014. –Т.1 – С. 186-189.

22. Поперечный, А.Н. Интенсификация процессов переработки плодовых косточек [Текст] / А.Н. Поперечный, В.Г. Корнийчук, **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.

23. Поперечный, А.Н. О конструировании теплообменного аппарата вибрационного типа [Текст] / А.Н. Поперечный, **Н.А. Миронова** // 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.

24. Поперечный, А.Н. Теоретическое обоснование конструктивных параметров привода вибрационного рабочего органа сушильной установки

[Текст] / А.Н. Поперечный, **Н.А. Миронова** // Явления переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств: матер. II Междунар. науч.- практ. конф. / Воронеж. гос. ун-т инж. технол. – Воронеж: ВГУИТ, 2016. С. 298-301.

25. Поперечный, А.Н., **Миронова Н.А.** Моделирование процесса сушки плодовых косточек // 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. – С. 79-83.

26. Поперечный А.Н. Сушка нетрадиционного пищевого и лекарственного сырья: монография / А.Н. Поперечный, В.Г. Корнийчук, **Н.А. Миронова**, И.В. Жданов, С.А. Боровков – Краматорск: «Каштан», 2016. – 250с.

Патенты.

27. 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..

28. 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..

29. 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..

АННОТАЦИЯ

Миронова Н.А. Экспериментальные исследования процесса сушки плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика» - ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михайла Туган-Барановского», Донецк, 2017.

В работе исследован комбинированный процесс сушки плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое.

Разработан аппаратурно-методический комплекс для проведения экспериментальных исследований процесса сушки плодовых косточек ИК-излучением в виброкипящем слое. Исследованы количественные закономерности процесса сушки плодовых косточек на основе анализа данных экспериментальных теплофизических исследований. Получены уравнения обобщенных кривых скорости сушки и значения массообменных коэффициентов и критических влагосодержаний, характеризующих перемещение влаги внутри плодовых косточек. Установлена взаимосвязь между теплообменом и

массообменом при помощи основного критерия кинетики процесса сушки - критерия Ребиндера. Установлены новые научные данные о рациональных рабочих параметрах процесса сушки ИК-излучением в виброкипящем слое. Разработаны запатентованные способ и конструкция промышленной виброосушки с ИК-излучением с учетом полученных теоретических и экспериментальных данных. Разработана инженерная методика проектного расчета промышленной сушильной установки.

Ключевые слова: процесс сушки, инфракрасное излучение, виброкипящий слой, плодовые косточки.

ABSTRACT

Myronova N.A. Experimental studies of the process of drying fruit beads by infrared radiation in the vibro-boiling layer

Thesis on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences, specialty 05.14.04 «Industrial Heat-and-Power Engineering» - Donetsk National University of Economics and Trade Named after Mykhayilo Tugan-Baranovsky, Donetsk, 2017.

In the paper, a combined process of drying fruit beads by infrared radiation in a vibro-boiling layer was investigated.

An instrument-methodological complex was developed for carrying out experimental studies of the process of drying fruit seeds with infrared radiation in the vibro-boiling layer. Quantitative regularities in the process of drying fruit pits are investigated on the basis of an analysis of experimental thermophysical data.

Equations of generalized drying rate curves and the values of mass transfer coefficients and critical moisture content characterizing the moisture transfer within the fruit bones are obtained. The relationship between heat exchange and mass transfer is established using the main criterion of kinetics of the drying process - the Rebinder test. New scientific data have been established on the rational operating parameters of the drying process by infrared radiation in the vibro-boiling layer. A patented method and design of an industrial vibration drier with IR radiation has been developed, taking into account the theoretical and experimental data obtained. An engineering technique for the design calculation of an industrial drying plant has been developed.

Key words: infrared radiation drying, kinetics, vibration, fruit ossicles.