

*На правах рукописи*

**Ахмедьянова Елена Наильевна**

**СУШКА АБРИКОСОВ И ЯДЕР ПОДСОЛНЕЧНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
СВЧ УСТРОЙСТВА**

Специальность 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева»

Научный руководитель:	<b>Сторчевой Владимир Федорович</b> , доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизации и роботизации технологических процессов им. академика И.Ф. Бородина» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева
Официальные оппоненты:	<b>Белов Александр Анатольевич</b> , доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории электрофизического воздействия на сельскохозяйственные объекты и материалы ФГБНУ ФНАЦ ВИМ;  <b>Вендин Сергей Владимирович</b> , доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрооборудования и электротехнологий в АПК, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имени В. Я. Горина»
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный аграрный университет»

Защита состоится 23.11.2023 г., в 11.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел/факс: 8 (499) 976-21-84.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева и на сайте Университета [www.timacad.ru](http://www.timacad.ru).

Автореферат разослан «    »                      2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

\_\_\_\_\_

Н. Н. Пуляев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Переработка и хранение продуктов сельского хозяйства и их дальнейшее использование важная проблема, которой должно уделяться особое внимание. Особое место в процессе переработки и подготовки к хранению играет сушка сельхозпродукции. Человечество издревле высушивало различные объекты, но сам процесс сушки многостадийный и достаточно сложный для исследования и крайне энергозатратный. В настоящее время в сельском хозяйстве используются различные виды сушильных устройств, эффективность применения которых во многом определяется высушиваемым продуктом.

Для повышения энергоэффективности сушки мы выбрали ряд культур: плоды абрикосов и ядра подсолнечника. Эти культуры были выбраны с тем расчетом, что их химико-физические показатели структуры и влагосодержания различны. Большинство основных высушиваемых культур имеют влагосодержание меньше, чем в плодах абрикосов, но больше чем в ядрах подсолнечника.

Актуальным является снижение энергозатрат за счет совершенствования конструкции сушильных комплексов и определения эффективных алгоритмов управления процессом сушки для рассматриваемых культур.

**Степень разработанности темы.** Анализ исследований позволил выделить большое количество работ, как отечественных научных коллективов, так и зарубежных учёных, посвящённых повышению эффективности переработки продуктов сельского хозяйства. Хорошо проработаны вопросы организации процесса сушки в сушильных установках без рециркуляции. Значительные успехи достигнуты в области исследования теплообмена на границе высушиваемого материала. Так, весомый вклад в разработку проблемы повышения эффективности сушки внесли коллективы под руководством Гомонай М.В., Диденко В.Н., Рудобашты С.П., Васильева А.Н., Бородина И.Ф. и др. Процесс влагоудаления сочетающий процессы диффузии, обмена теплотой и массой детально рассмотрен в работах Лыкова М.В., Сажина Б.С., Амирханова И.В., Гамаюнова Н.И., Красухина Л.П. и др.. В технологии сушки можно выделить основные тенденции: использование аппаратов с высокими коэффициентами тепломассообмена – они дают высокие скорости влагоудаления, что позволяет реализовывать процесс на малогабаритных, энергонасыщенных установках, но, как правило, не обеспечивают равномерную влажности продукта. Кроме того, эти аппараты несколько проигрывают в эффективности использования тепловых источников системам с регенерацией тепловой энергии. Учитывая, что задача повышения энергоэффективности и повышения качества сырья преобладающая, разработка установок теплоутилизации и нахождение параметров ускорения влагоудаления путём совершенствования осциллирующих режимов сушки с использованием СВЧ-нагревателя является актуальной задачей. Необходимо отметить, что весомый вклад в развитие СВЧ технологии внесли школы под руководством наших соотечественников: Новиковой Г.В. Андреева С.А.,

Сторчевого В.Ф., Попова В.М., Башилова А.М., Васильева А.Г., Белова А.А., Будникова Д.А., Касаткина В.В., Жданкина Г.В. и др.

**Цель исследования:** обоснование параметров СВЧ установки, позволяющей повысить эффективность влагоудаления из абрикосов и ядер подсолнечника путём использования регенеративного вращающегося воздухонагревателя.

**Объект исследования:** процесс влагоудаления из абрикосов и ядер подсолнечника, реализуемый под воздействием электромагнитного поля сверхвысокой частоты и регенерации отводимого воздуха

**Предмет исследования:** технические решения и методики, направленные на снижение энергетических затрат в установках СВЧ сушки сельскохозяйственной продукции.

**Задачи исследования:**

1. Проанализировать существующие методы и средства сушки абрикосов и ядер подсолнечника с использованием конвективного и СВЧ подвода тепла.

2. Разработать математическую модель процесса влагоудаления с использованием конвекционного и СВЧ нагрева.

3. Разработать методику расчёта новой конструкции вращающегося воздухонагревателя сушильного агента для установок удаления влаги из сельскохозяйственной продукции.

4. Провести экспериментальные исследования по снижению энергетических затрат при использовании осциллирующих режимов сушки плодов абрикосов, ядер подсолнечника путем использования СВЧ-установки оснащённой вращающимся регенеративным воздухонагревателем.

Работа выполнена в соответствии с Федеральным законом «О качестве и безопасности пищевых продуктов» от 02.01.2000 №29-ФЗ (ред. от 23.04.2018). Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 4.3.2.

**Научная новизна работы:**

1. Определены зависимости интенсивности внутренней транспортировки влаги на примере плодов абрикосов и ядер подсолнечника при использовании конвекционного и СВЧ способа подвода тепла, отличающиеся от известных дискретных зависимостей непрерывным характером расчёта и уточнёнными коэффициентами регрессионных зависимостей, обеспечивающими интервал ошибки скорости влагоудаления менее 3%.

2. Разработана новая математическая модель процесса влагоудаления с использованием СВЧ и конвекционного нагрева с системой регенерации тепла и системой транспортировки плодов абрикосов и ядер подсолнечника вращающимся шнеком.

3. Разработаны новые подходы к проектированию, регенеративных вращающихся нагревателей, объединяющих транспортные функции и функции нагрева сушильного агента для установок влагоудаления сельхоз продукции.

4. Научно обоснованы осциллирующие режимы сушки применительно к процессам влагоудаления из плодов абрикосов и ядер подсолнечника в установках с комбинированным конвекционным и СВЧ-нагревом с целью повышения энергоэффективности процесса.

**Теоретическая и практическая значимость работы** определены следующими основными результатами:

1. Предложены способ и математическая модель процесса влагоудаления с использованием конвекционного и СВЧ нагрева, позволяющая увеличить точность расчётов интенсивности влагоудаления путём учёта физических особенностей переноса влаги в капиллярно-пористых телах.
2. Разработана методика и определены зависимости интенсивности внутренней транспортировки влаги как при наличии пульсационного подвода тепла конвекцией, так и при подводе энергии СВЧ нагревом на примере абрикосов и ядер подсолнечника.
3. Разработана методика расчёта, впервые предложенного нагревателя, объединяющего транспортные функции и функции нагрева сушильного агента с целью повышения энергоэффективности процесса сушки.
4. Научно доказана эффективность применения осциллирующих режимов подвода тепла, конвекцией и СВЧ нагревом, и определены границы варьирования временных промежутков для плодов абрикосов и ядер подсолнуха.
5. Изготовлен и принят в опытно-промышленную эксплуатацию комплекс по СВЧ-сушке, отличающийся от существующих наличием научно обоснованной конструкции транспортирующего шнека и режима его работы, повышающего энергоэффективность удаления влаги.
6. Разработан, спроектирован, запатентован, изготовлен и принят в опытно-промышленную эксплуатацию нагреватель, объединяющий транспортные функции и функции нагрева сушильного агента с целью повышения энергоэффективности процесса СВЧ сушки за счёт регенерации отводимого тепла.
7. Разработана универсальная методика расчёта интенсивности внутренней транспортировки влаги как при наличии осциллирующего подвода тепла конвекцией так и при подводе энергии СВЧ нагревом отличающиеся от существующих видом регрессионной зависимости термодиффузионного коэффициента, позволившего увеличить точность результатов расчёта.
8. Научные и практические результаты диссертационных исследований прошли производственные испытания и внедрены в процесс подготовки специалистов ЧУДПО МИТИ г. Екатеринбург, применены в производственном процессе КОМАН Групп, ООО Инжиниринговая Компания «АМПРИ», ООО «ИРП», ООО «САН», ООО ПКФ «АТИС».

#### **Методология и методы исследования**

При проведении исследований использовались методики натурального и численного эксперимента, основанные на базовых принципах электротехники, теории теплообмена и физики. Полученные экспериментальные данные при проведении многофакторного эксперимента подвергались статистической обработке по общепринятым методикам. Использовались методы математического моделирования с применением программного обеспечения ANSYS и SolidWorks. Основные расчёты проводились с использованием оборудования Суперкомпьютерного центра ЮуРГУ.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанная модель влагоудаления при комбинированной СВЧ и конвекционной сушке отличающиеся зависимостями определения термодиффузионного коэффициента. Использование уточнённых зависимостей термодиффузионного коэффициента позволило повысить точность результатов расчетов по предлагаемой модели. Отклонение составили 3%, вместо 12% при решении тестовых задач стандартными методами.
2. Предложенные режимы, способы, обеспечивающие снижение энергетических затрат при использовании осциллирующих режимов сушки плодов абрикос, ядер подсолнечника, а также конструктивные схемы устройств, позволяющие снизить энергозатраты при эксплуатации. Снижен расход электроэнергии на сушку на 33,4% с более высоким качеством конечной продукции с экономией в 25 тыс. руб. в месяц.
3. Создана новая методика для расчётов электрофизических свойств абрикосов, ядер подсолнечника при СВЧ нагреве. Уточненные электрофизические свойства плодов абрикосов, ядер подсолнечника для частоты СВЧ излучения 2465 МГц и диапазона влажности плодов абрикосов 72-22%, ядер подсолнечника 22-8,6% соответственно.
4. Разработаны конструкции сушильных агрегатов с конвекционным и СВЧ нагревом, позволяющие снизить затраты тепловой энергии в процессе сушки, путём использования осциллирующего процесса подвода тепла. За счёт реализации осциллирующего режима влагоудаления с 30 с нагревом и 30 с охлаждением, при сушке абрикосов, снижен расход электроэнергии.
5. Разработана конструкция и обоснованы режимные параметры нагревателя, объединяющего транспортные функции для газовой среды и функции нагрева сушильного агента с целью повышения энергоэффективности процесса СВЧ сушки за счёт регенерации отводимого тепла. Определены оптимальные соотношения соответствия зон нагрева и охлаждения теплообменника мощностью до 8 кВт, что составило 66% для зоны нагрева и 34% для зоны охлаждения и оптимальные диапазоны частот вращения ротора установки, от 5 до 8,6 об/мин для максимума передаваемой мощности, в установке с площадью теплоаккумулирующей насадки 15 м<sup>2</sup>.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность полученных при проведении диссертационного исследования результатов обеспечивается применением фундаментальных законов электротехники, механики жидкости и газа, тепломассообмена, корректностью обработки данных натурных и численных экспериментов и применением современного математического аппарата при проведении исследований.

Основные результаты работы доложены и обсуждены на: Всероссийской научно-практической конференции преподавателей, ученых, специалистов и аспирантов ЧГАА (г. Челябинск 2013-2016 г.), ЮУрГУ (г. Челябинск, 2012, 2014-2018 гг.), СГАУ им. Вавилова (г. Саратов, 2013), научно-практическая конференция в научном центре РАН (г. Самара, 2013-2014, 2016 гг.), на научно-технической конференции СГАУ им. Королева (Самара 2014г.), Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015) ЮУрГУ (Пром-Инжиниринг), на научно-

технической конференции «Электротехнические комплексы и системы» (Уфа, 2017 г.), «Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур» (Екатеринбург, 2018 г.), «Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития 2018 (*GloSIC*)» (г. Челябинск, 2018, г.), «Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития 2020 (*GloSIC*)» (г. Челябинск, 2020, г.), «Наука и общество в современном мире: актуальные вопросы, достижения, тенденции развития» (Гжель, 2022), «Экосистемные сервисы в условиях глобальных изменений» (Москва, 2022).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 работ из них 4 статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК, 2 статьи в изданиях, входящих в Scopus. Получено 3 патента.

**Структура и объем диссертации.** Материал диссертации изложен на 155 страницах, содержит 14 таблиц, 66 рисунков состоит из введения, пяти глав, выводов, приложения. Список использованной литературы включает в себя 146 наименования.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, поставлена цель исследования. Кратко излагаются основные положения, выносимые на защиту. Сформулирована научная новизна, практическая значимость и достоверность полученных результатов.

**Первая глава.** «Состояние вопроса и задачи исследования».

В современной экономической ситуации, в связи с ростом цен на сельскохозяйственные продукты, возникает необходимость их переработки для дальнейшего его хранения или использования. Это делает актуальными работы по разработке новых методов сушки с целью повышения качества продукции и повышение энергоэффективности процесса.

Производя анализ состояния подготовки сельскохозяйственной продукции к длительному хранению, рассмотрены особенности методов обеспечения длительной сохранности сельскохозяйственной продукции на примере абрикосов, семян подсолнечника. Детально исследованы особенности различных методов влагоудаления применяемых при переработке сельскохозяйственной продукции и особенности установок сушки. Анализ литературных источников показал, что использование СВЧ установок являются одним из наиболее энергоэффективных и перспективных методов.

СВЧ – установки имеют ряд преимуществ: экономическое энергопотребление; автоматизированная система управления; конечный продукт получаем с высоким качеством; процесс сушки занимает меньше времени; осуществляется процесс сушки зерна, масличных культур и др. с высокой влажностью и при низкой начальной температуре.

В течение последних 60 лет проводилось интенсивное изучение процессов влагоудаления и разработки теории сушки, значительный вклад в изучение процессов массопереноса внесён работами А.В. Лыкова, Б.С. Сажина, П.Д. Лебедева и др. Все существующие современные технологии сушки основаны на

теории коллоидных капиллярно-пористых тел и на учете специфических свойств высушиваемого продукта.

В тоже время большинство авторов, разрабатывая установки влагоудаления, ориентируется на создание систем с высокой интенсивностью тепло массопереноса или с минимальным временем пребывания объекта сушки в аппарате, количество работ посвящённых созданию аппаратов экономически оптимальных невелико. Анализируя работы по повышению эффективности процессов сушки можно отметить, что наиболее часто авторы рассматривают отдельно вопросы тепломассопереноса, как внутреннего, так и внешнего, отдельно исследуются вопросы динамики газовых потоков и переноса влаги в теле и вопросы оптимизации только работы системы управления. Отдельное рассмотрение этих комплексных вопросов не позволяет создавать оптимальные с точки зрения энергоэффективности и экономически высоко rentабельные конструкции. Требования к качеству получаемой готовой продукции и природа материала подвергающегося процессу влагоудаления оказывают преобладающее воздействие на выбор оптимальных режимов и способов сушки. Особенности механизма внутреннего тепломассопереноса в капиллярно пористых телах, таких как абрикосы, ядра подсолнечника при высокой начальной влажности снижают эффективность традиционных способов влагоудаления. На основании анализа состояния вопроса, для снижения энергетических затрат процесса сушки предлагается создание сушильных установок с конвекционным и СВЧ нагревом, оснащённых системой утилизации тепла и энергоэффективными режимами сушки. На основе проведенного анализа сформированы цель и задачи исследования

**Во второй главе** рассматриваются вопросы математического моделирования комбинированного процесса СВЧ и конвекционной сушки. Анализ существующих моделей сушки сельхоз продукции показывает, что от верного выбора начальных положений во многом зависит как достоверность результатов моделирования, так и сложность реализации численного эксперимента. Рассматривая различные сельскохозяйственные культуры, подвергающиеся процессу влагоудаления, необходимо заметить, что уже к второй стадии сушки один из характерных размеров становится значительно меньше остальных. Это позволяет использовать при решении задачи влагоудаления математические модели в одномерной постановке. С практической точки зрения не всегда целесообразно оценивать полное удаление влаги из тела. Как правило, конечное содержание влаги составляет от 12 до 13% при начальной влажности от 86% до 90%. Это позволяет не учитывать процессы выведения химически связанной влаги. Так, как в рассматриваемом случае сушильным агентом является воздух, содержащий до 21% кислорода, приходится учитывать возможность обугливания продукта. Это ограничивает максимальную температуру сушильного агента  $140^{\circ}\text{C}$ . Анализ процессов сушки показывает, что при атмосферном давлении температура сушильного агента не должна быть меньше  $80^{\circ}\text{C}$  в период нагрева поверхности. Для решения задачи перемещения влаги при сушке тела была применена



модель нестационарного тепломассообмена в одномерной постановке, созданная на базе классической модели Лыкова с учетом СВЧ нагрева.

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = D \cdot \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + D \cdot \rho \cdot \delta \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \varepsilon \cdot \frac{r}{c} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{Q_b}{c \cdot \rho} \quad (2)$$

Масса удаляемой влаги

$$m_b = D \cdot \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} - D \cdot \rho \cdot \delta \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

Здесь:  $\delta$  – коэффициент термодиффузии;  $x$  – базовая координата;  $\varepsilon$  – критерий испарения  $\varepsilon=0$  при диффузии влаги и  $\varepsilon=1$  при диффузии пара;  $D$  – коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $u$  – влагосодержание, %,  $\alpha$  – температуропроводность,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $r$  – скрытая теплота парообразования,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $c$  – теплоёмкость,  $\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{С}^0$ ;  $T$  – температура;  $\tau$  – время сушки, мин;  $Q_b$  – внутреннее тепловыделение, вызванное воздействием СВЧ излучения.

$$Q_b = P_{\text{уд}} \cdot V \quad (4)$$

Удельную мощность  $P_{\text{уд}}$  подводимую СВЧ излучением оцениваем следующим образом:

$$P_{\text{уд}} = 0,556 \cdot 10^{-10} f \varepsilon' \tan \delta |\vec{E}|^2 \quad (5)$$

где  $f$  – частота электромагнитного потока, Гц;  $\tan \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь;  $E$  – напряженность электрического поля, В/м.

Для решения задачи нахождения объёмного распределения температуры и влагосодержания необходима зависимость коэффициента термодиффузии как непрерывной функции температуры и влагосодержания. Была получена эмпирическая зависимость коэффициента термодиффузии как функции  $T$  (температуры) и  $U$  (влажности).

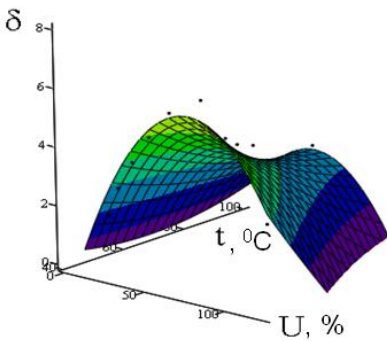


Рисунок 1 – Термодиффузионный коэффициент

Для подсолнечника (ядра):

$$\delta = 0,336 \cdot U - 9,528 \cdot 10^{-3} \cdot T - 1,26 \cdot 10^{-3} \cdot U \cdot T - 2,82 \cdot 10^{-3} \cdot U^2 + 7,288 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \quad (6)$$

Для абрикосов (без косточек):

$$\delta = 0,456 \cdot U + 0,015 \cdot T - 2,252 \cdot 10^{-3} \cdot U \cdot T - 1,68 \cdot 10^{-3} \cdot U^2 - 2,028 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad (7)$$

Разработан новый тип воздуходувки с регенерацией отводимого воздуха. Для расчета этой новой конструкции объединяющей функции вентилятора и регенеративного теплообменника была разработана методика определения рабочих параметров. Последовательность расчёта представлена (рис.2).



Рисунок 2 – Последовательность расчета вращающегося регенеративного воздухонагревателя

Данная методика позволяет производить определение как режимных, так и геометрических параметров теплообменника утилизатора, одновременно выполняющего функции устройства передачи механической энергии газовому потоку при заданных расходах и температурах, влагосодержаниях газовых сред.

В третьей главе проведены экспериментальные исследования модернизированной СВЧ-установки со встроенным в нее вращающимся шнеком и регенеративным вращающимся теплоутилизатором.

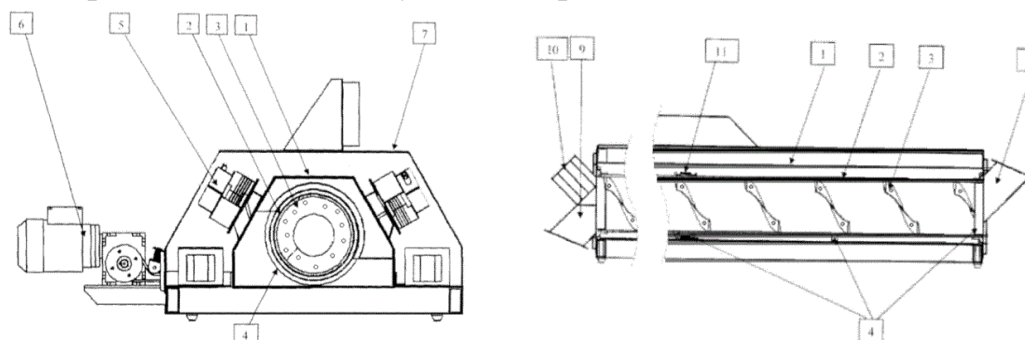


Рисунок 3 – СВЧ-установка со шнеком 4 (уровень заполнения и излучатель 5)

Установка работает следующим образом. Продукт через загрузочное устройство 8, непрерывным потоком попадает внутрь диэлектрической трубы 2. На трубе жестко закреплен зубчатый венец 11, который с помощью ременной передачи соединен приводом вращения 6 (мотор-редуктор), подключенный к сети через частотный преобразователь. Перфорированная труба шнека установлена на подшипниках скольжения 4. На внутренней стороне трубы жестко закреплен диэлектрический шнек 3, который при враще-

нии трубы постепенно продвигает продукт к разгрузочному устройству 9. В процессе движения продукт нагревается излучением микроволновых генераторов 5 и воздухом, проходящим сквозь перфорацию диэлектрической трубы. Уровень нагрева регулируется скоростью вращения трубы. Движение продукта к разгрузочному устройству 9 сопровождается его интенсивным перемешиванием. Выход паровоздушной смеси осуществляется через клапан 10. Для охлаждения генераторов 5, пространство между камерой 1 и кожухом 7 продувается воздухом.

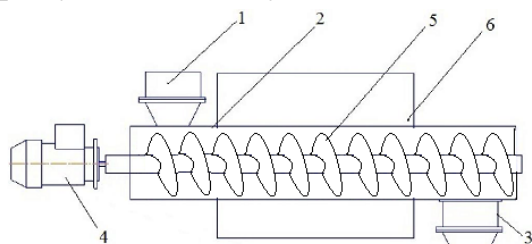


Рисунок 4 – Схема и конструкция предложенного шнекового подающего устройства для установки СВЧ обработки сыпучих материалов: 1 – загрузочное устройство; 2 – камера; 3 – разгрузочное устройство; 4 – электропривод шнека; 5 – шнек из радиопрозрачного материала; 6 – рабочая камера СВЧ нагрева

Для обеспечения заданных параметров влагоудаления производительность конвейера ( $Q_n$ ) и интенсивность влагоудаления в установке должны строго соответствовать друг другу, что достигается регулированием процесса вращения шнека. Для определения зависимости производительности и оборотов использована формула:

$$Q_n = D \cdot E \cdot R \cdot \rho \frac{n \cdot \psi}{0,275} \quad (8)$$

Где:  $D$  – наружный диаметр шнека;  $R$  – коэффициент уменьшение производительности для горизонтального конвейера,  $R=1$ ;  $\rho$  – насыпная плотность материала загрузки  $\text{кг/м}^3$ ;  $n$  – частота вращения,  $\text{об/мин}$ ;  $\psi$  – коэффициент заполнения 0,0025;  $H$  – шаг шнека  $H = \frac{L}{8}$ ;  $L$  – длина установки,  $L=1,6$  м;  $E$  – отношение шага к диаметру  $E = \frac{H}{D}$ .

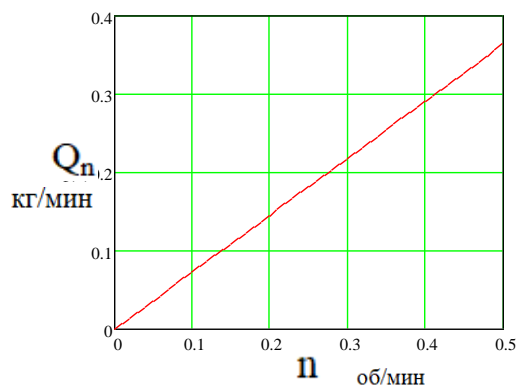


Рисунок 5 – Зависимость производительности шнека от оборотов при насыпной плотности продукта  $400 \text{ кг/м}^3$

Геометрические параметры скребка шнека определяются глубиной проникновения СВЧ излучения в продукт и конвективными режимами сушки. Высота скребка определялась как:

$$H_c < H_d \cdot (2+j)/3 \quad (9)$$

Где  $H_d = 22$  мм – оптимальная толщина слоя при конвекционной сушке;  $j = H_c v / H_d$ ,  $H_c v$  – глубина проникновения энергии электромагнитного излучения принятого СВЧ диапазона.

Расчётная зависимость:

$$H_{CV} = \frac{9,55 \cdot 10^9}{\tan(\delta) \cdot f \cdot \sqrt{\varepsilon}} \quad (10)$$

$$H_C = H_d \frac{(2+J)}{3} \quad (11)$$

для абрикосов  $\varepsilon = 13$  – диэлектрическая проницаемость сырья, данные определялись экспериментально (рис. 6);  $\text{tg}\delta = 50,53$  – тангенс угла диэлектрических потерь сырья;  $f = 2465$  – частота, МГц.



Рисунок 6 – Подготовка плодов абрикосов к лабораторному эксперименту

Значения коэффициента диэлектрических потерь исследуемых веществ определялись по скорости нагрева образца и сопоставлению с ней скорости нагрева эталона (воды), при заданной частоте и напряжённости поля. Эталон и образец одинаковых масс нагревался в течении 10 секунд при мощности СВЧ установки 900 Вт, после чего замерялась температура и контролировалось изменение массы (рис.7). По известному коэффициенту диэлектрических потерь эталона и известной частоте магнетрона и количеству переданного тепла находилось напряженность электрического поля (В/м), далее оценивался коэффициент диэлектрических потерь исследуемого образца.

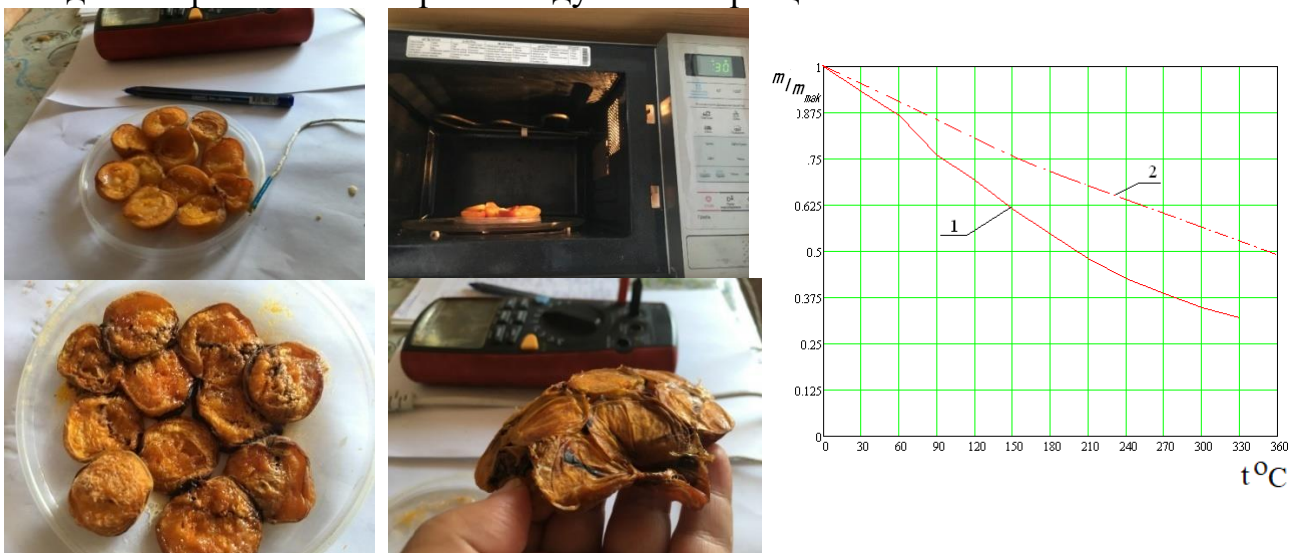


Рисунок 7 – Плоды абрикосов в процессе проведения эксперимента и экспериментальные результаты изменения относительной массы плодов от времени для: 1) непрерывного подвода энергии; 2) осциллирующего режима подвода энергии, время нагрева 10 секунд, охлаждение обдувом 30 секунд

Исследование коэффициента диэлектрических потерь абрикосов осуществлялось при изменении влажности в интервале 20...72 %. Проводилась предварительная подготовка, увлажнение до определенной влажности, термостатирование при температурах 20 , 40 и 60 °С.

Зависимость коэффициента диэлектрических потерь  $\epsilon''$  плодов абрикосов от влажности  $W_c$  с учётом температуры найдена при частоте электромагнитного поля  $f = 2465$  МГц. Полученная зависимость представлена на рис. 8

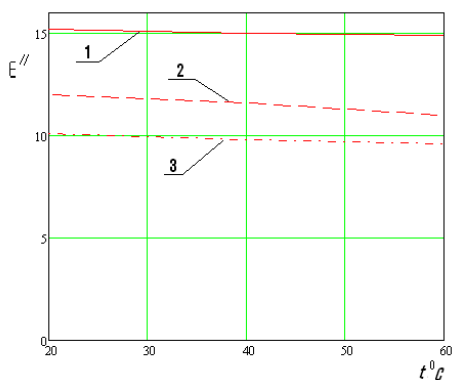


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента диэлектрических потерь  $\epsilon''$  абрикосов от влажности  $W_c$ . 1 - влажность 72%; 2 - влажность 50,2%; 3 - влажность 20%

При снижении влажности ниже 20% наблюдалось наличие локального обугливания плодов, причём при реализации непрерывного СВЧ нагрева 70 гр. плодов абрикосов в течении 5 минут 30 секунд при подводимой мощности 900 Вт наблюдалось поверхностное обугливание сушимых плодов, характер изменения относительной массы представлен на рис. 7.

Экспериментально установлено, что минимальный расход электроэнергии и наименьшая конечная влажность материала соответствует осциллирующему режиму с чередованием 30 секунд нагрева, 30 секунд охлаждения обдувом, что на промышленной установке реализуется расположением излучателей и организацией неравномерного вращения шнека.



Рисунок 9 – Ядра подсолнечника при проведении эксперимента

Исследование коэффициента диэлектрических потерь ядер семян подсолнечника (рис. 9) осуществлялось при изменении влажности, в интервале 8,6...22%. Проводилась предварительная подготовка, увлажнение до определенной влажности, термостатирование при температурах 20 , 40 и 60 °С

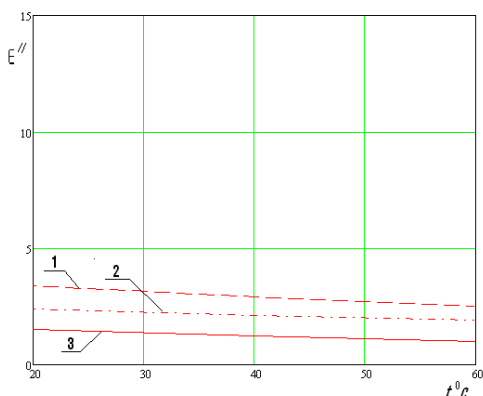
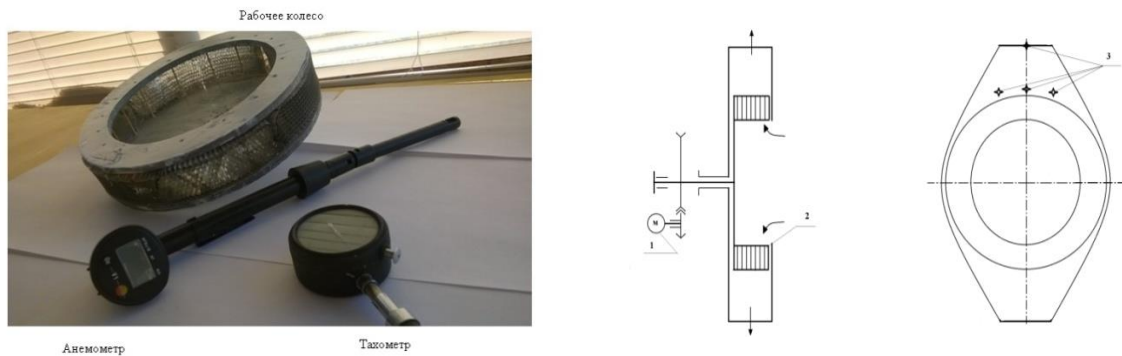


Рисунок 10 – Зависимость коэффициента диэлектрических потерь  $\epsilon''$  ядер семян подсолнечника от влажности  $W_c$ . 1- влажность 22%; 2- влажность 14,2%; 3- влажность 8,6%.

Температура нагрева эталона и образца контролировалась при помощи измерительного

комплекса UM 358, в качестве датчиков температуры использовали хромель-копелевые термопары (содержание в термопаре Ni 42-44%, Mn 0,1-1%, измерение температуры до 200<sup>0</sup>С, точность определения температуры +0.2 °С). Геометрические размеры – диаметр тары и глубина засыпки определялись исходя из глубины проникновения СВЧ в продукты.

Для проверки работоспособности теплообменника воздухонагревателя были созданы макетные образцы (рис. 11).



А

Б

Рисунок 11 – Экспериментальная установка для снятия напорной характеристики: а – ротор и измерительные приборы (тахометр, анемометр); б – схема ротора с ячеистой насадкой. 1 – электродвигатель с регулируемой частотой вращения; 2 – ротор, оснащённый сотовой насадкой; 3 – точки замера скорости воздуха

Проверка эффективности передачи тепла с помощью разработанного теплообменника осуществлялась на экспериментальной установке, где в качестве источника тепла использовался промышленный фен «Интеркол ФЕ 2000», оснащённый системой контроля и регистрации мощности на базе комплекса UM 358 см. рис. 11.

Контроль атмосферного давления осуществлялся датчиком GM -68, в качестве преобразователя ЦАП и АЦП-ЛА 50 (измерительное устройство), в качестве устройства регистрации данных станция Panasonic CF-18 (тактовая частота 1200 МГц, частота шины 400 МГц). Обработка данных проводилась в программных комплексах National Instruments LabVIEW 2010 и Mathcad (рис. 12). Контрольные проверки влажности осуществлялись прибором ВИМС-2.23, контроль теплопроводности прибором МИТ-1 9.

Для проверки адекватности модернизированной математической модели влагоудаления была создана экспериментальная установка реализующая динамический и статический режимы сушки. Изменение влажности фиксировалось по изменению массы установки и влагомером ВИМС-2.23 (температурный диапазон от +5 до +140 °С и ВЗПК-1 (диапазон измерений 10-35%, частота генератора 3.7±0,2 МГц.).

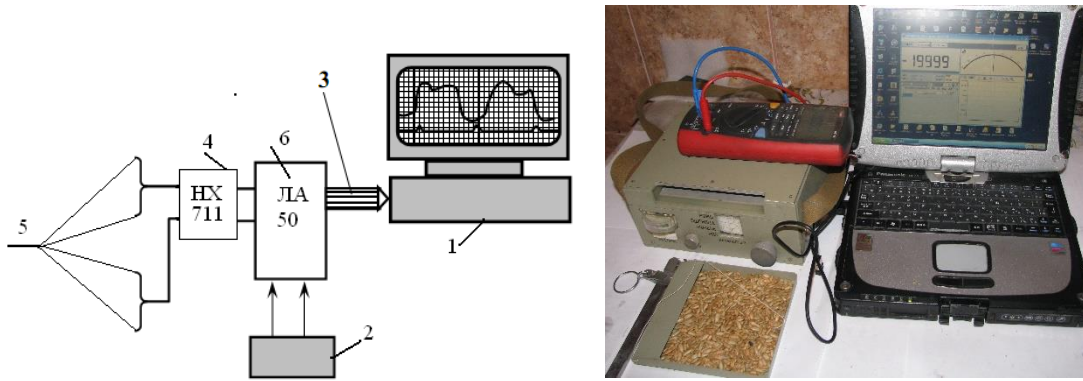


Рисунок 12 – Экспериментальное оборудование для анализа интенсивности влагоудаления: а) оборудование; б) схема включения датчиков: 1 – устройство регистрации данных станция Panasonic CF-18; 2 – источник питания; 3 – шина данных; 4 – промежуточная плата согласования НХ 711; 5 – датчики; 6 – преобразователи ЦАП и АЦП-ЛА 50

Допустимая влажность до 90% при 25 °С, рабочее давление 86...106 кПа). По формуле рассчитывали количество воды, для получения требуемой влажности:

$$M_B = \frac{m(W_{\text{треб}} - W_{\text{нач}})}{100 - W_{\text{треб}}}, \quad (12)$$

где:  $m_B$  – масса воды, г;  $m$  – масса продукта, г;  $W_{\text{треб}}$  – требуемая влажность продукта, %;  $W_{\text{нач}}$  – начальная влажность продукта, %.

**Четвертая глава** посвящена анализу результатов теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию конструкционных схем и режимных параметров сушильной установки СВЧ с подводом тепла, и воздухонагревателя. Применённая при расчётах динамики влагоудаления разностная схема:

$\Delta x$  – шаг по координате;

$\Delta t$  – шаг по времени;

$n$  – номер шага по времени;

$j$  – номер шага по координате.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_j^{n+1} - T_j^{n-1}}{2\Delta t}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{j+1}^n - T_j^{n+1} - T_j^{n-1} + T_{j-1}^n}{\Delta x^2}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{U_j^{n+1} U_j^{n-1}}{2\Delta t}$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{U_{j+1}^n - U_j^{n+1} - U_j^{n-1} + U_{j-1}^n}{\Delta x^2}$$

$$D_j^n = \frac{0,75 \cdot 10^5}{1 - 0,0032 \cdot \gamma_0 \cdot U_j^n} \left( \frac{T_j^n}{1000} \right)^{20}$$

$$\Delta x^2 U_j^{n+1} - \Delta x^2 U_j^{n-1} = 2\Delta t D_j^n \rho (U_{j+1}^n - U_j^{n-1} - U_j^{n+1} + U_{j-1}^n) + D_j^n \rho \delta_j^n \Delta x^2 2\Delta t \frac{T_{j+1}^n - T_j^{n+1} - T_j^{n-1} + T_{j-1}^n}{\Delta x^2} \quad (13)$$

$$U_j^{n+1} = \left( \begin{array}{l} 2\Delta t D_j^n \rho (U_{j+1}^n - U_j^{n-1} - U_j^{n+1} + U_{j-1}^n) + \\ + \Delta x^2 U_j^{n-1} + D_j^n \rho \delta_j^n 2\Delta t \frac{(T_{j+1}^n - T_j^{n+1} - T_j^{n-1} + T_{j-1}^n)}{(\Delta x^2 + 2\Delta t D_j^n \rho)} \end{array} \right) \quad (14)$$

Затем делаем вторую итерацию определяя  $T_j^{n+1}$  как

$$T_j^{n+1} = \left( \Delta x^2 t \cdot T_j^{n-1} + \alpha 2\Delta t \cdot T_{j+1}^n - \alpha 2\Delta t \cdot T_j^{n-1} + \alpha 2\Delta t \cdot T_{j-1}^n + \varepsilon \frac{r}{c} \right) \cdot \Delta x^2 \frac{(U_j^{n+1} - U_j^{n-1})}{(\Delta x^2 + \alpha 2\Delta t)} \quad (15)$$

$$P_{уд} = 0,556 \cdot 10^{-10} f \varepsilon' \tan \delta |\vec{E}|^2 = 0,556 \cdot 10^{-10} f \varepsilon'' |\vec{E}|^2$$

Где:  $f$  – частота колебаний Гц;  $P_{уд}$  – удельная мощность Вт/м<sup>3</sup>;  $E$ – напряженность электрического поля В/м;  $\delta$ – угол диэлектрических потерь;  $\varepsilon''$  – коэффициент диэлектрических потерь;

Напряженность электрического поля и коэффициент диэлектрических потерь оценивались по зависимостям:

$$|\vec{E}|^2 = \frac{C_{\text{эталона}} \Delta T_{\text{эталона}}}{0,556 \cdot 10^{-10} f \varepsilon''_{\text{эталона}}}$$

$$\varepsilon'' = \frac{c \cdot \Delta T}{0,556 \cdot 10^{-10} f |\vec{E}|^2}$$

Зависимости коэффициента диэлектрических потерь найдены при частоте электромагнитного поля  $f = 2465$  МГц.

Сравнительные результаты натурального и численного эксперимента, проведенного для капиллярно пористого тела представлены на рис.13. Величина отклонений составила менее 3 %. Поля температур, полученные для следующих условий: толщина капиллярно пористого тела 2 мм, начальная температура 20<sup>0</sup>С, температура сушильного агента 120<sup>0</sup>С, начальная влажность 50% конечная 20%. Режим с постоянной подачей тепла. При проведении натурального эксперимента контролировалась лишь средняя температура по слою материала.

Приведенные данные численных и натуральных экспериментов были проверены с помощью критерия Стьюдента. С вероятностью 0,97 полученные данные как по расчетной зависимости, так и экспериментально, принадлежат одной совокупности. Отклонение средних значений экспериментальных данных в выборке, от данных, полученных при расчётах с использованием математической модели находилось в пределах 3%, что позволяет проводить расчёты температуры и влагоудаления объектов с использованием модернизированной модели.



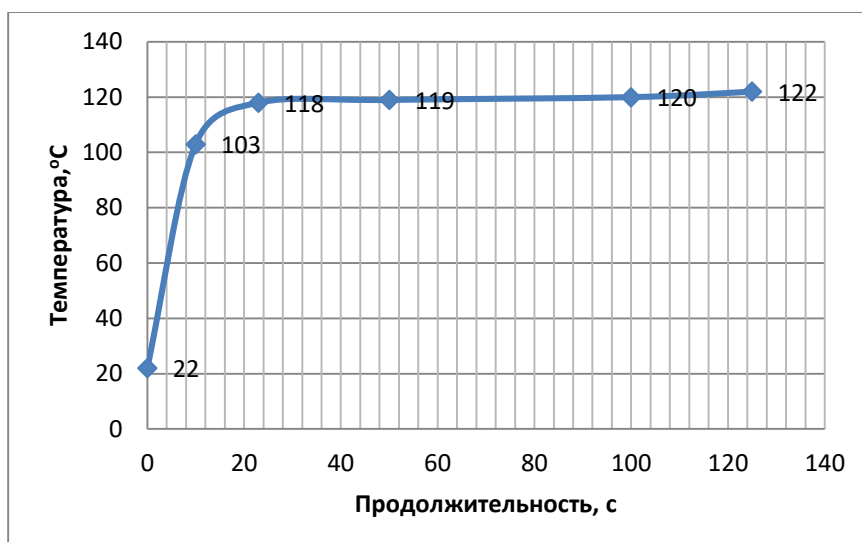


Рисунок 13 – Динамика нагрева сырья при условии распределения температур во времени. Непрерывная кривая – расчёт, отметки – экспериментальные данные

Для анализа эффективности осциллирующего режима был поставлен ряд численных экспериментов, основной задачей которых являлось определение режима, обеспечивающего одинаковое, по сравнению со стационарным, время влагоудаления 200 мин. при меньших энергетических затратах на 20%.

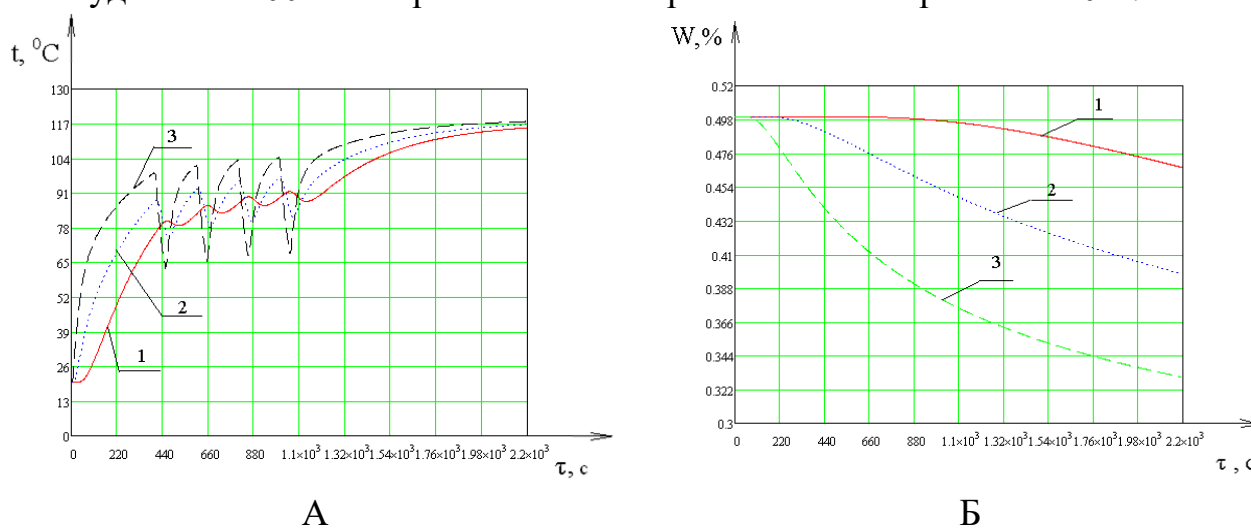


Рисунок 14 – Графики изменения, а) температуры б) влагосодержания в центре слоя сырья в процессе сушки в осциллирующем режиме при разной толщине засыпки высушиваемого продукта: 1 – 0,01 м; 2 – 0,005 м; 3 – 0,003 м.

Значения изменения температуры и влагосодержания сравнивали аналогичными значениями, полученными без осциллирующего режима (рис. 15). Графики, представленные на рис. 15, показывают сходную динамику интенсивности влагоудаления по объёму при непрерывном подводе тепла и при осциллирующем режиме. При этом осциллирующий режим обеспечивает снижение потребления энергии на 20%. С целью повышения качества готового продукта целесообразно увеличить общее время сушки на 26% для исключения обугливания.

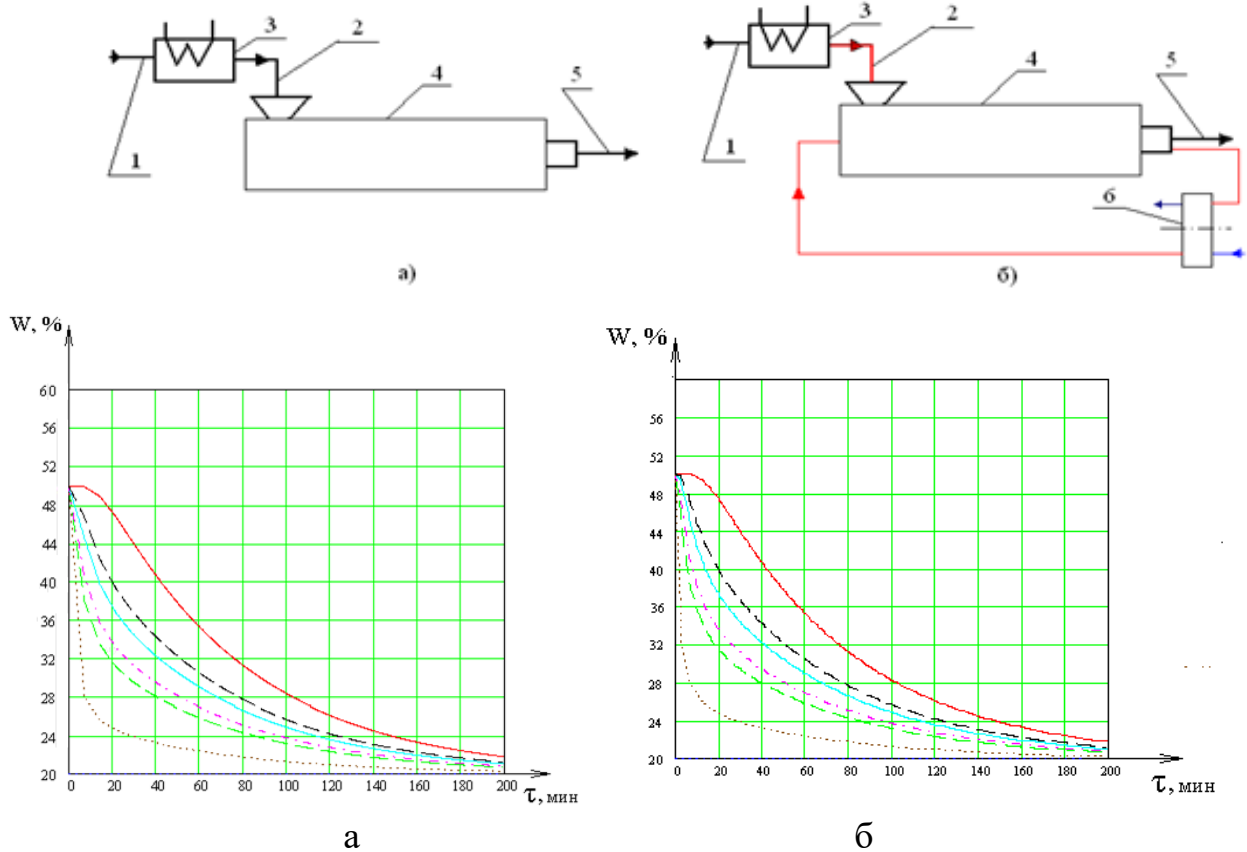


Рисунок 15 – Зависимость изменения влажности ядер подсолнечника от времени сушки: а – при стационарном режиме сушки; б – при осциллирующем режиме сушки.

В программных комплексах ANSYS и SolidWorks смоделирован шнек и произведена проверка прочности с учётом нагрева и аэродинамического сопротивления конструкции (см. рис. 16).

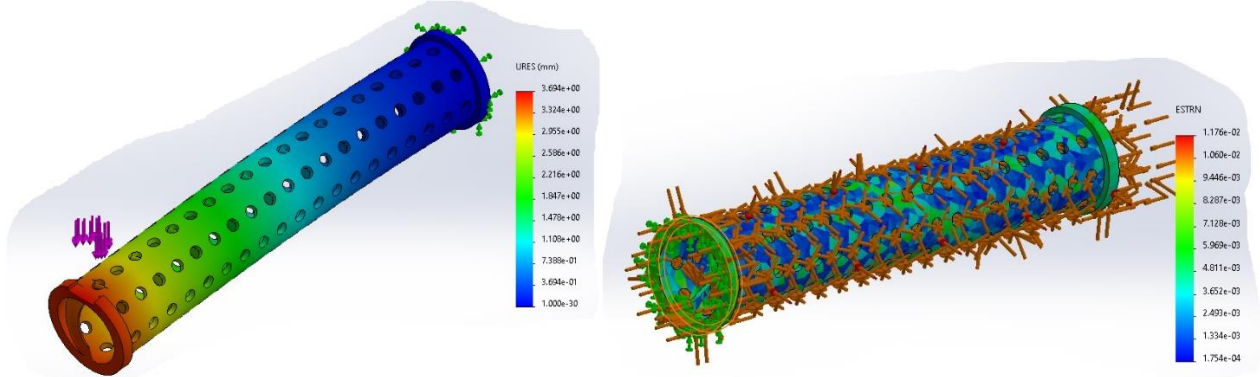


Рисунок 16 – Прочностные характеристики и распределение потоков газов в шнеке транспортной системы установки СВЧ сушки

Для верификации результатов, получаемых по предлагаемой методике в программных комплексах ANSYS и SolidWorks, проведено численное моделирование функционирования теплоутилизатора (см. рис. 17). Анализ данных моделирования показал, что расхождения результатов оценки температурных полей стенок и полей скоростей газов, полученных по инженерной методике и при постановке численного эксперимента, составляет не более 10% на всех режимах. Этого достаточно для решения инженерных задач.

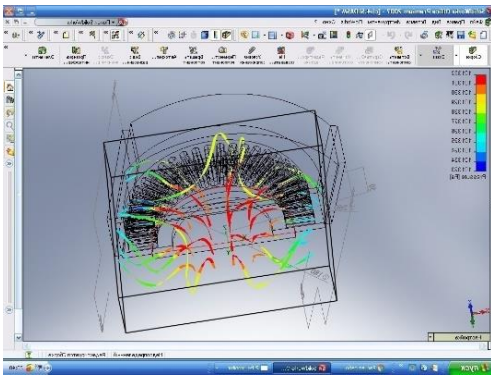


Рисунок 17 – Распределение потоков в регенеративном вращающемся теплоутилизаторе

Оценивая передаваемую тепловую мощность, выявлено наличие экстремума при частоте вращения 8,2 об/мин, массе насадки 16,2 кг и диаметре 0,3 м. (см. рис. 2). Определено оптимальное, с точки зрения передачи теплоты при заданных параметрах теплоносителей на входе в теплообменник, соотношение зон охлаждения и нагрева, соответственно: 34% от длины окружности насадки и 66%.

Подбор диаметра теплоутилизатора в зависимости от производительности осуществлялся по предложенной автором методике (рис. 2). Результаты подбора диаметра от тепловой производительности представлены на рис.18.

Получено эмпирическое выражение, описывающее зависимость производительности установки  $Q$  от диаметра теплоутилизатора  $D$  при фиксированной

мощности потока воздуха как:  $D = 0,303Q^{0,3}$

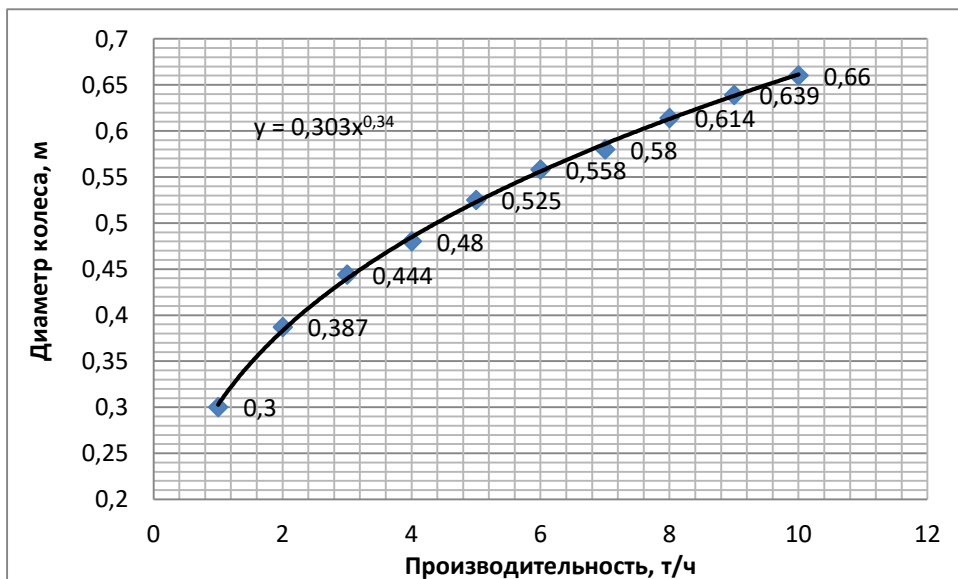


Рисунок 18 – Подбор диаметра теплоутилизатора в зависимости от производительности при мощности 7 кВт

**В пятой главе** проведена сравнительная оценка технико-экономических показателей модернизированной СВЧ установки «Бархан-3» с интегрированным воздушонагревателем и шнеком

При расчёте экономической эффективности установки, реализованной в ООО ПКФ «АТИС», были учтены следующие факторы: затраты на оборудование, затраты на персонал и срок окупаемости.

Расчетный период – 1 месяц (21 рабочий день). Длительность смены – 8 ч.

Вводные данные: производительность оборудования по сырью – ядра семечек подсолнечника 250 кг/ч, абрикосов 100кг/ч; обслуживающий персонал – рабочий – 2 чел./смена(электрик – технолог 15тыс.руб) +2 чел. (директор 40 тыс. руб + бухгалтер 30 тыс. руб); выход готовой продукции – ядра семечек 235 кг/ч,

сушеный абрикосов 50 кг/ч; состав оборудования: подающий транспортер, микроволновая установка «Бархан-3/2», вращающийся регенеративный теплоутилизатор, фасовочно–упаковочный автомат с весовым дозатором.

В существующей установке «Бархан» произвели замену одноленточной транспортерной ленты на радиопрозрачный шнек. Количество магнетронов по 8 штук в два ряда, что соответствует исходной компоновке, число витков шнека 8. Количество витков в шнеке кратно количеству расположенных по длине магнетронов для возможности реализации осциллирующего режима. Потребляемая мощность «Бархана» 38 кВт, также 2 кВт расход на упаковочное устройство.

Теплообменник «Волна» с потребляемой мощностью 20 кВт заменили на регенеративный вращающейся теплоутилизатор (воздуходувку) с мощностью дополнительного источника тепла 7 кВт. Ежемесячная экономия электроэнергии составила 25 тыс. руб. в месяц.

Осциллирующий режим нагрева в установке был реализован путём изменения системы подачи высушиваемого сырья. Так как расстояние между магнетронами составляет на установке 400 мм, то в камере СВЧ сушки существуют «мёртвые» зоны, где интенсивность СВЧ поля минимальна, то дозация высушиваемого сырья осуществлялась, таким образом, чтобы время присутствия продукта в зонах максимума воздействия СВЧ поля и зонах продувки было равным.

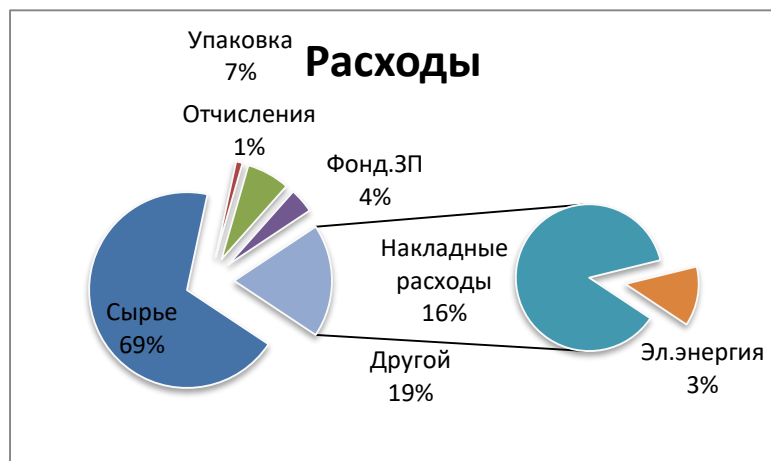


Рисунок 19 – Расходы предприятия

Срок окупаемости, модернизированной СВЧ-установки при сушке ядер подсолнечника 8,6 лет, а при сушке плодов абрикосов – 1,6 лет.

### Выводы по работе:

1. При анализе технологии процесса сушки доказано, что одним из наиболее эффективных методов влагоудаления является комбинация СВЧ сушки и конвекционной сушки и на заключительном этапе с системой регенерации тепла.

2. Разработана новая математическая модель процесса влагоудаления для комбинированной сушки с использованием СВЧ и конвекционного подвода тепла. Использование впервые непрерывно определяемого термодиффузионного коэффициента позволило повысить точность результатов расчетов по предлагаемой модели. Отклонение составили 3%, вместо 12% по общепринятой методике при решении тестовых задач. Разработана методика экспериментального определения и уточнены электрофизические свойства плодов абрикосов, ядер

подсолнечника для частоты СВЧ излучения 2465 МГц и диапазона влажности плодов абрикосов 72-22%, ядер подсолнечника 22-8,6% соответственно.

3. Разработана методика расчёта новой конструкции вращающегося воздухонагревателя. Определены эффективные соотношения соответствия зон нагрева и охлаждения теплообменника, что составило 66% для зоны нагрева и 34% для зоны охлаждения и эффективные с точки зрения энергоэффективности диапазоны частот вращения ротора установки, от 5 до 8,6 об/мин для максимума передаваемой мощности, в установке с площадью теплоаккумулирующей насадки 15 м<sup>2</sup>, при передаваемой мощности до 8 кВт.

4. Разработаны режимы, способы и конструктивные схемы устройств, позволяющие снизить энергозатраты. Проведён численный и натурный эксперимент, показавший возможность снижения энергетических затрат при использовании осциллирующих режимов сушки плодов абрикосов, ядер подсолнечника. Выявлена возможность снижения затрат тепловой энергии в процессе сушки при использовании осциллирующего процесса подвода тепла. Проведена экспериментальная проверка предлагаемых режимов и конструкций позволяющих снизить энергопотребления в рассматриваемом процессе сушки. За счёт реализации осциллирующего режима влагоудаления с 30 с нагревом и 30 с охлаждением, при сушке абрикосов, снижен расход электроэнергии на сушку на 33,4% с более высоким качеством конечной продукции, но при возрастании общего времени сушки на 26%. При использовании воздухонагревателя получили снижение себестоимости продукции, так как снизили энергопотребление на производство единицы продукции на 6,5 кВт при полном потреблении электрической мощности 70 кВт. Получена экономическая эффективность внедрения обоснованных режимов влагоудаления в процессе сушке абрикосов и ядер семечек подсолнечника с экономией в 25 тыс. руб. в месяц.

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах**

#### **Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ**

1. Ахмедьянова, Е.Н. Увеличение энергоэффективности установок сушки пеллет / Е.Н. Ахмедьянова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2014. - Т. 16. - № 1-2. - С. 352-355.
2. Ахмедьянова, Е.Н. Математическое моделирование процесса сушки древесных отходов. / Е.Н. Ахмедьянова, С.Н. Редников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2016. - Т. 18. - № (2). - С. 382-385.
3. Ахмедьянова, Е.Н. Совершенствование конструкции регенеративного теплообменника / Р.С. Рахимов, Е.Н. Ахмедьянова, С.Н. Редников // Международный технико-экономический журнал. - 2018. - №3. - С.21-26.
4. Ахмедьянова, Е.Н. СВЧ-подвод для сушки органических продуктов / Е.Н. Ахмедьянова, К.Т. Ахмедьянова, С.Н. Редников // АПК России. - 2020. - Т.27. - №1. - С.67-71.

### **Публикации входящие в международную базу данных Scopus**

5. Akhmedyanova, E. N. Unsteady modes of moisture removal (Нестационарные способы удаления влаги) / E. N. Akhmedyanova, O. S. Ptashkina-Girina // Procedia Engineering. - 2015. - Vol. 129. - P. 708-712. ISSN 1877-7058. Ref.: p. 712 (10 name).
6. Akhmedyanova, E. N. Diagnostics of drying units with microwave emitter units (Диагностика сушильных установок с микроволновыми излучателями) / Rednikov S. N, Akhmedyanova E. N. // Proceedings –2020. Global Smart Industry Conference, GloSIC 2020, - 2020. - P. 157-162, 9267838

### **Публикации в других изданиях**

7. Ахмедьянова, Е. Н. Гидродинамика процесса сушки / Е.Н Ахмедьянова //Сб. докл. второй международной науч.-техн. конф. – 2014. - Т. 1. - С. 145-149.
8. Ахмедьянова, Е. Н. Проблемы оптимизации динамики удаления влаги гранулированного материала / Е.Н Ахмедьянова // Сб. докл. второй международной науч.-техн. конф. - 2014. - С. 714-717.
9. Ахмедьянова, Е. Н. Нестационарные режимы влагоудаления / Е.Н. Ахмедьянова, О.С. Пташкина-Гирина // В сборнике: Пром-Инжиниринг, труды международной научно-технической конференции ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет). - 2015. - С. 40-42.
10. Ахмедьянова, Е. Н. Теоретические исследования процесса сушки. / Е.Н. Ахмедьянова // В сборнике: Наука ЮУрГУ Материалы 68-й научной конференции (Электронный ресурс). - 2016. - С. 881-887.
11. Ахмедьянова, Е. Н. Оценка эффективности использования энергоносителей / Е.Н. Ахмедьянова // В сборнике: Материалы LV международной научно-технической конференции. (Электронный ресурс). ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет». - 2016. - С. 276-282.

### **Авторские свидетельства, патенты**

12. Патент на полезную модель RU № 165396 Российская Федерация МПК E02B 9/00. Сушильная установка / Е.Н. Ахмедьянова, С.Н. Редников, О. С. Пташкина-Гирина, Д.Н. Ахметов; правообладатель Ахмедьянова Е.Н. №2015144229 ;заявл. 14.10.2015 ; опубл. 20.10.2016.
13. Патент на изобретение RUNо2614428 Регенеративный воздухонагреватель / Е.Н. Ахмедьянова, С.Н. Редников, О. С. Пташкина-Гирина от 28.03.2017 г. ФГОУ ВО ЮУрГАУ.
14. Патент на полезную модель RU №202175 U1 Микроволновая печь для тепловой обработки сыпучих продуктов/ Ахмедьянова Е.Н., Ахмедьянова К.Т., Редникова А.С., Редникова В.С., Редников С.Н., Ахметов Д.Н.; правообладатель Ахмедьянова Е.Н. №2020112389; заявл. 26.03.2020; Бюл. № 4 от 05.02.2021.