

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МСХА  
ИМЕНИ К. А. ТИМИРЯЗЕВА

*На правах рукописи*

**АХМЕДЬЯНОВА Елена Наильевна**

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

Специальность 4.3.2 – Электротехнологии, электрооборудование и  
электроснабжение агропромышленного комплекса

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

научный руководитель –  
доктор технических наук, профессор  
Сторчевой Владимир Федорович

Москва – 2023

## **Содержание**

<b>Введение</b> .....	4
<b>Глава 1 Состояние вопроса и задачи исследования</b> .....	4
1.1 Разновидность культур для исследования .....	11
1.2 Способы переработки, обеспечивающие длительное хранение плодово-ягодного сырья .....	12
1.3 Современные технологии производства процесса сушки .....	14
1.4 Теоретические, экспериментальные исследования процесса сушки .....	16
1.5 Эффективные режимы процесса влагоудаления .....	19
1.6 Цели и задачи исследования .....	20
<b>Глава 2 Математическое моделирование энергоэффективных комбинированных сушильных установок, использующий конвективный и СВЧ-подвод</b> .....	23
2.1 Математическое моделирование комбинированного процесса СВЧ и конвекционной сушки .....	23
2.1.1 Примененная математическая модель .....	23
2.2 Определение зависимости термодиффузионного коэффициента .....	24
2.3 Математические описания тепловыделения при сушке СВЧ-энергоподводом .....	33
2.4 Математические описания тепловых балансов при комбинированной сушке конвекцией и с СВЧ-энергоподводом .....	38
2.5 Математическое моделирование системы регенерации тепловой энергии .....	40
2.5.1 Математическое моделирование вращающегося регенеративного воздухонагревателя .....	42
<b>Выводы по 2 главе</b> .....	49
<b>Глава 3 Методика проведения экспериментальных исследований</b> .....	50
3.1 Методика расчёта геометрических параметров СВЧ установки .....	50
3.2 Определение электрофизических свойств абрикосов, ядер подсолнечника, опила соснового .....	56
3.2.1 Структура объектов влагоудаления .....	57

3.2.2 Метод оценки диэлектрических характеристик объектов в диапазоне СВЧ .....	58
3.3 Методика оценки интенсивности процесса влагоудаления.....	67
3.3 Методика определение рабочих характеристик ротора вращающегося теплообменника утилизатора.....	71
3.4 Методика обработки экспериментальных данных .....	78
<b>Выводы по 3 главе.....</b>	<b>87</b>
<b>Глава 4 Результаты теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию конструкционных схем и режимных параметров сушильных установок СВЧ подводом тепла и воздухонагревателя.....</b>	<b>88</b>
4.1 Результаты математического моделирования процесса влагоудаления с постоянным подводом теплоты .....	88
4.3 Результаты моделирования при пульсационном режиме влагоудаления .	95
4.4 Результаты математического моделирования работы воздухонагревателя .....	100
<b>Выводы по 4 главе.....</b>	<b>107</b>
<b>Глава 5 Практическое применение результатов исследования СВЧ-сушке абрикос от внедрения воздухонагревателя .....</b>	<b>109</b>
5.1 Повышение энергоэффективности при СВЧ-сушке абрикосов.....	109
5.2 Внедрение воздухонагревателя в процесс сушке ядер подсолнечника...	117
<b>Выводы по 5 главе.....</b>	<b>120</b>
<b>Выводы по работе.....</b>	<b>121</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>123</b>
<b>Приложения.....</b>	<b>138</b>

## **Введение**

**Актуальность темы исследования.** Переработка и хранение продуктов сельского хозяйства, и их дальнейшее использование важная проблема, которой должно уделяться особое внимание. Важное 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 оценки 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 натуральных 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.

## Глава 1. Состояние вопроса и задачи исследования

### 1.1 Разновидность культур для исследования

В современной экономической ситуации, в связи с ростом цен на сельскохозяйственные продукты, возникает необходимость их переработки для дальнейшего его хранения или использования.

Так, задача переработки культур растениеводства, которые зачастую приходят в негодность, не принося прибыли, сельхоз производителям, является актуальной. [1, 5, 7, 8, 12, 14, 16].

Рассмотрим различные культуры – это абрикос и ядра подсолнуха. Выбор этих культур был связан с тем, что у них не только отличительные физико-химические составы, но и область их дальнейшего применения различны.

Абрикос сам по себе уникальный продукт. Его очень ценят и любят не только в свежем виде, но он еще и энергетически полезен в сушеном. Абрикос нельзя заморозить из-за большого содержания влаги и аскорбиновой кислоты: он начинает темнеть и теряет свои вкусовые качества при размораживании. Его необходимо сушить, соблюдая температурные параметры не более 80<sup>0</sup>С. Это необходимо, чтобы плод сохранил свои витамины и сам не потерял внешний вид. Также необходимо учитывать, что 80% плода состоит из воды, которую необходимо испарить в щадящих условиях. Процесс сушки должен протекать в несколько этапов.

Существует процесс сушки на солнце в Южных районах таких как, например, в Узбекистане, где климат резко континентальный. Поскольку на Южном Урале солнце не настолько интенсивное и нечастое, возникает необходимость сушить материалы, к примеру, абрикосы, в тенистых зонах, такая сушка для фруктов и овощей губительна, так как происходит потеря важных витаминов, приводит к потерям аскорбиновой кислоты и других ценных компонентов. Кроме того, данный процесс трудоемок и требует от производителя больших площадей сушки.

Одной из распространенных культур в нашей области является подсолнух. В древности он был тесно связан с этносом, культом солнца и древнеславянским богом солнца Ярило. Это растение обладает высокой ценностью, так используются не только плоды, но и стебель растения в качестве силоса. Но большинство людей используют масло, выжатое из подсолнечника. Оно имеет уникальные свойства и является необходимым продуктом для приготовления многих блюд. Хозяйки по всему миру добавляют подсолнечное масло в процессе обжарки продуктов или при смешении ингредиентов, а семечки используют в качестве добавок к основному рациону. Кроме того, широкое распространение данное растение получило и в сельскохозяйственной сфере. Например, в качестве питания для рогатого скота. Так же известно, что подсолнечник способен распространяться вдоль дорог при неправильном сборе урожая [63]. Поэтому семечки подсолнуха получили такое широкое распространение: их употребляют в очищенном виде в козинаках, халве и т.д.

## 1.2 Способы переработки, обеспечивающие длительное хранение плодово-ягодного сырья

Требования рынка диктуют производителям улучшения качества продуктов, обладающих длительным сроком хранения с одновременным уменьшением стоимости переработки сельскохозяйственной продукции. Грамотный выбор методики сохранения и переработки сырья определяет не только себестоимость продукта, но и срок хранения без потери потребительских свойств. Только проанализировав достоинства и недостатки доступных технологий хранения и переработки можно выявить наиболее эффективные для данных культур и условий. Наиболее распространёнными методами сохранения плодово-ягодной продукции и овощей сегодня являются процессы охлаждения и глубокого замораживания, технологии использующие принцип герметизации упаковки (Xtend - технология), хранение при пониженном давлении или в среде с регулируемым газовым составом, влагоудаление с использованием различных методик основанных как на подводе тепла, так и на вымораживании.

При требовании длительного хранения, свыше двух лет, и снижения массы переработанного плодоовощного сырья [59-61], наибольшее распространение получает сушка. Длительных сроков хранения достигают, применяя принцип исключения возможности нормального протекания процессов обмена веществ на клеточном уровне как в самом продукте, так и блокируя аналогичные процессы в микроорганизмах, присутствующих в сырье. При этом возрастание массовой доли сухой составляющей продукта приводит к росту удельных показателей калорийности за счёт роста весовой доли белков, углеводов и иных питательных веществ в продукте сушки. Так энергетическая ценность картофеля возрастает с 347 кДж/100г для сырого, до 1284 кДж/100 г для высушенного продукта. Немаловажным аспектом является и изменение плотности и габаритов высушиваемого сырья. Так процесс сушки сопровождается уменьшением объёма требуемого для транспортировки и хранения продукции минимум в 3-4 раза, что благоприятно сказывается на конкурентных качествах продукции. Разрабатывая ту, или иную, технологию влагоудаления необходимо ориентироваться в первую очередь на свойства самого сырья и его химический состав и в первую очередь на концентрацию водорастворимых веществ. Так, на интенсивность удаления влаги и, следовательно, на продолжительность процессов влагоудаления в первую очередь оказывает влияние наличие гидрофильных коллоидов и веществ, обладающих высокой осмотической активностью, таких как сахара, легко связывающих влагу. В растительном сырье концентрация этих веществ максимальна в клеточном соке. Это объясняет большую продолжительность процесса влагоудаления для плодов с высокой концентрацией пектиновых веществ и сахаров, за счёт их способности связывать влагу. Не менее важно при расчёте параметров влагоудаления и оценка структуры покровных, основных тканей плодов. Каждому виду тканей соответствует своя неравномерность макро и микропор, следовательно, способность удерживать и проводить влагу, в том числе и капиллярную и осмотически связанную. На это оказывает влияние как структура, так и размеры клеток продукта начальное распределение сухих веществ и влаги в тканях.

Процессы внутреннего влагопереноса тесно связаны с процессами передачи тепла. Наиболее низкий коэффициент теплопроводности как известно имеют газы, следовательно, уменьшение размера пор и, следовательно, микрообъёмов газа в веществе меняет и теплопроводность самого высушиваемого материала, непосредственно в процессе влагоудаления и последующего хранения. Но при увеличении размера пор свыше определённого размера начинают сказываться и конвективные процессы тепломассопереноса. Анализ плодово-ягодной продукции показывает, что именно сушка является наиболее перспективным способом длительного хранения ягод чёрной смородины, абрикосов, винограда, черноплодной рябины и жимолости как плодов с высокой начальной концентрацией влаги за счёт сахаров и пектиновых веществ, так и за счёт структуры тканей. Для этого вида сырья возможно получения продукта с максимальными сроками хранения при минимальных собственных объёмах только за счёт процессов влагоудаления. Создание технических условий и режимов этого процесса, обладающих максимальной энергетической эффективностью, является актуальной народнохозяйственной задачей.

### 1.3 Современные технологии производства процесса сушки

В настоящее время рынок насыщен сушильными установками. Рассмотрим основные конструкции и подходы. Так, ленточные сушильные установки бывают одноленточными и многоленточными. Основным преимуществом ленточных сушильных установок является равномерность процесса влагоудаления, только при оптимальных величинах высушиваемого слоя продукции. Толщина высушиваемого слоя определяется особенностями конвективного теплообмена, реализуемого в этих агрегатах. На территории Российской Федерации сушильные установки этого типа активно используются для обработки не только овощей и фруктов, но и для подготовки грибов и ягод. Одним из характерных представителей этих установок является сушилка STELA равномерность распределения сушильного агента, а в установках в качестве

агента сушки используется воздух, достигается в помощью систем воздуховодов подающих воздух в зону сушки от вентиляторов.

Иной способ передачи тепла используют сушилки инфракрасные «Агрохит». Процесс влагоудаления происходит при низких температурах 30-50<sup>0</sup>С, это позволяет убирать влагу с продуктов, транспортируемых по конвейеру без горения. Сушильные установки этого типа используются в фармакологии для обработки лечебных трав и ягод. Не менее эффективны они для сушки зерновых культур: пшеницы, риса, проса и других. Достоинством данной сушилки является мобильность «Агрохит - 500» помещается в кузов газели. Недостаток один – это высокое потребление электроэнергии работа сушилки «Агрохит» в течение 10 часов потребует примерно 500 кВт [56].

Для фармацевтических материалов, сухого сыра, биологически активных добавок, а также ягод, фруктов требуется низкотемпературная сушка - для этих целей рекомендуется использовать микровакуумные установки серии «МУССОН». МУССОНЫ хорошо зарекомендовали в сушке сырья для фармакологии. Установка работает следующим образом: микроволновая энергия поступает от магнетронов на контейнер с продуктом, который необходимо осушить, контейнер при этом вращается, также водокольцевым насосом создается вакуум. Достоинством данной вакуумной установки является, что процесс сушки происходит при более низкой температуре при 30<sup>0</sup>С, все полезные вещества и витамины сохраняются в продукте [46].

В настоящее время большой интерес вызывают СВЧ-установки различной конструкции.

Установка промышленная MIVAR микроволново-вакуумная относится к конвейерным системам с непрерывным движением зон с продуктом [42].

Преимуществом микроволново-вакуумной установки является то, что процесс протекает при температуре 37<sup>0</sup>С. Не высокие температуры обработки позволяют сохранять витамины при обработке овощей, фруктов, ягод и трав. Используют этот способ и при консервировании мяса, морепродуктов, творожной массы и т.д.

Достоинством этого метода влагоудаления является высокая скорость и равномерность процесса, меньшее влияние на интенсивность удаления влаги оказывают форма и размер высушиваемого продукта, возможность одновременной сушки в различных зонах разных продуктов.

Для сыпучих, гранулированных, дисперсных продуктов находит применение установка. Этот аппарат оснащён модулем микроионизации. Установки типа АСТ-4 хорошо зарекомендовали себя при сушке зерновых культур.

Уникальная микроволновая установка «АРАБИС» осуществляет не только процесс сушки, но и обеззараживание и улучшения микробиологических характеристик. Процесс сушки осуществляется в радиопрозрачной таре (крафт мешки, картон, упаковка из полиэтилена и т.д.). Эти установки применяются не только для рыбы или мяса, но и для специй, чая, ягод, орехов, различных сушеных фруктов и т.д. [46].

При осуществлении сушки зерновых и масленичных культур можно использовать установку модульного типа СЗ-01 с СВЧ –энергией.

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, масленичных культур и др. с высокой влажностью и при низкой температуре.

Недостатком является низкая производительность. Если перерабатывать большие объемы сельхоз продукции, то необходимо устанавливать несколько установок.

#### 1.4 Теоретические, экспериментальные исследования процесса сушки

Все существующие современные технологии сушки основаны на теории коллоидных капиллярно-пористых тел и на учете специфических свойств высушиваемого продукта.

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 [64-71], Б.С. Сажина [104] П.Д. Лебедева [58,59] и др. Разработаны методики создания аппаратов с кипящим слоем, вихревых сушильных камер, ведутся интенсивные работы по созданию установок комбинированного влагоудаления с использованием теплообмена излучением в микроволновом и инфракрасном диапазоне [57]. 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 или вопросы оптимизации только работы системы управления. Отдельное рассмотрение этих комплексных вопросов не позволяет создавать оптимальные с точки зрения энергоэффективности и экономически высококорентабельные конструкции.

Рассматривать данный процесс влагоудаления необходимо комплексно, не разделяя его отдельных фаз и механизмов, учитывая особенности нагрева, испарения, переноса влаги внутри частицы и обтекания частицы газовым потоком и уносом влаги с увлажнённым газом из гранулированного слоя, учитывая гидродинамику аппарата и работу системы управления.

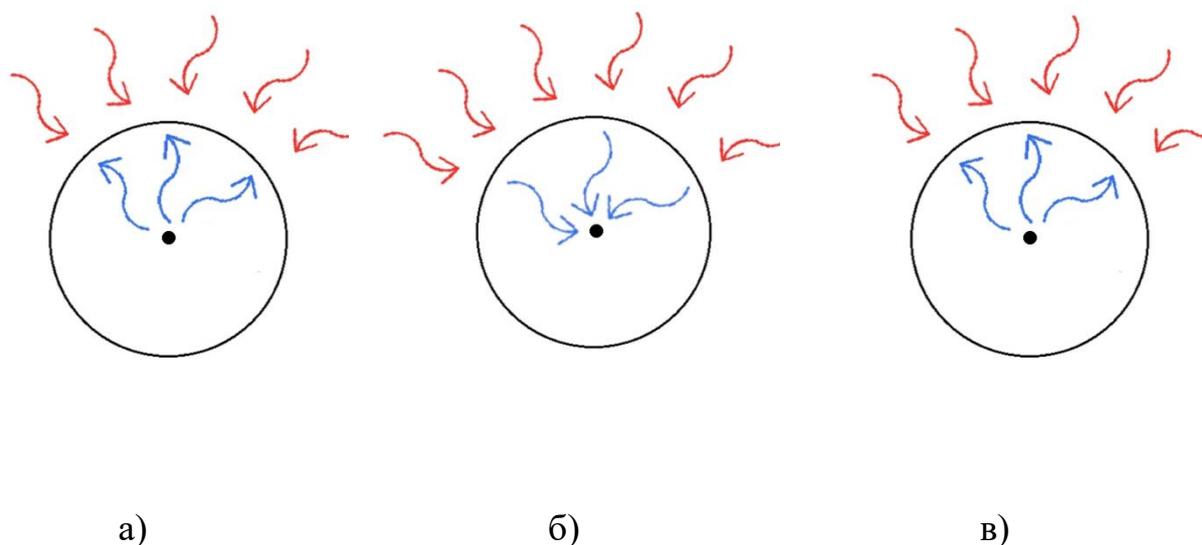


Рисунок 1.1 – Влагоперенос при конвективной сушке.

При конвективной сушке процесс влагоудаления происходит в три этапа. Молекулы влаги на первом этапе испаряются с поверхности (рисунок 1 а). На втором этапе происходит обратный отток влаги к центру, т.к. поверхность более нагрета, то молекулы воды идут к менее нагретому центру (рисунок 1 б). Затем на третьем этапе происходит завершающей процесс сушки, где происходит полное выделение влаги из продукта (рисунок 1 в).

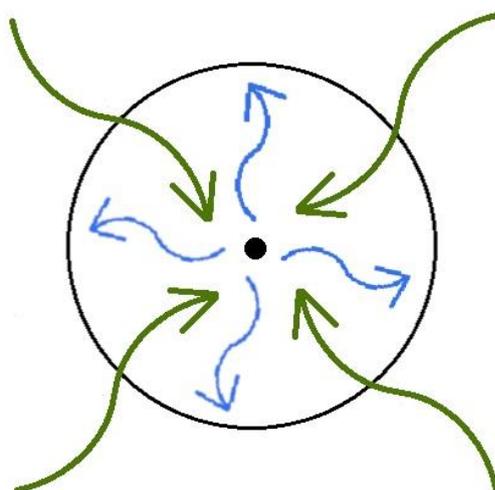


Рисунок 1.2 – Сушка при СВЧ-излучателем

Влага при СВЧ-нагреве продуктов имеет ряд преимуществ, т.к. концентрация высокой энергии в малом объеме материала. Влага удаляется с теплом, поглотившим продукт, в связи с тем, что при СВЧ-нагреве градиент температуры направлен в одну сторону с градиентом влаги.

Описывая процессы, протекающие в тех или иных аппаратах влагоудаления необходимо учитывать особенности функционирования конструкции аппарата [48]. Так конструкция аппарата влагоудаления и принцип его действия во многом влияет и ограничивает гидродинамические процессы сушки. В свою очередь, материал, из которого удаляется влага, его массогабаритные параметры дисперсность коренным образом влияет как на возможность использования тех или иных механизмов удаления влаги, так и на особенности конструкции аппарата.

Используя СВЧ-нагреватели, мы достигаем больших результатов при сушке. СВЧ-устройства подвергают продукт объемному нагреву. Процесс происходит при низких температурах, так как происходит равномерный нагрев, то градиент температуры, влажности и давления направлены в одну сторону, тем самым сокращая процесс выделения влаги из продукта. СВЧ-устройства обычно компактны, их широко можно использовать не только для сушки, но и для дезинфекции от насекомых сельскохозяйственных продуктов для повышения их качества.

### 1.5 Эффективные режимы процесса влагоудаления

Как уже отмечалось ранее, 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 теплопереноса в капиллярно пористых телах, таких как абрикосы, ядра подсолнечника, древесный опил при высокой начальной влажности снижают эффективность традиционных способов влагоудаления. Это делает актуальными работы по разработке новых методов сушки с целью повышения качества продукции, так и роста энергоэффективности процесса.

Рассматривая процессы влагоудаления в капиллярно-пористых телах и особенно в термочувствительных растительных материалах, выделяют осциллирующие (нестационарный) и не осциллирующие (стационарный) режимы.

Стационарный режим – это режим где температура является функцией системы координат ( $t=f(x,y,z)$ ) и не зависит от времени. При нестационарном процессе температура будет изменяться не только в пространстве, но и с учетом времени.

Тепло, получаемое внешней поверхностью продукта постепенно проникает внутрь капиллярно-пористых тел вследствие его теплопроводности. Распространение тепла в капиллярно-пористых телах по закону Фурье оценивается как не стационарный процесс.

Если сушка капиллярно-пористых тел, идет при осциллирующем процессе, поэтому возникает необходимость в периодическом охлаждении продукта, так как при нестационарном режиме возникает термодиффузионный эффект. Необходимо вводить переменное охлаждение капиллярно-пористых тел, тогда перемещение влаги не будет тормозиться термодиффузией. Кроме того, охлаждение необходимо, чтобы капиллярно-пористые тела не обугливались, также сохранялись полезные компоненты в конечном продукте.

Повысить энергетическую эффективность осциллирующей сушки можно путём утилизации (вторичное использование) низко потенциального тепла отводимых газов из сушильной камеры. Воздухонагреватель необходим и для обеспечения периодического охлаждения капиллярно-пористых тел. Вследствие этого возникает необходимость в создание вентилятора и теплообменника в одной конструкции (воздухонагревателя).

## 1.6 Цели и задачи исследования

Анализируя существующие конструкции и технологии влагоудаления, можно выделить основные тенденции: использование аппаратов с высокими коэффициентами тепломассообмена (циклонные сушильные установки, установки с кипящим слоем и т.д.) даёт высокие скорости влагоудаления при неравномерной влажности продукта, позволяет реализовывать процесс на малогабаритных, энергонасыщенных установках, но несколько проигрывает в эффективности использования тепловых источников. Использование

барабанных и ленточных установок [109] обладает большей энергетической эффективностью, но габариты установок весьма значительны, скорости влагопереноса относительно невелики, и время сушки больше, но равномерность влажности по объёму получаемого продукта выше.

Учитывая, что проблема повышения энергоэффективности и повышения качества сырья превалирующая, наиболее актуальными являются задачи сокращения времени влагоудаления и более полного использования тепло-энергоносителей. Таким образом, именно в повышении эффективности процесса влагоудаления даёт возможность снизить стоимость изготовления конечного продукта. Правильное решение вопросов выбора сушильного оборудования при проектировании установок по производству продуктов с низким остаточным содержанием влаги в значительной мере определяет технологический уровень и экономичность производства, а также качество готового продукта.

Рассматривая вопросы повышения экономичности сушильных установок, снижения расхода теплоносителя и снижения затрат электроэнергии в калориферах нельзя не рассмотреть вопросы схем существующих и перспективных систем влагоудаления. Анализ литературных источников показывает, что наиболее перспективным для сушки капиллярно пористых тел является совершенствование комбинированных устройств и СВЧ и конвекционным подводом тепла.

Повысить интенсивность влагоудаления с продукта можно продувкой потоком атмосферного воздуха, также увеличить тепловлагообмен за счет осциллирующего (пульсационного) нагрева.

Исходя из приведённого выше становится ясно, что **цель исследования:** Обоснование параметров СВЧ установки, позволяющей повысить эффективность влагоудаления из абрикосов и ядер подсолнечника путём использования регенеративного вращающегося воздушнонагревателя.

**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.

Для снижения энергетических затрат на процесс сушки необходимо обосновать параметры воздухонагревателя для осциллирующей сушки, что требует решить ряд задач.

1. Обосновать метод повышения энергоэффективности влагоудаления из плодов абрикосов и ядер подсолнечника с использованием СВЧ-установки, оснащённой вращающимся регенеративным воздухонагревателем.

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

3. Обосновать метод проектирования систем регенерации тепловой энергии объединяющих транспортные функции и функции нагрева сушильного агента для установок удаления влаги из сельхозпродукции.

4. Обеспечить повышение энергоэффективности процесса переработки сельскохозяйственной продукции путём обоснования технических решений и режимных параметров работы установки, использующей конвективный и СВЧ нагрев, с вращающимся шнеком для транспортировки абрикосов и ядер подсолнечника и системой регенерации тепла.

## **Глава 2 Математическое моделирование энергоэффективных комбинированных сушильных установок, использующий конвективный и СВЧ-подвод**

2.1 Математическое моделирование комбинированного процесса СВЧ и конвекционной сушки

Обоснование режимов интенсивности подвода тепла, также обоснование параметров периодичности охлаждения поверхности, следовательно, и расходов горячего и холодного теплоносителя в условиях объёмного тепловыделения, связанного с воздействием микроволнового излучения, основываются на механизмах переноса влаги в структурном материале продуктов растениеводства. Наиболее эффективным представляется обоснование режимов влагоудаления на основании методов математического моделирования.

### 2.1.1 Примененная математическая модель

Анализ существующих моделей сушки сельхоз продукции показывает, что от верного выбора начальных упрощающих расчёты положений во многом зависит как достоверность результатов моделирования, так и сложность реализации численного эксперимента. Рассматривая капиллярно пористые тела, подвергающиеся процедуре влагоудаления, необходимо заметить, что уже ко 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. Учитывая,

приведённые ограничения для решения задачи перемещения влаги при сушке тела была применена модель (см. 2.12) нестационарного процесса в одномерной постановке, созданная на базе классической модели Лыкова.

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = D \cdot \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + D \cdot \rho \cdot \delta \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \varepsilon \cdot \frac{r}{c} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{Q_b}{c \cdot \rho} \quad (2.2)$$

Масса удаляемой влаги

$$m_B = -D \cdot \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial x} - D \cdot \delta \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.3)$$

Здесь:  $\delta$  – коэффициент термодиффузии;  $x$  – базовая координата;  $\varepsilon$  – критерий испарения;  $D$  – коэффициент диффузии;  $u$  – влагосодержание,  $\alpha$  – температуропроводность;  $r$  – скрытая теплота парообразования;  $c$  – теплоёмкость;  $T$  – температура;  $\tau$  – время;  $Q_b$  – внутренний источник тепла вызванный воздействием СВЧ излучения,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2$ .

$$Q_b = P_{\text{уд}} \cdot V \quad (2.4)$$

$P_{\text{уд}}$  – удельная мощность подводимая СВЧ излучением,  $V$  – объём.

## 2.2 Определение зависимости термодиффузионного коэффициента

Для решения задачи нахождения объёмного распределения температуры и влагосодержания необходима зависимость коэффициента термодиффузии как непрерывной функции температуры и влагосодержания. Все найденные в литературе зависимости были функциями двух параметров. Для нахождения непрерывной функции термодиффузионного коэффициента данные исследователей, для интересующих культур и отходов производства преобразовывались в единое поле значений, далее методами регрессионного анализа определялась зависимость термодиффузионного коэффициента как непрерывной функции температуры и влагосодержания.

Ниже приводятся основные зависимости, положенные в основу сводных данных по значениям термодиффузионного коэффициента. А.В. Лыков в своей монографии приводит как эмпирические зависимости для расчётов, так и экспериментальные данные, так приведена зависимость для капиллярно-пористого тела (на примере сосны рис 2.1):

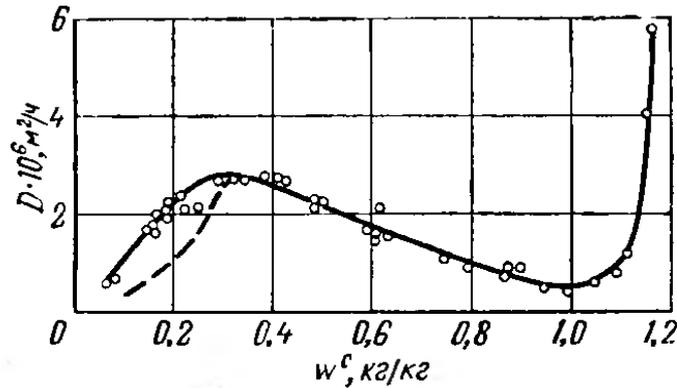


Рисунок 2.1 – Зависимость коэффициента диффузии  $D$  древесины (сосна) от ее влагосодержания  $\omega^c$  ( $v=30^0\text{C}$ ) по методике Лыкова

А.В. Лыков [54] описал зависимость коэффициента влагопроводности от влажности. Графическая зависимость при наличии осмотической влаги полученная А.В. Лыковым в капиллярно-пористых и коллоидных телах приведена на рис. 2.1. Расчётная кривая [56] определения коэффициент диффузии при этом равна:

$$D = \frac{C}{1 - A\gamma_0\omega^c} \left( \frac{T}{1000} \right)^n \quad (2.5)$$

Где  $A$ ,  $C$  и  $n$  – эмпирические константы. Для капиллярно-пористых тел  $A=0,0032$ ,  $n=20$ ,  $C=(0,7-50)10^5$ ; для коллоидных тел  $A=0,0008$ ,  $n=7$ ; для капиллярно-пористых коллоидных тел  $A=0,0019$ ,  $n=10$ ,  $C=0,6-13$ .

Расчёт по зависимостям, приведённым А.В. Лыковым [54-56] для условий тестовых задач дал следующие результаты рис 2.2:

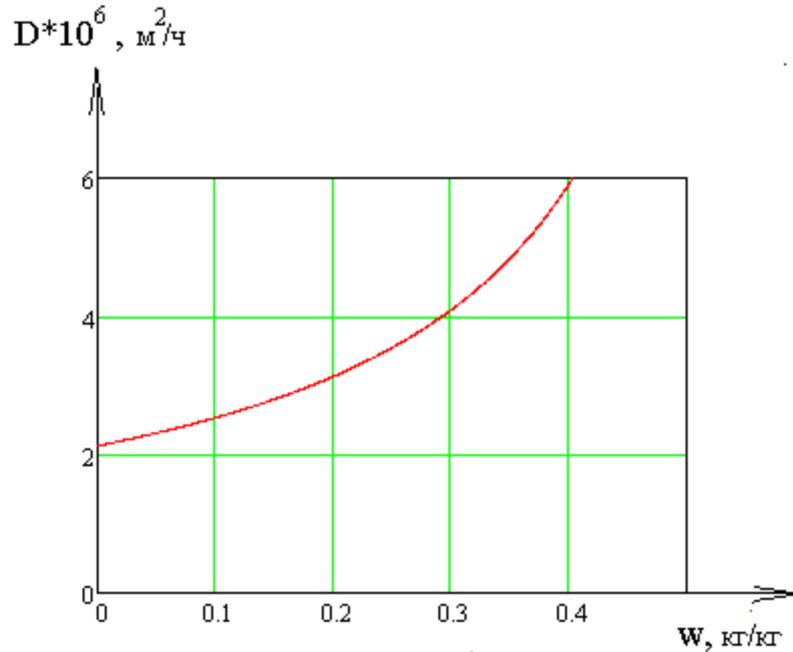


Рисунок 2.2 – Коэффициент диффузии рассчитанный по зависимости  
А.В.Лыкова

По данным исследования проведённого Г.А. Баланцевым [20] коэффициент влагопроводности в зависимости от состояния пиломатериалов для древесины ядра сосны в тангенциальном направлении:

$$D_{\text{тан}} = 0,235 \cdot 10^{-31} T^{10} \rho_{\text{усл}}^{-3,3} \quad (2.6)$$

для древесины заболони в тангенциальном направлении:

$$D_{\text{тан}} = 0,235 \cdot 10^{-31} T^{10} \rho_{\text{усл}}^{-3,9}$$

где  $\rho_{\text{усл}}$  – условная плотность древесины; т/м<sup>3</sup>

T – температура древесины, К.

Анализ экспериментальных данных Ю. А. Гостеева по влагопроводности сосны показал значительное до 17 раз отличие этого параметра для продольного и поперечного направления древесины. Так в продольном направлении осреднённое значение влагопроводности, составило  $6,2 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с. В тангенциальном направлении значение влагопроводности, составило  $3,7 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с. [39]. Данные получены при температуре 20<sup>0</sup>С для заболони сосны.

Анализ данных исследователей показал, что коэффициент влагопроводности значительно зависит не только от ориентации волокон, и зоны

древесного ствола, но и от породы древесины. Так для лиственницы и сосны поперёк волокон М.В. Коломина [49] приводит следующие данные по коэффициенту влагопроводности при температуре 20°C:

Лиственница- коэффициент равен  $1 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с;

Сосна - коэффициент равен  $2,5 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с.

Причём даже у одной породы, но для яровой зоны и заболотной зоны, из-за разницы проницаемости клеток интенсивность распространения влаги будет разная. Эксперименты М.В. Коломина [49] качественно подтверждают данные Ю. А. Гостеева о разности скорости транспортировки воды вдоль и поперёк волокон, соответственно для сосны в 1,15 раза, для бука в 1,7 раза, для дуба 1,5 раза.

Данные Е.А. Пинчевской [91] для коэффициента влагопроводности  $D$ /см<sup>2</sup>/с, изменяется по логарифмической зависимости от температуры:

Для радиального направления:

$$D_p = (2,1 \cdot \ln t - 5,93) \cdot 10^{-6} \text{см}^2/\text{с} \quad (2.7)$$

Для тангенциального направления:

$$D_m = (2,1 \cdot \ln t - 5,54) \cdot 10^{-6} \text{см}^2/\text{с} \quad (2.8)$$

В трудах Гороховского А.Г. приводится методика расчёта коэффициента влагопроводности с помощью нормированного значения:

$$\bar{a}_m = \frac{a_m}{a_{mн.г.}}, \quad (2.9)$$

где  $a_{mн.г.}$  – значение коэффициента влагопроводности при  $W = W_{п.г.}$

Нормированный коэффициент влагопроводности описывается следующими уравнениями регрессии от влажности для различных пород древесины:

#### Сосна

$$\bar{a}_m = -1,695 \cdot 10^{-9} W^5 + 5,775 \cdot 10^{-7} W^4 - 6,057 \cdot 10^{-5} W^3 + 2,063 \cdot 10^{-3} W^2 + 5,764 \cdot 10^{-3} W + 0,169 \quad (2.10)$$

#### Лиственница

$$\bar{a}_m = -3,362 \cdot 10^{-11} W^5 + 2,43 \cdot 10^{-7} W^4 - 3,786 \cdot 10^{-5} W^3 + 1,429 \cdot 10^{-3} W^2 + 0,013 W + 0,146 \quad (2.11)$$

#### Береза

$$\bar{a}_m = -1,302 \cdot 10^{-9} W^5 + 4,958 \cdot 10^{-7} W^4 - 5,502 \cdot 10^{-5} W^3 + 1,904 \cdot 10^{-3} W^2 + 7,601 W + 0,163 \quad (2.12)$$

### Дуб

$$\bar{a}_m = -1,096 \cdot 10^{-9} W^5 + 4,547 \cdot 10^{-7} W^4 - 5,222 \cdot 10^{-5} W^3 + 1,826 \cdot 10^{-3} W^2 + 8,459 \cdot 10^{-3} W + 0,16 \quad (2.13)$$

Данные С.С. Ефимова приведены на рис 2.3 [39].

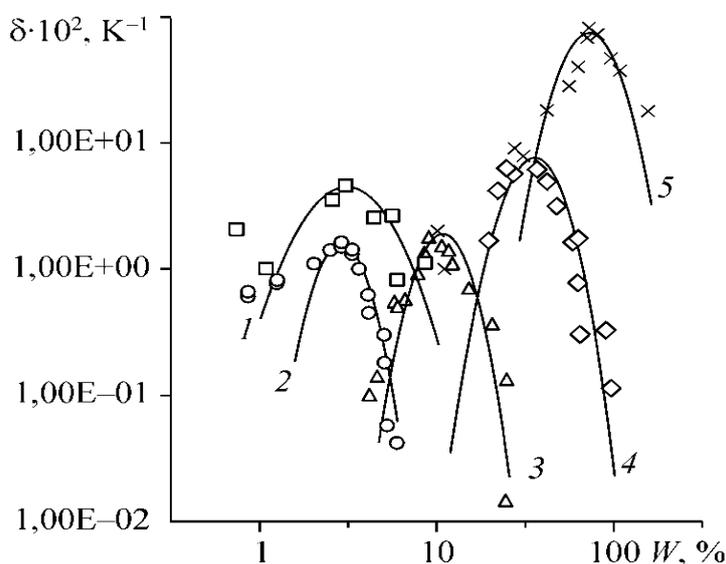


Рисунок 2.3 — График экспериментальных данных и аппроксимирующих кривых: 1 — кирпич красный, 2 — песок речной, 3 — суглинок покровский, 4 — бумага фильтровальная, 5 — опилки сосновые.

Термодиффузионный коэффициент в С.С. Ефимове рассчитывается по формуле [39].

$$\delta = - \left( \frac{\Delta W}{\Delta T} \right)_{J_m=0} \quad (2.14)$$

где индекс  $J_m = 0$  показывает наступление стационарного состояния.

Зависимость термодиффузионного коэффициента:

$$\delta(W) = A_\delta \exp \left( - \frac{(\ln W - \ln W_m)^2}{B_\delta} \right) \quad (2.15)$$

где:  $W_m$  — влажность, соответствующая максимуму термодиффузионного коэффициента,  $A_\delta$  и  $B_\delta$  — постоянные зависящие от рода и зоны древесины.

В работе А.А. Федяева термодиффузионный коэффициент находился, при условии равенства направления диффузионных потоков пара и жидкости [113].

$$\delta = \frac{D_{m_1} \delta_1 + D_{m_2} \delta_2}{D_{m_1} + D_{m_2}}; \quad (2.16)$$

Термодиффузионный коэффициент  $\delta$  определил А.А. Федяев экспериментально (рис 2.4), как отношение изменения влагосодержания к разности температур, но при отсутствии массопереноса.

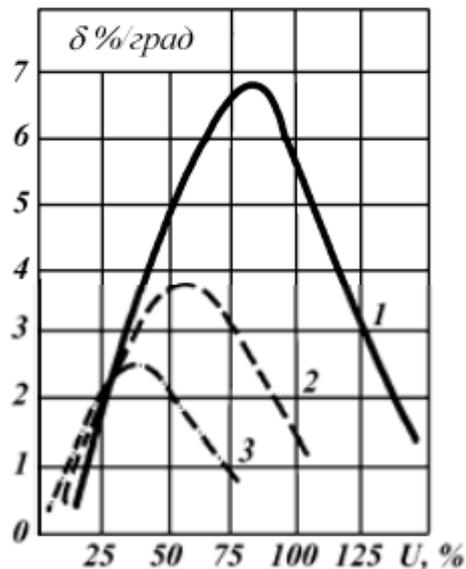


Рисунок 2.4 – Зависимость термодиффузионного коэффициента  $\delta$  (1 – 40°C; 2 – 70° С; 3 – 100°C) от влажности древесины (сосна) [106].

М. Тепнадзе термодиффузионный коэффициент выдела следующим образом [103]:

$$\delta = \frac{dU}{dt} = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \delta_p \quad (2.17)$$

Относительный коэффициент термодиффузии  $\delta$  равен термодиффузионному коэффициенту  $\delta_p$ .

Общим недостатком найденных в литературе данных по определению термодиффузионного коэффициента является их дискретность, универсальной зависимости аналитически связывающих влагосодержание, температуру и термодиффузионный коэффициент не обнаружено. Для повышения точности расчётов эта зависимость крайне необходима.

Учитывая, разобщённость представленных данных и отсутствие зависимости термодиффузионного коэффициента от влажности материала, и температуры значительно затрудняет, проведение процедуры численного моделирования процесса внутреннего массопереноса. Для решения поставленной задачи коэффициенты при определении влагопроводности были

скорректированы по экспериментальным данным А.В. Лыкова [70] и А.Г. Гороховского [82], и данным М. Тепнадзе [110] и д.р., для древесины сосны сводные данные приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Сводные данные по значениям термодиффузионного коэффициента

T \ U	20, °C	30, °C	40, °C	50, °C	60, °C	70, °C	80, °C	90, °C	100, °C
20, %	3,0	2,5	2,1	1,8	1,6	1,5	1,5	1,6	1,8
30, %	4,5	3,9	3,3	2,9	2,5	2,3	2,1	2,1	2,2
40, %	5,8	5,0	4,3	3,7	3,3	2,9	2,6	2,4	2,3
50, %	6,9	5,9	5,1	4,4	3,7	3,2	2,8	2,5	2,3
60, %	7,7	6,6	5,6	4,8	4,0	3,3	2,8	2,3	1,9
70, %	8,3	7,1	5,9	4,9	4,0	3,2	2,5	1,9	1,4
80, %	8,6	7,3	6,0	4,9	3,8	2,9	2,0	1,3	0,6
90, %	8,7	7,2	5,8	4,5	3,3	2,3	1,3	0,4	0
100, %	8,6	7,0	5,4	4,0	2,6	1,4	0,3	0	0

U - влагосодержание, %;

t - температура, °C.

Оценивая приведенные выше экспериментальные данные хорошо заметно, что распределение коэффициента термодиффузии в зависимости от изменения влагосодержания при фиксированной температуре представляет параболическую зависимость. Это определяет тип многопараметрической регрессии, которая способна записывать коэффициент термодиффузии, как функцию состояния при непрерывном изменении влагосодержания и температуры. В конечной форме для нахождения коэффициентов регрессии воспользуемся методом Гаусса. Поиск решения будем проводить в виде уравнения многопараметрической регрессии параболического вида:

$$y = a + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} \cdot x_1^2 + \beta_{22} \cdot x_2^2 + \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \varepsilon \quad (2.18)$$

Где коэффициент  $\beta_j$  регрессии находим как:

$$\beta_1 = \frac{\partial y}{\partial x_1}, \beta_2 = \frac{\partial y}{\partial x_2}, \dots, \beta_p = \frac{\partial y}{\partial x_p}. \quad (2.19)$$

Где  $\alpha$  - свободный членом и определяется их условия равенства нулю всех объясняющих переменных.

Преобразуем полученное уравнение с использованием:

$$t_1 = x_1, \quad t_2 = x_2, \quad t_3 = x_1^2, \quad t_4 = x_2^2, \quad t_5 = x_1 x_2,$$

Полученное преобразованное уравнение представляет собой классическое линейное уравнение многопараметрической регрессии:

$$y = a + \beta_1 \cdot t_1 + \beta_2 t_2 + \beta_3 \cdot t_3 + \beta_4 \cdot t_4 + \beta_5 \cdot t_5 + \varepsilon \quad (2.20)$$

Для решения подобного регрессионного уравнения используем метод наименьших квадратов, после преобразования получим одновременно решаемую систему уравнений:

$$t_y = \beta_1 \cdot t_{x_1} + \beta_2 \cdot t_{x_2} + \dots + \beta_p \cdot t_{x_p} + \varepsilon \quad (2.21)$$

$$t_y, t_{x_1}, \dots, t_{x_p}$$

$$t_y = \frac{y - \bar{y}}{\sigma_y}, \quad t_{x_i} = \frac{x_i - \bar{x}_i}{\sigma_{x_i}}$$

$$\bar{t}_y = \bar{t}_{x_i} = 0, \quad \sigma_{t_y} = \sigma_{t_{x_i}} = 1$$

$$\sum t_y t_{x_1} = \beta_1 \sum t_{x_1}^2 + \beta_2 \sum t_{x_1} t_{x_2} + \beta_3 \sum t_{x_1} t_{x_3} + \dots + \beta_p \sum t_{x_1} t_{x_p}$$

$$\sum t_y t_{x_2} = \beta_1 \sum t_{x_1} t_{x_2} + \beta_2 \sum t_{x_2}^2 + \beta_3 \sum t_{x_2} t_{x_3} + \dots + \beta_p \sum t_{x_2} t_{x_p}$$

$$\sum t_y t_{x_p} = \beta_1 \sum t_{x_1} t_{x_p} + \beta_2 \sum t_{x_2} t_{x_p} + \beta_3 \sum t_{x_3} t_{x_p} + \dots + \beta_p \sum t_{x_p}^2$$

В конечной форме для нахождения коэффициентов регрессии воспользуемся методом Гаусса. Математическую обработку по схеме приведённой выше в вычислительном пакете «MATCAD», Применялся метод наименьших квадратов. Автором полечена зависимость  $\delta$  как функции  $T$  (температуры) и  $U$  (влажности).

$$\delta = 0,241 \cdot U - 0,048T - 1,412 \cdot 10^{-3} U \cdot T - 1,188 \cdot 10^{-3} U^2 + 5,086 \cdot 10^{-4} T^2 \quad (2.22)$$

$T$  – температура, при которой происходит исследование данного объекта, на данный момент времени, °C;

$U$  – влажность, данного объекта, %

Данная зависимость позволяет определять значения термодиффузионного коэффициента как непрерывную функцию от влагосодержания и температуры.

Автором получена зависимость  $\delta$  как функции  $T$  (температуры) и  $U$  (влажности) для древесины:

$$\delta = 0,241 \cdot U - 0,048T - 1,412 \cdot 10^{-3}U \cdot T - 1,188 \cdot 10^{-3}U^2 + 5,086 \cdot 10^{-4}T^2 \quad (2.23)$$

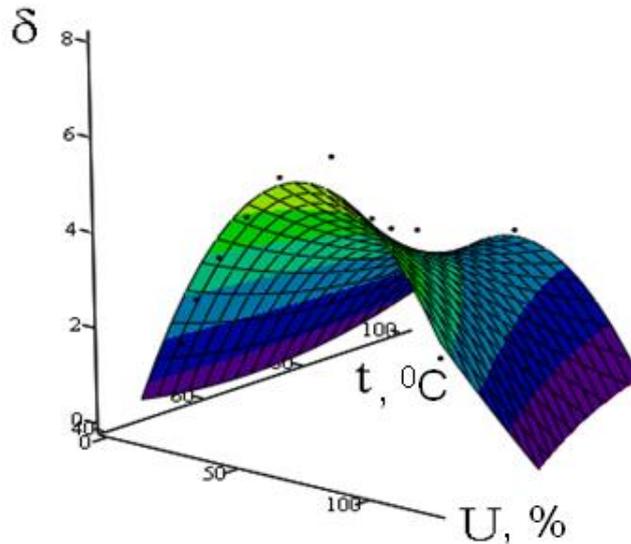
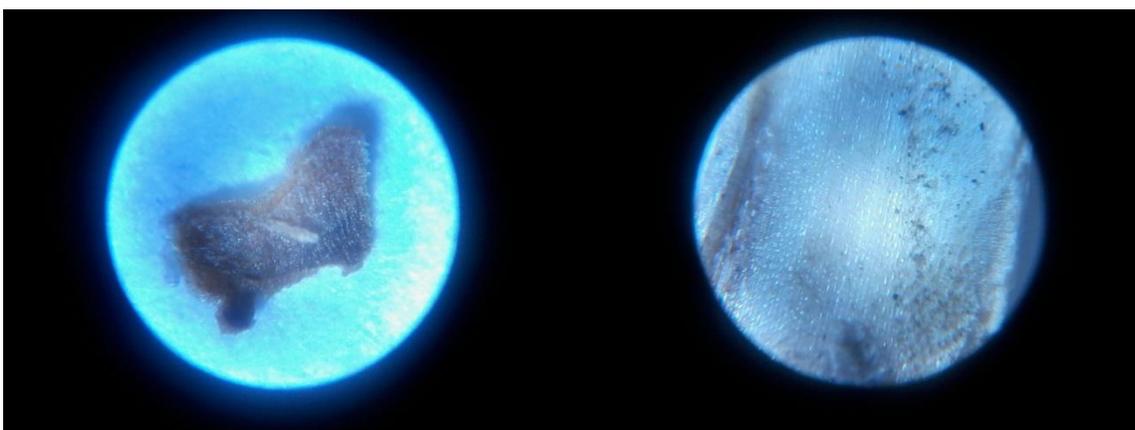


Рисунок 2.5 Термодиффузионный коэффициент древесины

Для гречихи рисунок 2.6(а), соломы рисунок 2.6(б) и подсолнечника были проведены эксперименты по методике А.Г. Гороховского[82].



а

б

Рисунок 2.6 - Структура капилляров гречихи (а), соломы (б)

Результаты обрабатывались по методике приведённой для древесины.

Автором получена зависимость  $\delta$  как функции  $T$  (температуры) и  $U$  (влажности) для гречихи:

$$\delta = 0,256 \cdot U + 0,012T - 1,172 \cdot 10^{-3}U \cdot T - 1,838 \cdot 10^{-3}U^2 - 6,028 \cdot 10^{-6}T^2 \quad (2.24)$$

Автором получена зависимость  $\delta$  как функции  $T$  (температуры) и  $U$  (влажности) для подсолнечника (ядра):

$$\delta = 0,336 \cdot U - 9,528 \cdot 10^{-3}T - 1,246 \cdot 10^{-3}U \cdot T - 2,82 \cdot 10^{-3}U^2 + 7,288 \cdot 10^{-5}T^2 \quad (2.25)$$

$T$  – температура, при которой происходит исследование данного объекта, на данный момент времени,  $^{\circ}\text{C}$ ;

Автором получена зависимость  $\delta$  как функции  $T$  (температуры) и  $U$  (влажности) для абрикоса (без косточек):

$$\delta = 0,456 \cdot U + 0,015T - 2,252 \cdot 10^{-3}U \cdot T - 1,68 \cdot 10^{-3}U^2 - 2,028 \cdot 10^{-6}T^2 \quad (2.26)$$

### 2.3 Математические описания тепловыделения при сушке СВЧ-энергоподводом

Под диэлектрическим нагревом в работе понимается процесс преобразования подведённой энергии электромагнитного поля (СВЧ) в теплоту помещённого в поле тела.

Большинство высушиваемых продуктов, таких как овощи, фрукты, зерновые и мясо, а также отходы переработки древесины могут рассматриваться как диэлектрические материалы. Под воздействием электромагнитного поля в этих материалах наблюдается нагрев, вызванный наличием диэлектрических потерь. На величину преобразования энергии электромагнитного поля в тепловую влияет частота поля, квадрат напряжённости поля и коэффициент диэлектрических потерь.

Основным достоинством СВЧ-нагрева является высокая интенсивность подвода мощности к объекту и объёмный нагрев, но из-за высоких цен на электрическую энергию практическое применение в сельском хозяйстве не получило. Улучшить показатели экономической эффективности можно за счёт

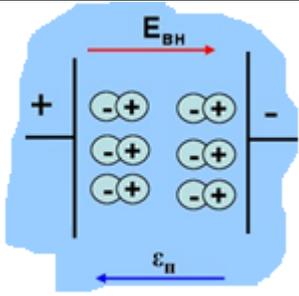
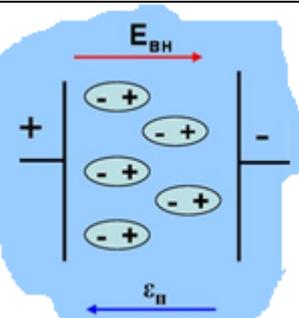
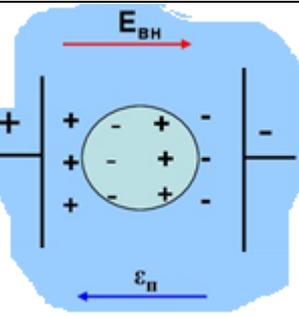
использования комбинированных систем, использующих конвективный и СВЧ подвод тепла и оснащённых системой регенерации тепловой энергии.

Что бы происходил равномерный нагрев необходимо использовать конвекцию. При изучении конвекции основным фактором является изучение температурного градиента и глубину засыпки. Что бы равномерно нагреть слой необходимо увеличить время и постепенно подводить тепло. При использовании СВЧ-энергии полностью снимаются проблемы равномерного распределения температуры, так как СВЧ-энергию можно подводить к материалу, не снимая защитных оболочек. Готовый продукт получаем не загрязненным, чистым и состав витаминов остается таким же, что до процесса сушки.

Под воздействием переменного электромагнитного поля перемещение зарядов и молекул, сопровождаемое внутренним межмолекулярным трением заряженных частиц, преобразующим работу поля в теплоту. Из основ электротехники известно, что только для проводников, в отличие от диэлектриков характерно наличие свободных электронов. Диэлектрики принято разделять на полярные и неполярные. Из-за наличия высокого содержания полярных молекул воды в фруктах и ягодах при оценке интенсивности тепловыделения под действием электромагнитного поля эти среды рассматриваются, как полярные диэлектрики, имеющие соответствующий уровень диэлектрических потерь.

Таблица 2.2 – Виды поляризации

Наименование	Схема	Описание
Электронная		Под действием внешнего электронного поля происходит разрушение электронных орбиталей атома.

Ионная		Вдоль направления электрического поля происходит смещение ионов в кристаллической решетке, с дальнейшим разделением на подрешетки положительных и отрицательных атомов.
Дипольная		Диполи встают в ряд вдоль силовых линий под действием внешнего поля
Структурная		Возникает в примесях, где ионы двигаясь в слоях с высокой электропроводностью останавливаются с слоев малой электропроводностью

Различие неполярных и полярных диэлектриков, это наличие дипольного момента.

Кислород, входящий в состав молекулы воды имеет шесть внешних электронов с заполненными на половину две  $p$ -орбиты, образующие две  $p$ -связи в молекуле воды с двумя атомами водорода. Валентный угол водорода равен  $90^\circ$  и  $p$ -связи перпендикулярны, соответственно атомы водорода отталкиваются и образуют угол  $104^\circ$  с возникновением электрического момента. Под действием внешнего электрического поля создается вращательный момент с зарядами  $+q$  и  $-q$  на дипольную молекулу. Диполь из-за момента вращения меняет направления поля. Момент вращения пропорционален произведению  $\mu E$ .

Именно дипольная структура молекул воды обеспечивает преобразование энергии переменного электромагнитного поля в тепло.

Диэлектрическая проницаемость записывается следующим образом:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon'(1 - jtg\delta) \quad (2.27)$$

$\delta$  - удельная проводимость среды;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды.

Расчет действительной диэлектрической проницаемости среды:

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon'_a}{\varepsilon_0} \quad (2.28)$$

Расчет мнимой части диэлектрической проницаемости среды:

$$\varepsilon'' = \frac{\varepsilon''_a}{\varepsilon_0} + \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (2.29)$$

$\omega$  – угловая частота, при  $\varepsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ .

$$\tan \delta = \tan \delta_1 + \tan \delta_2 = \frac{\varepsilon''_a}{\varepsilon'_a} + \frac{\sigma}{\omega\varepsilon'_a} \quad (2.30)$$

Где  $\varepsilon''_B = \frac{\sigma}{\omega}$ ,  $\tan \delta_1 = \frac{\varepsilon''_a}{\varepsilon'_a}$ ,  $\tan \delta_2 = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon'_a} = \frac{\varepsilon''_B}{\varepsilon'_a}$

Удельная мощность тепловых потерь при гармонических колебаниях равна [102]:

$$P_{уд} = \frac{\omega\varepsilon''_B}{2} |\vec{E}|^2 + \frac{\omega\varepsilon''_a}{2} |\vec{E}|^2 + \frac{\omega\mu''_a}{2} |\vec{H}|^2 \quad (2.31)$$

Где  $E$  и  $H$  – вектора по смещения по фазе;  $\frac{\omega\varepsilon''_B}{2} |\vec{E}|^2$  - объемная плотность мощности.

За объемную плотность мощности, выделяемую за счёт электропроводности, отвечает первый член уравнения, а так как проводимость диэлектрика равна нулю, то первый член уравнения равен нулю.

На электронную оболочку атома воздействует внешнее магнитное поле и атом движется вокруг направления поля, корректируя движение с учетом угловой скорости. Вызываемое «внутреннее трение» связанное с изменением положения магнитных осей в переменных магнитных полях, происходит тепловыделению.

Третье слагаемое учитывает тепловыделение, вызываемое разворотом диполей под действием магнитных полей. Для воды первая производная равна единице  $\mu'_a=1$ , то вторая равна нулю  $\mu''_a=0$ , мы можем пренебречь третьим слагаемым. Получаем следующее выражение [102]:

$$P_{уд} = \frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon''}{2} |\vec{E}|^2 = 0,556 \cdot 10^{-10} f \varepsilon'' |\vec{E}|^2 \quad (2.32)$$

Удельную мощность  $P_{уд}$  можно записать следующим образом:

$$P_{уд} = 0,556 \cdot 10^{-10} f \varepsilon' \tan \delta |\vec{E}|^2 \quad (2.33)$$

$f$  – частота Гц;

$\delta$  – угол диэлектрических потерь;

$E$  – напряженность электрического поля В/м.

Увеличение вектора  $\vec{E}$ , приводит к интенсификации нагрева за счёт роста потерь в мощности. При этом, растёт давление пара в капиллярах создавая угрозу разрушения объекта сушки.

Частота в СВЧ-нагревателях принята 2,245 ГГц что обеспечивает близкую к оптимальной глубину проникновения электромагнитных волн в объект сушки.

Для определения процесса проникновения электромагнитных волн  $\delta_E$  связанный с расстоянием с уменьшением напряженности в  $e$  раз, получим следующее [102]:

$$\delta_E = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{2\varepsilon'(\sqrt{1+\tan^2\delta}-1)}} \quad (2.34)$$

Нужно учесть, что если  $\tan\delta \ll 1$ , то тогда выражение будет выглядеть следующим образом.

$$\delta_E = \frac{\lambda}{\pi \tan \delta \sqrt{\varepsilon'}} \quad (2.35)$$

Значение  $\delta_E$  в общем случае может не соответствовать глубине термообработки, поскольку  $\varepsilon'$  и  $\tan\delta$  являются функциями температуры, следовательно изменение температуры и в следствии теплопроводности приводит к изменению  $\delta_E$ .

Лишь решив комплексную задачу распространения тепла в теле с внутренними источниками теплоты можно оценить глубину термообработки объекта.

Если глубина воздействия СВЧ-поля больше толщины образца, то можно упростить решение.

Рассмотрим задачу в одномерной постановке.

Объект принимаем длинным и тонким  $d \ll L$ .

Тело принимаем пластиной ( $0 \leq \chi < \infty$ ).

Известно, что при СВЧ-нагреве тепловыделение оценивается как мощность внутренних источников тепла меняющееся по экспоненциальному закону в зависимости от расстояния до объекта.

$$\frac{P_{уд}}{c\rho_0} = Ae^{-kx} \quad (2.36)$$

СВЧ –источник с мощностью  $A$  и  $c$  сколько поглотится СВЧ-энергии в  $k$  образец.

2.4 Математические описания тепловых балансов при комбинированной сушке конвекцией и с СВЧ-энергоподводом

Рассмотрим тепловой баланс процесса влагоудаления.

Подвод тепла

$$Q_{\text{подвода}} = Q_{\text{газа1}} + Q_{\text{сырья}} + Q_{\text{подогрева}} \quad (2.37)$$

где -  $Q_{\text{газа1}}$  теплота поступающая с газами на входе в сушильную установку кДж.

$$Q_{\text{газа1}} = M_{\text{газа}} \times h_{\text{газа1}} \quad (2.38)$$

$M_{\text{газа}}$  - масса газа.

Удельная энтальпия газа кДж/кг

$$h_{\text{газа1}} = (C_{\text{газ}} + C_{\text{воды}} \times X) \times t_0 + r \times X \quad (2.39)$$

Где  $C_{\text{газ}}$  - теплоёмкость газа кДж/кг\*К;  $C_{\text{воды}}$  -теплоёмкость паров воды кДж/кг\*К;  $r$  - удельная теплота парообразования кДж/кг;  $X$  - влагосодержание газа кг/кг;

$$Q_{\text{сырья}} = H = h_{\text{сыр}} + h_{\text{воды}} + h_{\text{газ}} \quad (2.40)$$

Где  $h_{\text{сыр}}$ ,  $h_{\text{воды}}$ ,  $h_{\text{газ}}$  энтальпия сухого сырья, свободной воды в сырье, влажного газа в порах, кДж.

$$h_{\text{сыр}} = m_{\text{сыр}} \times C_{\text{сыр}} \times t_{\text{н}} \quad (2.41)$$

где  $h_{\text{сыр}}$  масса сырья сухого кг;  $C_{\text{сыр}}$  – теплоёмкость сырья сухого кДж/кг\*К;

$t_{\text{н}}$  – температура сырья начальная.

$$h_{\text{воды}} = m_{\text{всыр}} \times C_{\text{всыр}} \times t_{\text{н}} \quad (2.42)$$

где  $m_{\text{всыр}}$  – масса воды в сырье кг;  $C_{\text{всыр}}$  – теплоёмкость воды кДж/кг\*К;

$h_{\text{газ}}$  – энтальпия газа в порах сырья при температуре  $t_{\text{н}}$  кДж.

Отвод тепла

$$Q_{\text{отвода}} = Q_{\text{газа2}} + Q_{\text{сырья2}} \quad (2.43)$$

где  $Q_{\text{газа2}}$  – теплота отводимая с газами на выходе из сушильной установки

$$Q_{\text{газа2}} = M_{\text{газа2}} \times h_{\text{газа2}} \quad (2.44)$$

$M_{\text{газа}}$  - масса газа.

Удельная энтальпия газа кДж/кг

$$h_{\text{газа2}} = (C_{\text{газ}} + C_{\text{воды}} \times X2) \times t_0 + r \times X2 \quad (2.45)$$

Где  $C_{\text{газ}}$  - теплоёмкость газа кДж/кг\*К;  $C_{\text{воды}}$  - теплоёмкость паров воды

кДж/кг\*К;  $r$  - удельная теплота парообразования кДж/кг;  $X2$  - влагосодержание газа на выходе кг/кг;

$$Q_{\text{сырья2}} = H = h_{\text{сыр2}} + h_{\text{воды2}} + h_{\text{газ2}} \quad (2.46)$$

Где  $h_{\text{сыр2}}$ ,  $h_{\text{воды2}}$ ,  $h_{\text{газ2}}$  энтальпия сухого сырья, свободной воды в сырье, влажного газа в порах, кДж.

$$h_{\text{сыр2}} = m_{\text{сыр}} \times C_{\text{сыр}} \times t_{\text{к}} \quad (2.47)$$

Где  $h_{\text{сыр}}$  масса сырья сухого кг;  $C_{\text{сыр}}$  – теплоёмкость сырья сухого кДж/кг\*К;

$t_{\text{к}}$  – температура сырья конечная.

$$h_{\text{воды2}} = m_{\text{всыр2}} \times C_{\text{всыр}} \times t_2 \quad (2.48)$$

где  $m_{\text{всыр2}}$  – масса воды в сырье на выходе кг;  $C_{\text{всыр}}$  – теплоёмкость воды кДж/кг\*К;

$h_{\text{газ}}$  – энтальпия газа в порах сырья при температуре  $t_{\text{к}}$  кДж.

Масса удалённой воды  $\Delta M_{\text{воды}} = m_{\text{всыр1}} - m_{\text{всыр2}}$ ;

Энтальпия удаляемых из брикета паров воды:  $H_{\text{вывод}} = h_{\text{воды}} \times \Delta M_{\text{воды}}$

Передача тепла сырию:

$$Q = F \times \alpha \times \Delta t \times \tau + Q_b = Q_{\text{сырья2}} - Q_{\text{сырья1}} - h_{\text{пв}} \Delta M_{\text{воды}} \quad (2.49)$$

где  $F$  – площадь поверхности теплообмена;  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи;  $\Delta t$  – градиент температур;  $\tau$  – время сушки;  $Q_b$  – внутренний источник тепла вызванный воздействием СВЧ излучения.

Отсюда определяем количество удаляемой влаги (формула 2.3) с килограмма насыпной массы.

При имеющейся производительности установки и массы удаляемой влаги с килограмма сырья, мы определяем массу удаленной влаги в единицу времени, также нам известна температура газа и его начальное влагосодержание находим, какую массу влаги газ может принять на  $1 \text{ м}^3$  объема. Отсюда можно определить требуемый расход по газу, который является вместе с температурой газа после сушки исходным данным для расчета параметров воздухонагревателя.

## 2.5 Математическое моделирование системы регенерации тепловой энергии

Регенерация тепловой энергии, позволяет не только снизить прямые затраты электроэнергии, но организовать пульсирующий подвод тепла повышающий интенсивность влага удаления без дополнительных затрат энергии. Недостатком регенеративных нагревателей с неподвижной насадкой, при использовании в процессе утилизации низкопотенциальной тепловой энергии является цикличность работы, значительнее масса и габариты, кроме того нельзя полностью исключать выпадение сконденсированной влаги в каналах и забивание их продуктами выносимыми их сушильной камеры. Системы регенерации тепла с вращающейся насадкой во многом избавлены от этих недостатков, но требуют дополнительных воздуходувок для обеспечения движения газов. Мною предложена конструкция, позволяющая объединить функции теплообменника и нагнетателя газов в едином устройстве. В предлагаемой конструкции теплоаккумулирующая насадка, выполненная из сотового наполнителя с ориентированными каналами и расположенная на периметре вращающегося барабана, засвывает каналами газовую среду и передаёт ей кинетическую энергию. Одновременно газовые среды нагревают и

охлаждают соответствующие зоны каналов насадки. Таким образом, часть тепла отходящих газов из сушильной установки возвращается в технологический процесс с новым греющим агентом.

Принцип действия установки приведён на рис. 2.7. Расположение каналов вращающейся насадки представлено на рисунке 2.8.

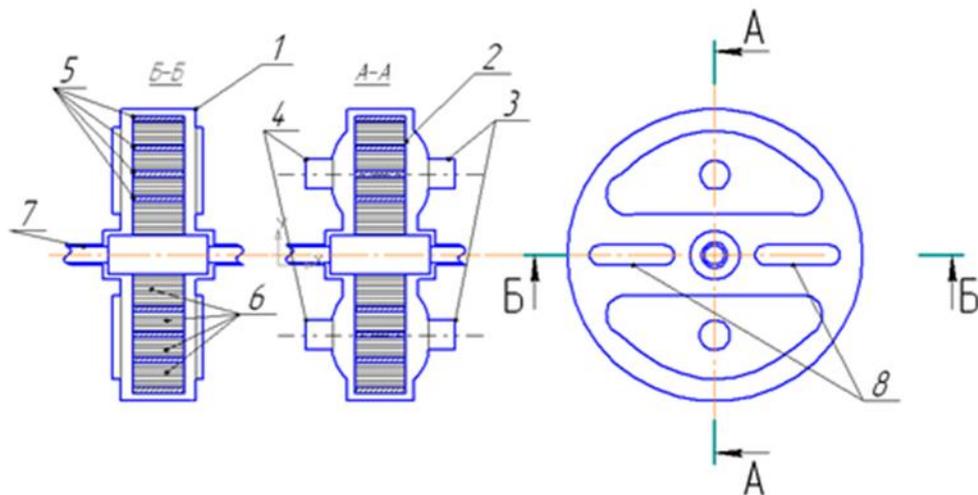


Рисунок 2.7 – Регенеративный воздухонагреватель.

1 – корпус, 2 – ротор, 3 – патрубки подвода теплоносителя, 4 – патрубки отвода теплоносителя, 5 – теплоаккумулирующая сотовая насадка, 6 – силовой элемент насадки, 7 – ось ротора, 8 - динамические уплотнения.

Для зон деления зон охлаждения и нагрева аппарата используются динамические уплотнения. Зоны подвода и отвода теплоносителя выполнены в боковых стенках корпуса установки. Использование сотовой насадки, выполненной из цветных металлов обладающих высокой теплоёмкостью, возможность осуществления теплообмена при развитом турбулентном движении, позволяет сократить габариты конструкции.

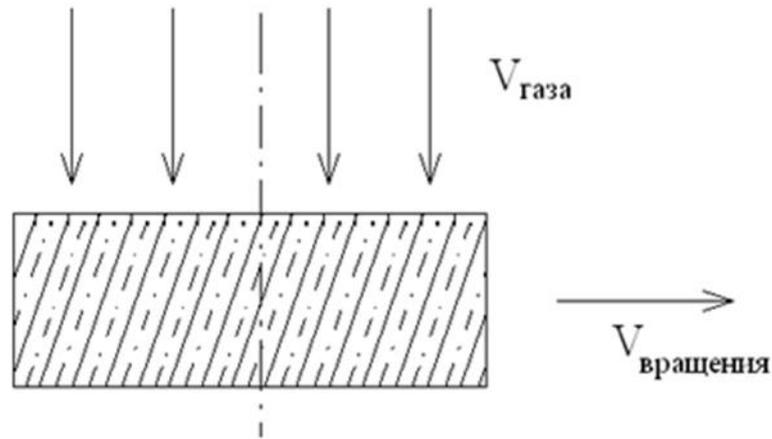


Рисунок 2.8 – Схема угла установки каналов.

Дальнейшим развитием данной конструкции явилась насадка с радиальным расположением каналов. Данный теплообменник объединяет функции безнапорной воздуходувки и регенеративного воздухонагревателя. Конструкция защищена патентом автора этой работы [Патент на изобретение RU№2614428 Регенеративный воздухонагреватель / Е.Н. Ахмедьянова, С.Н. Редников, О. С. Пташкина-Гирина от 28.03.2017 г.].

Разработана конструкция воздухонагревателя, объединяющая функции теплообменника и безнапорной воздуходувки, повышающая эффективность использования низкопотенциального тепла

#### 2.5.1 Математическое моделирование вращающегося регенеративного воздухонагревателя

При расчете вращающегося регенеративного воздухонагревателя надо учесть, что он сочетает качества вентилятора и регенератора вращающегося типа. Для расчета этой конструкции необходимо определять его рабочие параметры, как вентилятора, то есть расход идущий через каналы насадки при заданных оборотах и геометрии. По величине расхода, которую может обеспечить каналы вращающийся насадки определяется скорость в этих каналах. Скорость (рис 2.9) в каналах определяет интенсивность передачи теплоты, а теплоемкость, теплопроводность, толщина канала и масса насадки определяет количество передаваемого тепла.

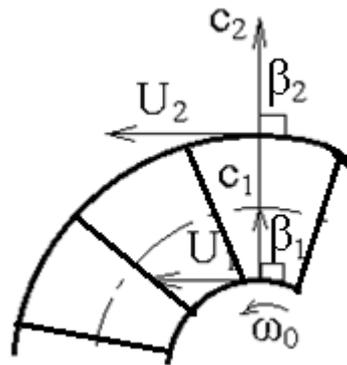


Рисунок 2.9 – Треугольники скоростей в радиальных каналах насадки.

Исходными данными для расчета являются требуемый объемный расход газа, температуры входа нагревающего и нагреваемого газа, плотность газовых сред, эквивалентный диаметр насадки и плотность материала насадки.

Площадь поверхности теплообмена вычисляется исходя из толщины шага ячеистого элемента на наружном диаметре ротора. Масса ротора вычисляется исходя из толщины ячеистого элемента и площади поверхности теплообмена. Одним из важных вопросов является соотношения длительности периодов нагрева и охлаждения насадки, так как тепловые градиенты существенно разные, то равные периоды нагрева и охлаждения не являются оптимальными. Следовательно, одна из задач расчета это нахождения оптимальных соотношений зон нагрева и охлаждения

Период нагрева:

$$\tau_2 = \frac{60}{n} \cdot K_i \quad (2.50)$$

$K_i$  – процент отвода зоны охлаждения;

$n$  – число оборотов.

Длительность периода охлаждения

$$\tau_x = \frac{60}{n} (1 - K_i) \quad (2.51)$$

Индексы: х– охлаждение, г – нагрев

Движение потока газа идущего через ротор воздухонагревателя можно представить состоящей из двух компонентов кругового движения вокруг оси, как результат воздействия стенок каналов и радиального движения обусловленного перепада энергии. Данный теплообменник функционирует в режиме

безнапорной воздуходувки, причем размер каналов, частота вращения и эффективность передачи тепла находится в прямой зависимости друг от друга. При этом считаем, что входной поток газа подходит к каналам без закрутки. Фактически в этом аппарате передачи мощности потоку и создание избыточного давления происходит аналогично центробежным воздуходувкам типа СИРОККО и к данной установке применима теория лопастных машин при этом углы входа ( $\beta_1$ ) и выхода ( $\beta_2$ ) равны  $90^\circ$ , что указывает на наличие более низких коэффициентов напора  $\psi$  и расхода  $\phi$ . По мнению В.И. Степанова [102]. Применение подобных конструкций понижает коэффициент полезного действия колес по сравнению с оптимальным примерно на пять единиц последнего знака. Следовательно, для нашей конструкции не критично. При этом коэффициент напора  $\psi$

$$\psi = \frac{C_{m_2}}{U} \quad (2.52)$$

$C_{m_2}$  – радиальная скорость на выходе из колеса отнесенная к выходному сечению с учетом загромождения сечения лопатками и без учета утечек, м/с;

$U$  – окружная скорость, об/мин [83].

$$C_{m_2} = \psi \cdot U \quad (2.53)$$

$$U_2 = \frac{\pi \cdot D_m \cdot n}{60}, \quad (2.54)$$

$U_2$  – окружная скорость на выходе из колеса, об/мин;

$$Q = (C_{m_2} b_2 \pi D_{cp}) 60; \quad (2.55)$$

$Q$  – объемный расход, м<sup>3</sup>/мин;

$$Q = (\psi \cdot U \cdot b_2 \cdot \pi \cdot D_{cp}) \cdot 60; \quad (2.56)$$

$b_2$  – ширина колеса на выходе, м;

$D_m$  – средний эффективный диаметр, м;

$D_{cp}$  – средний диаметр по диаметрам дисков колеса  $\frac{D_2 + D_1}{2}$ .

$$D_1 = K^3 \sqrt{\frac{Q}{\omega_0}}; \quad K = \begin{cases} 1,65 & n_s = 20 \div 50 \\ 1,75 & n_s = 40 \div 80 \end{cases}$$

$\omega_0$  – частота вращения, рад/с;

$n_s$  – коэффициент быстроходности.

$$D_2 = \begin{cases} D_1 \frac{60}{n_s} = 20 \div 55 \\ D_1 \frac{105}{n_s} = 40 \div 80 \end{cases}$$

$D_1$  – внутренний диаметр дисков колеса, м

$D_2$  – наружный диаметр дисков колеса, м.

При расчета теплообмена в каналах сотовой насадки за определяющий размер выбирается эквивалентный диаметр канала

$$D_{\text{ЭКВ}} = \frac{4 \cdot F}{P} \quad (2.57)$$

$F$  – площадь канала, м<sup>2</sup>;

$P$  – периметр канала, м.

Для условий ламинарного режима, когда критерий Рейнольдса равный меньше 2300.

$$Re = \frac{c_{m2} D_{\text{ЭКВ}}}{\nu} \quad (2.58)$$

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с.

Для газа В.Н. Лукин [58] рекомендует зависимость

$$\overline{Nu} = 0,13 Re^{0,33} Gr^{0,1} \varepsilon_l \quad (2.49)$$

$Gr$  – число Грасгофа  $Gr = \frac{\beta g \Theta d^3}{\nu^2}$  разность температур  $\Theta = t_w - \bar{t}_f$ , где  $\bar{t}_f$  – средняя температура газа. Множитель  $\left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0,25}$  отражает влияние направления теплового потока.

В стабилизированной области  $\left(\frac{l}{d} \geq 50\right)$  поправка  $\varepsilon_l = 1$

Для турбулентного режима движения число Нусельта  $Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8}$ . Эта справедлива для Рейнольдса равного  $10^4 \dots 2 \cdot 10^6$

После определения числа Нусельта определяем коэффициент теплоотдачи отдельно для горячего и холодного теплоносителей. [58]

$$\alpha = \frac{\overline{Nu} \lambda_f}{D_{\text{ЭКВ}}} \quad (2.60)$$

$\lambda_f$  – теплопроводность газа, Вт/м<sup>2</sup>·С<sup>0</sup>.

Теплоемкость матрицы определялась по справочным данным 0,6 кДж/кг·С<sup>0</sup>, для алюминия с<sup>п</sup>=0,6.

При известной массе насадки определяемый, как площадь поверхности теплообмена на толщину пластины определялись коэффициенты:

$$\frac{\alpha_2 A_2}{c_w M_w} = \beta_2^*; \quad \frac{\alpha_x A_x}{c_w M_w} = \beta_x^* \quad (2.61)$$

Далее определяем коэффициенты  $m_1$  и  $m_x$

$$\text{Где } m_2 = \frac{\alpha_2 A_2}{c_{p2} G_2 \tau_2}, \quad m_x = \frac{\alpha_x A_x}{c_{px} G_x \tau_x}$$

Определяем среднее температуры теплоносителя, как [58]

$$t_{1cp} = \frac{A_2 t_2' + (1 + A_x) t_1'}{1 + A_2 + A_x} \quad (2.62)$$

При охлаждении матрицы и нагрев теплоносителя.

средняя температура насадки  $t_{w1cp}$

$$t_{w2cp} = \frac{t_1' \left( A_x + \frac{\gamma}{\beta_x^* \tau_x} \right) + t_2' \left( 1 + A_2 - \frac{\gamma}{\beta_2^* \tau_2} \right)}{1 + A_2 + A_x} \quad (2.63)$$

А средняя температура теплоносителя  $t_{2cp}$

$$t_{2cp} = \frac{A_2 t_1' + (1 + A_2) t_2'}{1 + A_2 + A_x} \quad (2.64)$$

$$\text{Где } \gamma = \frac{(1 - e^{-\beta_2^* \tau_2})(1 - e^{-\beta_x^* \tau_x})}{1 - e^{-(\beta_2^* \tau_2 + \beta_x^* \tau_x)}}, \quad \varphi_2 = \frac{e^{-m_2 \tau_2}}{m_2 \tau_2}; \quad \varphi_x = \frac{e^{-m_x \tau_x}}{m_x \tau_x}; \quad A_2 = \frac{\gamma}{\beta_2^* \tau_2} \frac{1 - \varphi_2}{\varphi_2}; \quad A_x = \frac{\gamma}{\beta_x^* \tau_x} \frac{1 - \varphi_x}{\varphi_x} \quad (2.65)$$

Полученное (отданное) матрицей количество теплоты за период нагрева  $\tau_1$  (охлаждения  $\tau_x$ ) будет равно

$$Q' = c_w M_w (t_{1cp} - t_{2cp}) \frac{(1 - e^{-\beta_2^* \tau_2})(1 - e^{-\beta_x^* \tau_x})}{1 - e^{-(\beta_2^* \tau_2 + \beta_x^* \tau_x)}} \quad (2.66)$$

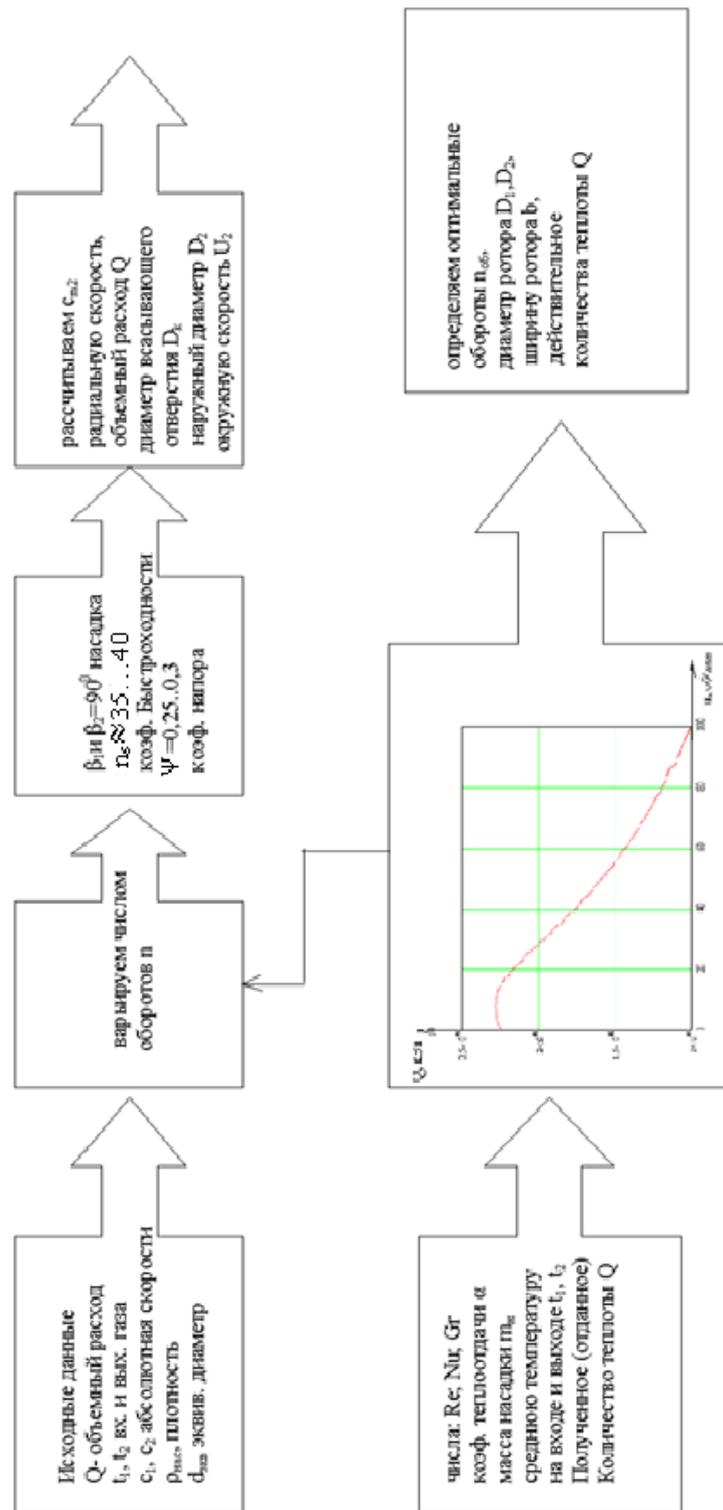


Рисунок 2.10 – Последовательность расчета вращающегося регенеративного воздухонагревателя

$$\begin{aligned}
 \text{Масса насадки} \quad M &:= 6.45 \\
 \beta_g(j) &:= \frac{\alpha_g \cdot A_g(j)}{c_p \cdot M} & \beta_x(j) &:= \frac{\alpha_x \cdot A_x(j)}{c_p \cdot M} \\
 \\
 \text{Теплоёмкость теплоносителя} \quad C_g &:= 1.05 \cdot 1000 & C_x &:= 1000 \\
 \\
 \text{Массовый расход газа} \quad G_g(i,j) &:= G(i) - G_x(i,j) & G_x(i,j) &:= \frac{G(i)}{j} \\
 \\
 \text{mg}(i,j) &:= \frac{\alpha_g \cdot A_g(j)}{C_g \cdot G_g(i,j) \cdot \tau_g(i,j)} & \text{mx}(i,j) &:= \frac{\alpha_x \cdot A_x(j)}{C_x \cdot G_x(i,j) \cdot \tau_x(i,j)} \\
 \\
 \psi_g(i,j) &:= \frac{1 - e^{-1 \cdot (\text{mg}(i,j) \cdot \tau_g(i,j))}}{\text{mg}(i,j) \cdot \tau_g(i,j)} & \psi_x(i,j) &:= \frac{1 - e^{-1 \cdot (\text{mx}(i,j) \cdot \tau_x(i,j))}}{\text{mx}(i,j) \cdot \tau_x(i,j)} \\
 \\
 \gamma(i,j) &:= \frac{\left[1 - e^{-1 \cdot (\beta_g(j) \cdot \tau_g(i,j))}\right] \cdot \left[1 - e^{-1 \cdot (\beta_x(j) \cdot \tau_x(i,j))}\right]}{1 - e^{-1 \cdot (\beta_g(j) \cdot \tau_g(i,j) + \beta_x(j) \cdot \tau_x(i,j))}} \\
 \\
 A1g(i,j) &:= \frac{\gamma(i,j)}{\beta_g(j) \cdot \tau_g(i,j)} \cdot \frac{(1 - \psi_g(i,j))}{\psi_g(i,j)} & A1x(i,j) &:= \frac{\gamma(i,j)}{\beta_x(j) \cdot \tau_x(i,j)} \cdot \frac{(1 - \psi_x(i,j))}{\psi_x(i,j)} \\
 \\
 t2_{cp}(i,j) &:= \frac{A1x(i,j) \cdot t11 + (1 + A1g(i,j)) \cdot t12}{(1 + A1g(i,j) + A1x(i,j))} & t1_{cp}(i,j) &:= \frac{A1g(i,j) \cdot t12 + (1 + A1x(i,j)) \cdot t11}{1 + A1g(i,j) + A1x(i,j)} \\
 \\
 Q(i,j) &:= c_p \cdot M \cdot (t1_{cp}(i,j) - t2_{cp}(i,j)) \cdot \frac{\left[1 - e^{-1 \cdot (\beta_g(j) \cdot \tau_g(i,j))}\right] \cdot \left[1 - e^{-1 \cdot (\beta_x(j) \cdot \tau_x(i,j))}\right]}{\left[1 - e^{-1 \cdot (\beta_g(j) \cdot \tau_g(i,j) + \beta_x(j) \cdot \tau_x(i,j))}\right]}
 \end{aligned}$$

Рисунок 2.11 Элемент блока расчёта параметров регенеративного воздухонагревателя в вычислительном пакете «MATCAD»

**Выводы по 2 главе**

- 1. Разработана одномерная математическая модель описывающая нестационарный теплообмен при комбинированной сушке капиллярно пористого тела с подводом тепла, как конвекцией, так и за счёт СВЧ энергоподвода. Модель использует понятие коэффициента диффузии и термодиффузионного коэффициента. Коррекция термодиффузионного коэффициента позволяет повысить точность решения за счет учета переноса массы под действием градиента температуры**
- 2. Автором получена обобщающая зависимость для определения термодиффузионного коэффициента. Получены зависимости термодиффузионных коэффициентов необходимые для оценки времени удаления влаги для: соснового опила, гречихи, подсолнечника и абрикосов.**
- 3. Создана методика расчёта интенсивности влагоудаления, предложены методы повышения энергоэффективности установок сушки с использованием воздухонагревателя. Разработана концепция сушилки с воздухонагревателем, которая позволяет осуществить осциллирующий режим сушки.**
- 4. Предложена новая конструкция вращающегося теплообменника утилизатора (получен патент) и методика расчёта базовых параметров установки. Разработанная конструкция вращающегося теплообменника утилизатора позволяет увеличить эффективность процесса за счёт объединения функций теплообменника и воздуходувки.**

## Глава 3 Методика проведения экспериментальных исследований

Для проведения экспериментальных исследований разработаны методики для:

1. Расчёта СВЧ-установки и встроенного в нее вращающего шнека
  - Определения электрофизических свойств абрикосов, ядер подсолнечника, древесного опила (сосна).
  - Оценки интенсивности влагоудаления и эффективности осциллирующего режима сушки.
  - Определения рабочих характеристик регенеративного вращающегося теплообменника утилизатора.
  - Обработки экспериментальных данных

### 3.1 Методика расчёта геометрических параметров СВЧ установки

Для обеспечения заданных параметров влагоудаления внутри СВЧ установки смонтировано транспортное устройство – шнек (рис 3.1, 3.2). Производительность конвейера ( $Q_n$ ) и интенсивность влагоудаления в установке должны строго соответствовать друг другу, что достигается регулированием процесса вращения шнека.

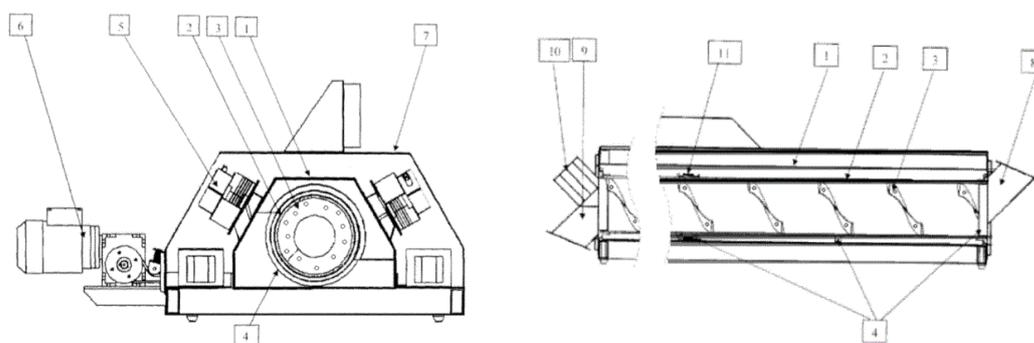


Рисунок 3.1 СВЧ-установка со шнеком

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 вращении 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 воздух.

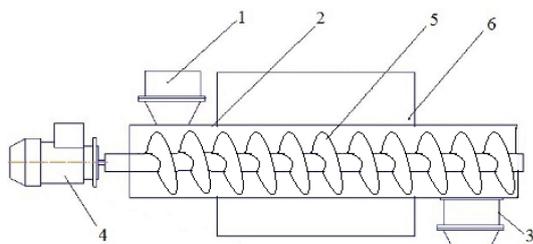


Рисунок 3.2 Схема и конструкция предложенного шнекового подающего устройства для установки СВЧ обработки сыпучих диэлектрических материалов: 1 – загрузочное устройство; 2 – камера; 3 – разгрузочное устройство; 4 – электропривод шнека; 5 – шнек из радиопрозрачного материала; 6 – рабочая камера СВЧ нагрева.

В установке используется 16 магнетронов, установленных в два ряда. Мощность каждого магнетрона 800 Вт. Длина камеры 1460 мм определялась технологическими возможностями изготовления при кратности половины длины волны (рис 3.3, 3.4).

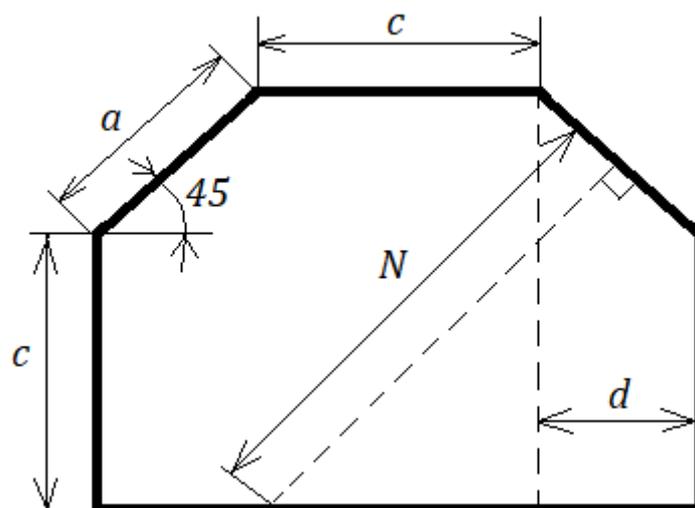


Рисунок 3.3- СВЧ-камера, вид спереди.

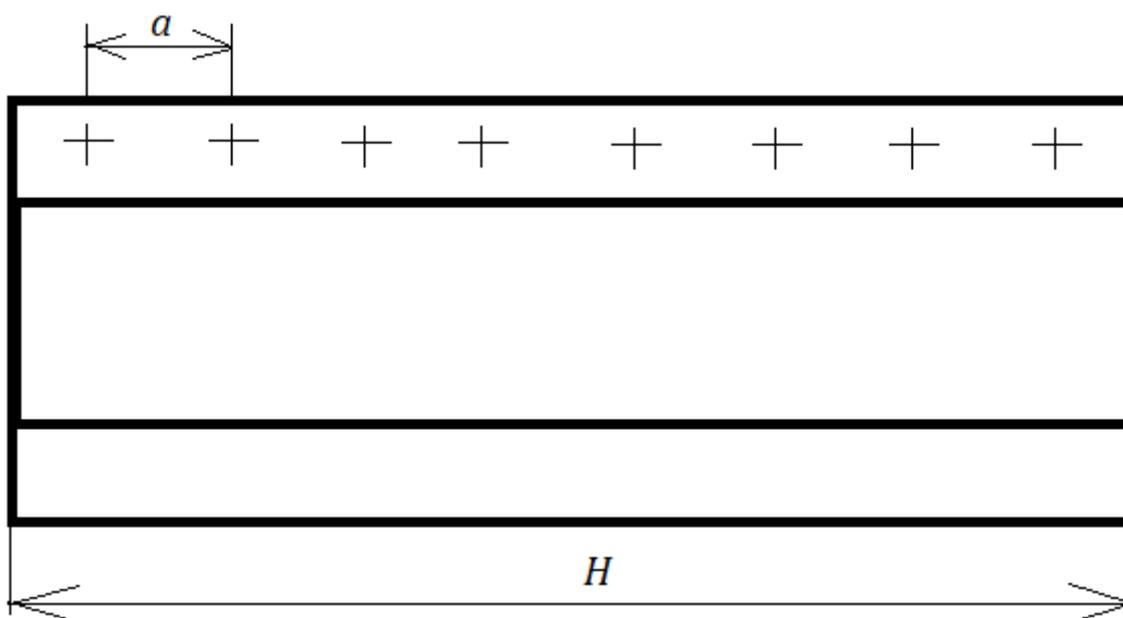


Рисунок 3.4 – СВЧ-камера с магнитронами (вид сверху).

Для определения зависимости производительности и оборотов использована формула:

$$Q_n = D \cdot E \cdot R \cdot \rho \frac{n \cdot \psi}{0,275} \quad (3.1)$$

Где  $D$  – диаметр трубы шнека;  $R$  – коэффициент уменьшение производительности для горизонтального конвейера,  $R=1$ ;  $\rho$  – насыпная плотность нагрузки;  $\rho$  кг/м<sup>3</sup>;  $n$  – частота вращения, 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  $E = \frac{H}{D}$ .

1. Так как, транспортировка сырья внутри камеры осуществляется с использованием шнека, то необходим расчёт высоты скребка. Для этого оцениваем глубину воздействия энергии электромагнитного излучения СВЧ диапазона экспериментальным путём и определяем экспериментально физико-механические и диэлектрические параметры сырья: диэлектрическую проницаемость сырья ( $\epsilon$ ) и тангенс угла диэлектрических потерь сырья ( $\text{tg}\delta$ ) на частоте работы магнетрона.

Высота скребка определялась как:

$$H_c < H_d \cdot (2+j)/3 \quad (3.2)$$

Где  $H_d = 22$  мм – оптимальная толщина слоя при конвекционной сушке [64];  $j = H_{cv}/H_d$ ,  $H_{cv}$  – глубина проникновения энергии электромагнитного излучения принятого СВЧ диапазона.

Расчёт для абрикос.

$$H_{cv} = \frac{9,55 \cdot 10^9}{\tan(\delta) \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon}} \quad (3.3)$$

$$H_c = H_d \frac{(2+j)}{3} = 0,022 \quad (3.4)$$

$\epsilon = 13$  – диэлектрическая проницаемость сырья, данные определялись экспериментально см. главу 4;  $\text{tg}\delta = 50,53$  – тангенс угла диэлектрических потерь сырья;  $f = 2465$  – частота, МГц.

2. Вычисляем собственную добротность резонаторной камеры.

Расчёт учитывает, что конструктивные геометрические параметры, согласованы с кратностью половины длины волны магнетрона. Расстояние от края волновода до противоположной стенки с.

$$c = \sqrt{\frac{z^2}{2}} = 0,451 \quad (3.5)$$

$$a = \frac{1,460}{8} = 0,183 \quad (3.6)$$

$$z = 0,122 \cdot 6 - \frac{a}{2} = 0,638 \quad (3.7)$$

$$d = \sqrt{\frac{a^2}{2}} = 0,129 \quad (3.8)$$

$$b = 2a + c = 0,816 \quad (3.9)$$

Площадь поперечного сечения камеры, м<sup>2</sup>:

$$S_t = b \cdot c + d \cdot c + a^2 = 0,46 \quad (3.10)$$

Объём камеры, м<sup>3</sup>:

$$V = S_t \cdot H \quad (3.11)$$

$$H = 1,4$$

$$V = 0,672 \text{ м}^3$$

Площадь поверхности камеры, м<sup>2</sup>:

$$S = b + 3 \cdot c + 2 \cdot a = 2,536 \quad (3.12)$$

$\Delta$  – толщина поверхностного слоя. Толщина поверхностного слоя зависит от удельной проводимости материала резонатора, для биметалла медь и алюминий:

$$\Delta = \frac{66 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_m}{\sigma}}}{\sqrt{f}} = 1,681 \cdot 10^{-5} \quad (3.14)$$

$\sigma_m = 57,1$ – удельная проводимость меди, [м/Ом·мм<sup>2</sup>];

$\sigma = 35,7$ – удельная проводимость алюминия, [м/Ом·мм<sup>2</sup>].

$$f = 2465 \cdot 10^6$$

Добротность оцениваем по зависимости:

$$Q = \frac{2 \cdot V \cdot K}{S \cdot \Delta} = 2,65 \cdot 10^4 \quad (3.15)$$

Где  $K$  -геометрический множитель, учитывающий особенности конфигурации камеры.

$$K = 1 - \frac{1 + \frac{B}{2}}{2 \cdot \pi \left(1 - \frac{B}{4}\right)} = 0,8$$

$$B = N^2 \cdot \pi^2 \cdot k^4 \cdot (2,5 + N) \frac{\lambda^4}{16} \quad (3.16)$$

$N$ -число отверстий;  $k$ -кратность размеров, равной половине длины волны;  $\lambda$ - длина волны;  $V$ - объем, занятый электрическим полем;  $S$ - объем проводника.

Для получения равномерности нагрева применены генераторы, работающие при изменении во времени генерируемой длины волны в некоторых возможных пределах  $\pm\lambda$ . Чем ближе по шкале длин волн расположены виды колебаний рассматриваемого многомодового резонатора, тем меньшее изменение длины волны генератора оказывается достаточным для улучшения равномерности нагрева и получения равномерного электромагнитного поля в нем даже при слабой загрузке резонатора обрабатываемым диэлектриком.

Зона расположения середины высоты скребка на нижней части шнека должна находиться, для максимума напряжённости электрического поля в соответствии с методикой Баскакова С.И. [21] на оси камеры на высоте от основания:

$$\sqrt{2 \cdot Z^2} - \left(\frac{2 \cdot a + c}{2} + c\right) = 0,043 \quad (3.17)$$

Наибольшую напряженность электрического поля, находящуюся на оси резонатора оценим при передаваемой мощности 1600 Вт:

$$E = \sqrt{\frac{P \cdot q^2}{0,778 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot h}} = 3,891 \quad (3.18)$$

$E$  – напряженность электрического поля, [кВ/см;]

$P$ –мощность диэлектрического нагрева [Вт];

$$q = \frac{V_{01}}{(h_k)} = 0,04$$

$$h_k = Z - \left(\sqrt{2 \cdot Z^2} - \left(\frac{2 \cdot a + c}{2} + c\right)\right) = 0,043 \text{ м}$$

$V_{01}$  –  $n$ -й корень функций Бесселя  $J_m(x)$

$$h = \sqrt{\left(2\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 - q^2} = 0,515 \quad (3.19)$$

$$\omega = 2\pi f;$$

$\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума (Ф/м);

$\lambda$  – длина волны;

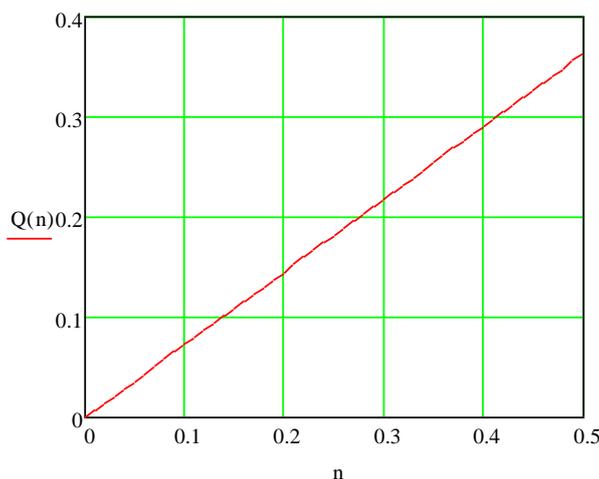


Рисунок 3.5. Зависимость производительности от оборотов при насыпной плотности  $400 \text{ кг/м}^3$

### 3.2 Определение электрофизических свойств абрикосов, ядер подсолнечника, опила соснового

Абрикосы, ядра подсолнечника, мокрый опил, с точки зрения электротехники, относят к группе полупроводников, как рассматриваемые тела, содержащего влагу, обладают проводимостью порядка  $10^{-4} - 10^{-6} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ . Наиболее высокое содержание влаги из рассматриваемых тел, наблюдается в абрикосах (76 - 90%). указывает на то, что это слабый диэлектрик. Известно, что основную роль в трансформации СВЧ - энергии в теплоту играет дипольная поляризация молекул воды. Помещенные в СВЧ поле исследуемые материалы нагреваются за счет мощности удельных потерь, определяемых значениями относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$ . Именно эти параметры абрикоса, ядер подсолнечника, опила, оказывают влияние на мощность и скорость нагрева. Поэтому разработка технологического режима сушки плодов абрикоса, ядер

подсолнечника, опила, возможна при наличии информации о зависимости их электрических свойств от температуры и влажности.

### 3.2.1 Структура объектов влагоудаления

Нами рассматривался сорт абрикосов «Кировский» Размеры плодов этого сорта составляют: высота - 35 мм, средний диаметр - 33 мм. Средняя масса одного плода  $20 \pm 2,5$  г.

В связи с этим нами была исследована зависимость коэффициента диэлектрических потерь от различных факторов. Рассматривая структуру плодов абрикоса, необходимо выделить составляющие. Мякоть, в центре мякоти косточка мякоть окружена твердой кожурой. Размер и масса плода, наличие косточек и кожицы, а также свойства всех компонентов являются технологическими свойствами сырья.

Таблица 3.1 - Состав плодов абрикос

Характеристика	Абсолютное содержание, г	Относительное содержание, %
Масса плода	$20 \pm 2,5$	100
Масса мякоти	$16,70 \pm 2,5$	82,45
Масса косточки	$2,42 \pm 2,5$	12,1
Масса ядра	$0,87 \pm 2,5$	4,35
Масса кожицы	$0,22 \pm 2,5$	1,1

Важнейшим параметром плода, на начальном этапе сушки является удельный объём, он характеризует массу мякоти, приходящуюся на единицу поверхности, или количество влаги, содержащейся в мякоти плода, приходящейся на единицу поверхности испарения. С достаточной достоверностью первоначальный объём плода можно рассчитать по формуле шара. При разрезании плодов на половинки и удалении косточки, 1,5 раза уменьшается величина удельного объёма, а поверхность испарения значительно увеличивается, путь перемещения влаги уменьшается.

Структура семени – плодовая, семенная оболочка и ядро. От массы сухого семени ядро составляет 70%, 25%- плодовая оболочка, 5%- семенная оболочка.

С точки зрения оценки интенсивности сушки важна способность тела отдавать и поглощать пары воды именуемая гигроскопичностью. Гигроскопичность зависит от парциального давления паров воды.

Для масленичных культур начальная влажность принимается равной 20-21,8%. В процессе сушки влажность уменьшается и достигает 8,6%.

Под равновесной влажностью мы понимаем влажность тела или его части при фиксированной влажности среды и температуре. Необходимо помнить, что равновесная влажность различных тканей подсолнечника разная. Так равновесная влажность лузги составляет 16%, равновесная влажность ядра составляет 8%, при средней равновесной влажности семени составляющем 10%. Исходя из требований обеспечения качества продукции ограничивается и максимальная температура нагрева семян величиной 65–70°C.

3.2.2 Метод оценки диэлектрических характеристик объектов в диапазоне СВЧ

Наиболее распространены следующие методы оценки диэлектрических свойств объектов в диапазоне СВЧ излучения, волноводные методы, резонансные методы, методы сравнения и метод свободных волн.

Таблица 3.2– Параметры магнетронов «Samsung»

Модель	Мощность (Вт)	I анода (А)	U анода (Кв)	I накала (А)	U накала (В)	Частота (МГц)	Охлажд.	Размеры (мм)
OM52S	600	0,2	3,8	11	3,5	2465	воздух	72.8X110X121
OM75S	900	0,3	4,1	11	3,3	2465	воздух	73.2X109X126
OM80S	900	0,3	4,1	11	3,3	2465	воздух	80X111X133
OM75P	1000	0,33	4,45	11	3,15	2465	воздух	80X127X133

Учитывая, что используемые сушильные установки могли использовать только с магнетронами фирмы «Samsung» (таблица 3.2 ) работающих на частоте

2465МГц, параметры среды оценивались для этой частоты. Применялась микроволновая печь «SamsungMS23K3513AS» с паспортной колебательной мощностью 900Вт.

Для оценки коэффициента диэлектрических потерь  $\varepsilon''$  применена методика сравнения разработанная в МИНХе им. Г.В. Плеханова.

Для определения коэффициента диэлектрических потерь  $\varepsilon''$  проводили оценку скорости нагрева исследуемого вещества при заданной подводимой мощности, фиксированной частоте установки и сравнивали со скоростью нагрева эталонной среды (дистиллированной воды) в тех же условиях.

Температура нагрева эталона и образца контролировалась при помощи на базе комплекса UM 358, в качестве датчиков температуры -хромель-копелевые термопары (содержание в термопаре Ni 42-44%, Mn 0,1-1%, измерение температуры до 600<sup>0</sup>С, точность определения температуры  $\pm 0.2$  °С). Геометрические размеры – диаметр тары и глубина засыпки определялись исходя из глубины проникновения СВЧ в продукты (таблица 3.3)

Таблица 3.3 – Глубина проникновения СВЧ в продукты (см)

Продукты	433 МГц	2450 МГц
Метиловый спирт	33.0	1.4
Вода	70.5	3.5
Мясо	5.1-10.7	1.6-3.1
Овощи	8.1-9.1	2.6-3.0
Рыба	5.0-6.2	1.2-2.0

Диаметр тары принимался равным 50 мм, глубина засыпки 25 мм

Масса, при первоначальной влажности высушиваемого материала, бралась равной 70 гр. Аналогичные размеры и массу имела и контрольная ёмкость с водой. Первоначальная температура исследуемых сред и эталона бралась равной 7°С. Изменение массы вещества контролировалось до и после нагрева на аналитических весах Wigan Модель WIG9010A точность определения массы

$\pm 0.01$  грам. Все серии опытов повторялись 10 раз с расчётом статистических показателей.

Тепловыделение в объекте сушки находили по формуле:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (3.20)$$

Где:  $c$  – теплоемкость Дж/(кг·К);

$Q$  – количество теплоты Дж;

$\Delta T$  – разность температур;

$m$  – масса материала кг.

Удельная активная мощность рассеянная находилась по зависимости [102]:

$$P_{уд} = 0,556 \cdot 10^{-10} f \varepsilon' \tan \delta |\vec{E}|^2 = 0,556 \cdot 10^{-10} f \varepsilon'' |\vec{E}|^2 \quad (3.21)$$

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:

$$|\vec{E}|^2 = \frac{c_{\text{эталона}} \Delta T_{\text{эталона}}}{0,556 \cdot 10^{-10} f \varepsilon''_{\text{эталона}}} \quad (3.21)$$

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

Определяем значения коэффициента диэлектрических потерь исследуемых веществ по скорости нагрева  $dT/dt$  эталона и сопоставлению с ней скорости нагрева образца, при заданной частоте и напряжённости поля. Эталон и образец одинаковых масс нагревался в течении 10 секунд при колебательной мощности 900 Вт, после чего замерялась температура и контролировалось изменение массы. 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.

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

Зависимость коэффициента диэлектрических потерь  $\epsilon''$  плодов абрикоса от влажности  $W_c$  с учётом температуры найдена при частоте электромагнитного поля  $f = 2465$  МГц. Полученная зависимость представлена на рис. 3.6

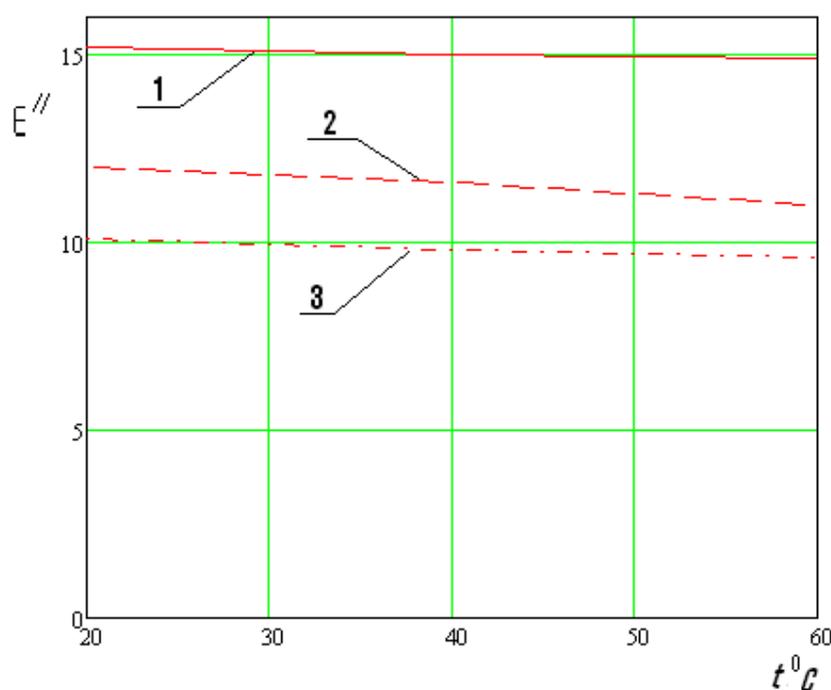


Рисунок 3.6 – Зависимость коэффициента диэлектрических потерь  $\epsilon''$  абрикосов от влажности  $W_c$ . 1- влажность 72%; 2- влажность 50.2%; 3- влажность 20%.

При снижении влажности ниже 20% наблюдалось наличие локального обугливания плодов, причём при реализации непрерывного СВЧ нагрева 70 гр. плодов абрикоса в течении 5 минут 30 секунд при подводимой мощности 900 Вт наблюдалось поверхностное обугливание сушимых плодов, характер изменения относительной массы представлен на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Характер изменения относительной массы от времени сушки абрикосов: 1) Режим непрерывного нагрева до начала обугливания поверхности; 2) Осциллирующий режим, время нагрева 10 секунд, охлаждение обдувом 30 секунд.

Экспериментально установлено, что минимальный расход электроэнергии и наименьшая конечная влажность материала соответствует осциллирующему режиму с чередованием 30 секунд нагрева, 30 секунд охлаждения обдувом. График изменения массы при этом режиме приведён на рисунке 3.8.

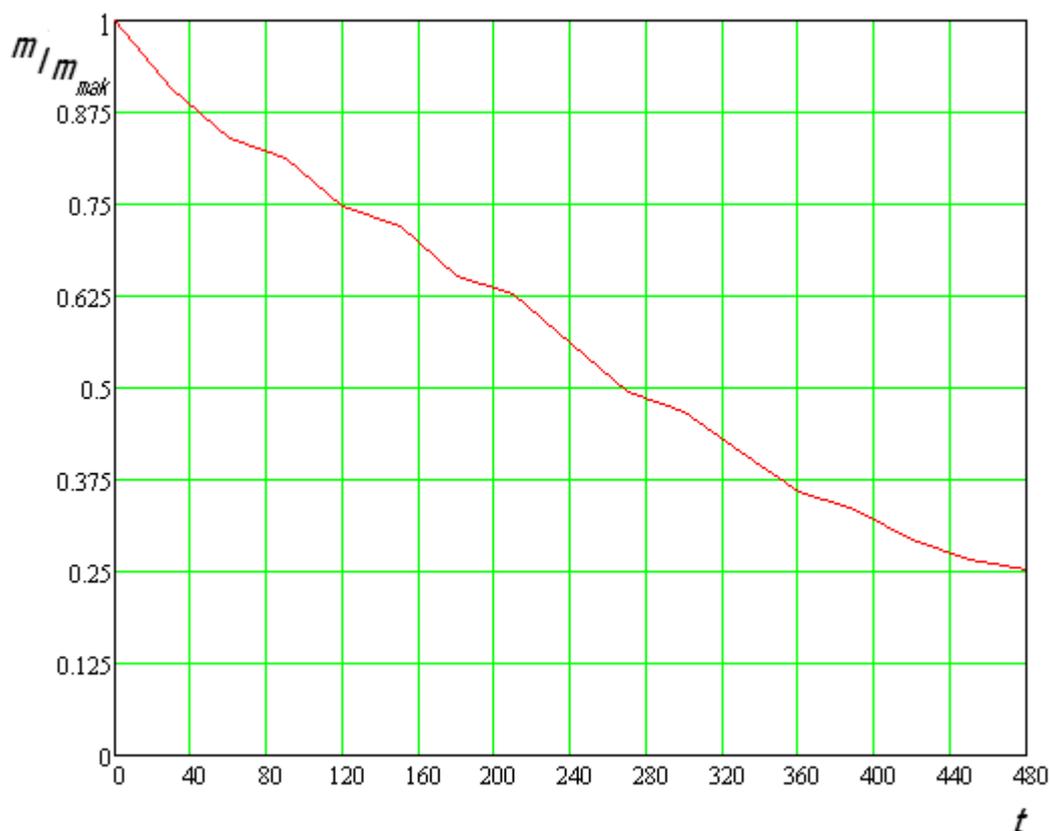


Рисунок 3.8 – График изменения относительной массы от времени сушки абрикосов, соответствует осциллирующему режиму с чередованием 30 секунд нагрева, 30 секунд охлаждения обдувом.

Увеличение длительности периода нагрева свыше 30 секунд приводило к падению скорости влагоудаления и слипания плодов в единую, трудноразделимую массу. Состояние плодов при сушке в этом режиме приведено на рисунке 3.9 .

Исследование коэффициента диэлектрических потерь ядер семян подсолнечника осуществлялось при изменении влажности, в интервале 8,6...22%. Проводилась предварительная подготовка, увлажнение до определённой влажности, термостатирование при температурах 20 , 40 и 60 °С (см. рисунок 3.10)



а)



б)



в)



г)



д)

Рисунок 3.10 – Характер изменения внешнего вида плодов абрикосов:

а) перед началом влагоудаления; б) при влажности 50% ;в) при влажности 25% ; г) при влажности 12%; д) условия проведения процесса влагоудаления.



Рисунок 3.11 – Условия проведения процесса влагоудаления.

При проведении эксперимента анализировалось влияние температуры на изменение коэффициента диэлектрических потерь  $\epsilon''$  ядер семян подсолнечника от влажности  $W_c$  для фиксированной частоты электромагнитного поля. Полученная зависимость представлена на рис. 3.12.

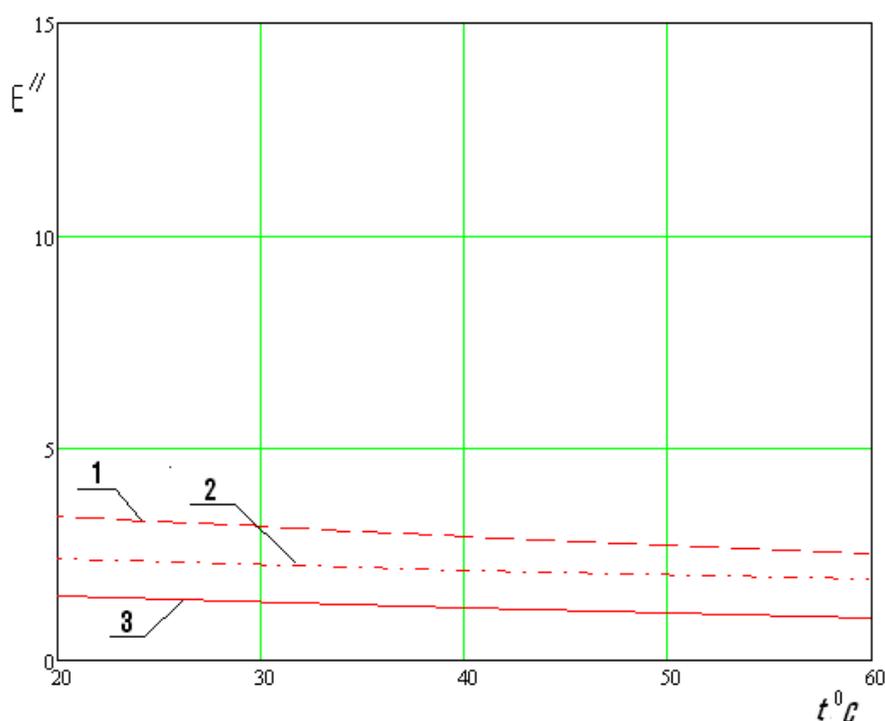


Рисунок 3.12 – Зависимость коэффициента диэлектрических потерь  $\epsilon''$  ядер семян подсолнечника от влажности  $W_c$ . 1- влажность 22%; 2- влажность 14.2%; 3- влажность 8.6%.

На основании графической зависимости, представленной на рис. 3.12, значение  $\epsilon''$  в значительной степени зависит от влажности. При значениях

влажности, ниже 9% для ядер подсолнечника использование СВЧ метода нагрева для влагоудаления становится не эффективным.

Исследование коэффициента диэлектрических потерь опила (сосна) проводилось для диапазона изменения влажности от 10% до 60%. Проводилась предварительная подготовка, увлажнение до определённой влажности, термостатирование при температурах 20 , 40 и 60 °С (см. рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 – Условия проведения процесса влагоудаления.

При проведении эксперимента анализировалось влияние температуры на изменение коэффициента диэлектрических потерь  $\epsilon''$  опила от влажности  $W_c$  для фиксированной частоты электромагнитного поля. Полученная зависимость представлена на рис. 3.14.

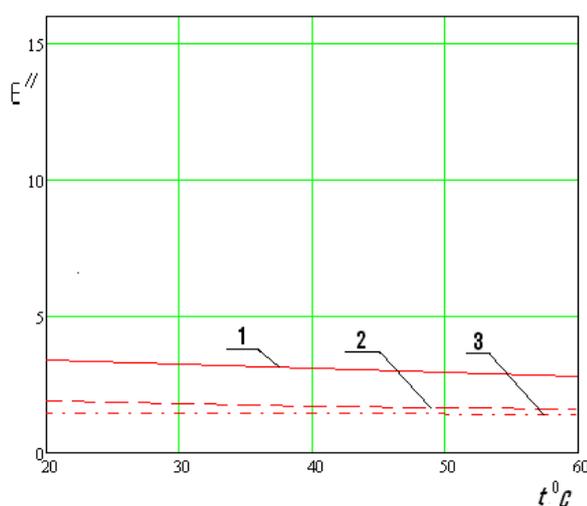


Рисунок 3.14 – Зависимость коэффициента диэлектрических потерь  $\epsilon''$  опила от влажности  $W_c$ . 1- влажность 60%; 2- влажность 15.6%; 3- влажность 10%.

На основании экспериментов (рис. 3.14) установлено, что значение  $\varepsilon''$  в значительной степени зависит от влажности. При значениях влажности ниже 15,6% для опила, использование СВЧ метода нагрева с целью влагоудаления становится не эффективным.

### 3.3 Методика оценки интенсивности процесса влагоудаления

Для проверки адекватности математической модели влагоудаления была создана экспериментальная установка, позволяющая организовывать как режим с постоянным подводом тепла, так пульсационный режим сушки древесных отходов. Установка была создана на базе сушильной установки «ИС УРАЛ – 4» (рис 3.15) для контроля температуры использованы хромель копелевые термопары, скорость циркуляции газа регулировалась изменением частоты вращения рабочего колеса вентилятора. Подвод тепла регулировался как изменением нагрузки на нагревательные элементы, так и шиберным перекрытием канала подачи газа. Изменение влажности фиксировалось по изменению массы установки. По формуле рассчитывали количество воды, для получения требуемой влажности:

$$M_{\text{в}} = \frac{m(W_{\text{треб}} - W_{\text{нач}})}{100 - W_{\text{треб}}}; \quad (3.22)$$

где:  $m_{\text{в}}$  - масса воды, г;

$m$  - масса сырья, г;

$W_{\text{треб}}$  - требуемая влажность сырья, %;

$W_{\text{нач}}$  - начальная влажность сырья, %.

Кроме того контрольные проверки влажности осуществлялись прибором ВИМС-2.23, контроль теплопроводности прибором МИТ-1.

Измерительный прибор МИТ -1 необходим для определения теплопроводности сыпучих и твердых материалов, используется вместе с ВИМС-2.23.

Влагомер – это устройство для измерения влажности в газе, жидкости и твердых материалах (так же в сыпучих).

Таблица 3.4 – ВлагомерВИМС-2.23 имеет следующие характеристики

Назначение влагомера	Контроль влажности строительных материалов, в том числе в изделиях, конструкциях, сооружениях, древесины и ее производных
Особенности влагомера	Три вида датчиков влагомера: <ul style="list-style-type: none"> <li>• контроля твердых материалов и древесины;</li> <li>• сыпучих материалов;</li> <li>• контроля сыпучих, пластичных и твердых материалов (в отверстиях)</li> </ul>
Возможности влагомера	Температурный диапазон от +5 до +140 °С, Допустимая влажность до 90% при 25 °С, рабочее давление 86...106 кПа.



Рисунок 3.15 – Установка для анализа интенсивности влагоудаления



Аналитические весы Wigan

Модель WIG9010A

точность определения

массы  $\pm 0.01$  грам

Система

автоматизированного

контроля параметров на базе

промышленной

измерительной станции

Panasoniccf-18 системы

контроля температуры с

функцией самописца wt71b,

многоканальной системы

контроля влажности

Цифровая

система

контроля

электрической

мощности

Рисунок 3.16 – Основные приборы использованные при проведении эксперимента:

Методика проведения экспериментов

Для обеспечения равномерной степени начального распределения влажности в исследуемом материале, исходное сырьё увлажняли, термостабилизировали в герметичной таре при температуре  $18^{\circ}\text{C}$  точность поддержания температуры составляла  $+1, -1^{\circ}\text{C}$  в течении 12 часов.

В установке сырьё располагалось равномерным слоем в контейнерах с сетчатым дном имевшем размеры ячеек  $2 \times 2$  мм (рис 3.17).

Контейнера устанавливались в установку и фиксировались параметры влажности, веса, времени и температуры.

Измерение влажности проводили двумя методами. Использовали Влагомер ВИМС-2.23 как для определения начальной и конечной влажности, так же изменения влажности в ходе эксперимента. Кроме того оценивали изменения влажности путём взвешивания контейнеров с материалом. Измерения

проводились многократно и сопровождалась программным расчётом погрешности. Задавалась мощность нагревателей и частота вращения вентилятора, контроль температуры слоя высушиваемой среды осуществлялся шестью термопарами, расположенными по высоте насыпного слоя. Регистрация данных производилась с использованием ЦАП и АЦП ЛА-50 (ЦАП и АЦП - это преобразователь аналогового в цифровой сигнал) и обрабатывалась в программном продукте National Instruments Lab VIEW 2010.

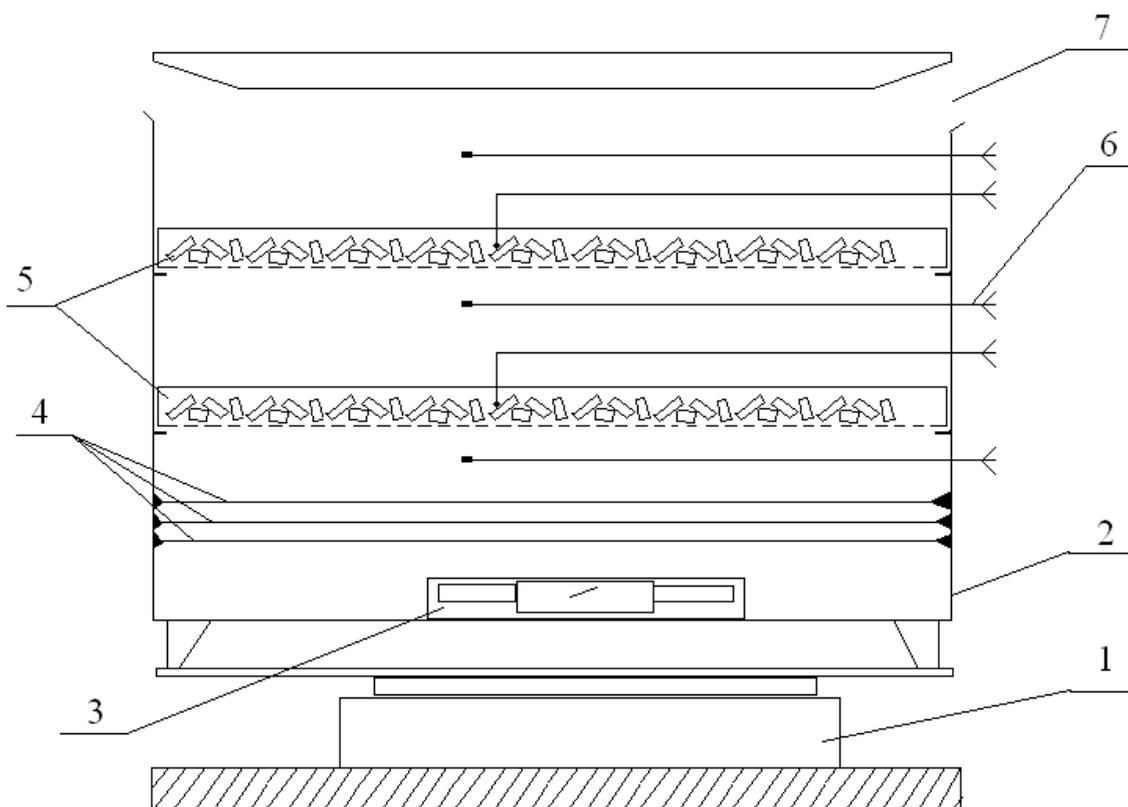


Рисунок 3.17 – Схема экспериментальной установки

- 1- Весы аналитические;
- 2- Сушильный модуль;
- 3- Вентилятор;
- 4- Малоинерционные проволочные нагреватели;
- 5- Кассеты с высушиваемой массой;
- 6- Система контроля температуры;
- 7- Зона отвода влажного газа.

Для проверки эффективности математической модели был осуществлён ряд контрольных экспериментов, в которых обеспечивалось не только определение средних температур по слою, но и изменение температур по сечению высушиваемого материала. Для реализации этого в качестве высушиваемого вещества использовались капиллярно-пористые тела как анизотропное тело с равной скоростью диффузии влаги, как в продольном, так и в поперечном направлении. По оси устанавливалась малоинерционная термопара, причём установка производилась как с выходом на поверхность, так и с установкой в центре цилиндрического элемента. Тем самым отслеживалось изменение температуры, как во внутренних слоях тела, так и на поверхности. В остальном методы проведения экспериментов не отличались от проведения экспериментов со щепой и соломой.

Режим осциллирующей сушки реализовывался путём периодического выдвигания контейнеров с высушиваемым материалом из зоны прохождения горячего теплоносителя. Контроль времени выдвигания осуществлялся по таймеру измерительной станции Panasonic SF-18. Для каждого значения периода нагрева эксперимент повторялся не менее 15 раз, что позволило по методике, изложенной в работах [112] с помощью распределения Стьюдента (число степеней свободы 13, критерий Стьюдента 1,503) при допустимой ошибке 5%. Адекватность полученных уравнений проверена по критерию F – Фишера (значения критерия не больше 2,12 при критическом значении 3,18) [140]. Кроме того, соответствие экспериментальных значений и значений, полученных в результате численного моделирования, проверялось на принадлежность к одной выборке по критерию Стьюдента. [140].

3.3 Методика определения рабочих характеристик ротора вращающегося теплообменника утилизатора

Основным параметром, для определения интенсивности передачи тепла является скорость теплоносителя в каналах насадки. Требованием к материалу насадки является высокая теплопроводность, при минимальной тепловой инерционности, кроме того необходима высокая удельная поверхность

теплообмена. Этим условиям удовлетворяет ячеистый сотовый наполнитель, выпускаемый серийно для нужд авиационной промышленности. В качестве теплоаккумулирующей насадки использован алюминиевый ячеистый наполнитель с эквивалентным диаметром 5 мм и длиной каналов 15 мм толщина стенки 0,02 мм. Ячеистый наполнитель смонтирован радиально на роторе наружным диаметром 300 мм внутренним диаметром 270 мм. Ширина зоны теплоаккумулирующей насадки 50 и 100 мм соответственно.

При проведении эксперимента определялись так же напорная характеристика установки. Определялась погрешность, оценивалась корреляция с теоретической зависимостью. Проводилось определение теплогидравлической характеристики аппарата при фиксированных размерах и теплоемкости ротора и меняемой частоте вращения ротора. Контролируемые параметры установки: расход горячего газа, расход нагреваемого воздуха, температуры газа и воздуха. Для проведения эксперимента была собрана экспериментальная установка (рисунок 3.18, 3.19).

Приводом установки являлся двигатель постоянного тока с регулируемой частотой вращения. Частота вращения ротора контролировалась тахометром «9 чп» (№ 016653, акт поверки 2016 год) производства Чистопольского часового завода, имеющего погрешность определения частоты вращения 1 об/мин. Все эксперименты проводились при атмосферном давлении 762-765 мм.рт.ст. и температуре 22<sup>0</sup>С. Скорость воздушного потока фиксировалась анемометром Testo 405-V1 с диапазоном программного определения расхода от 0 до 99,990 м<sup>3</sup>/ч по параметрам скорости и площади канала в температурном диапазоне от -20 до 150<sup>0</sup>С.



Точки расположения замеров скоростей располагались на диаметре, большем максимального диаметра ротора на 5 мм, а также в выходном сечении кожуха ограничителя

Замеры производились при изменении скорости вращения ротора от 1 до 5000 об/мин. Каждый замер повторялся не менее 10 раз. Результаты экспериментальных замеров представлены на рисунок 3.20.

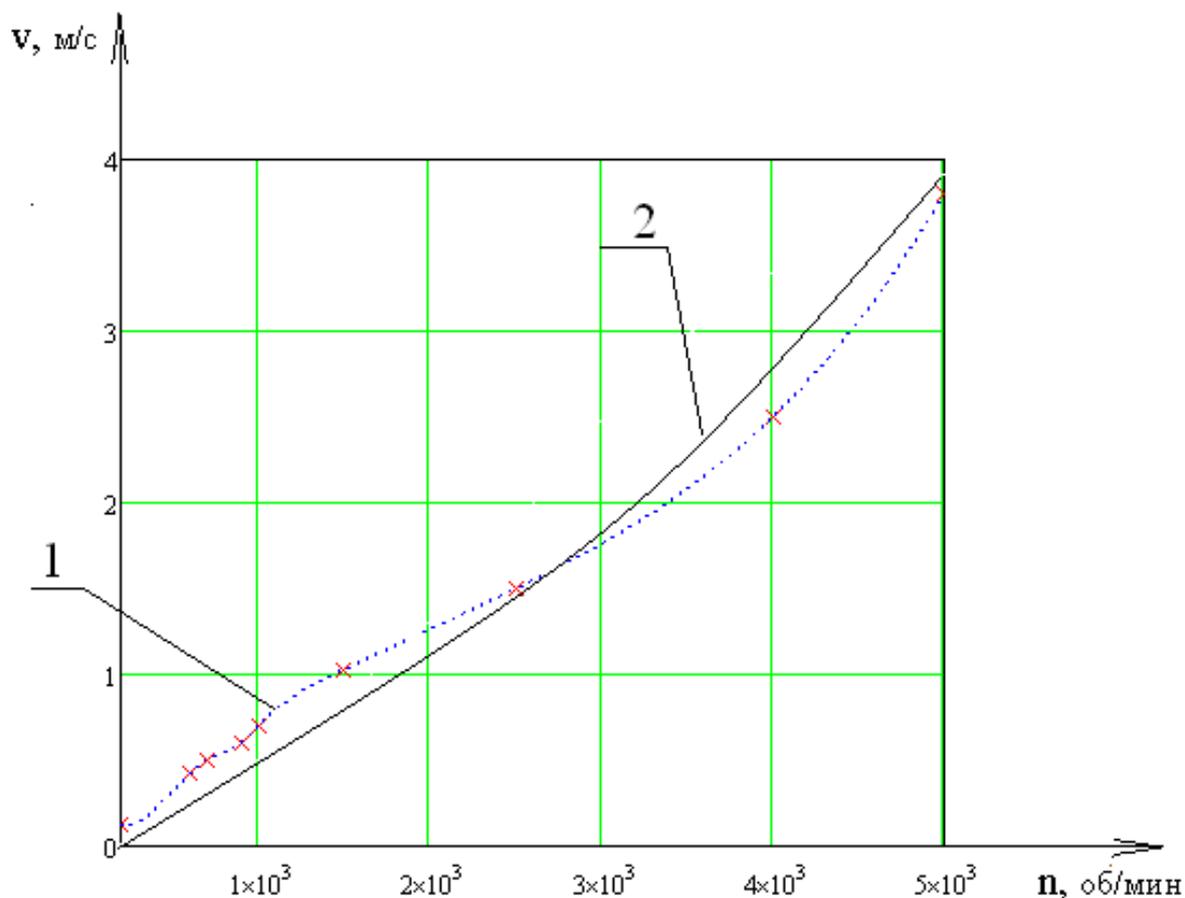


Рисунок 3.20 – Напорная характеристика ротора воздушнонагревателя 1- экспериментальные данные; 2- данные расчётов ротора по методике расчёта воздуходувок типа СИРОККО.

График построен по результатам экспериментальных данных, средние данные по выборкам представлены в виде таблицы. Максимальное в выборках значение среднеквадратичного отклонения скорости составило 0,07 м/мин.

Таблица 3.5 – Зависимость окружной скорости газа от оборотов ротора экспериментальной установки.

Скорость м/с	Обороты в минуту
0,12	200
0,42	600
0,50	700
0,60	900
0,70	1000
1,03	1500
1,50	2500
2,50	4000
3,80	5000

Анализ полученных зависимостей, показывает, что расчёт напорных характеристик ротора оснащённого ячеистой насадкой возможен с использованием методики расчёта воздуходувок радиальными лопастями. Ошибка при таком подходе не превосходит 12%, что вполне достаточно для инженерных расчётов, причём с ростом оборотов ошибка уменьшается.

При проведении эксперимента решалась задача оценки эффективности передачи тепла установкой. Для этой цели установка была модернизирована (рисунок 3.21, 3.22).

Установка была оборудована двумя осевыми подводами для горячего и холодного теплоносителя соответственно, радиальные отводы были оборудованы системой контроля температуры. В качестве рабочего тела использовался воздух. Воздух, подаваемый в качестве греющего теплоносителя, подогревался от внешнего источника тепла. В качестве источника тепла использовался промышленный фен «Интерскол ФЕ 2000», оснащённый системой контроля и регистрации мощности на базе комплекса UM 358, в качестве датчиков температуры -хромель-копелевые термопары (содержание в

термопаре Ni 42-44%, Mn 0,1-1%, измерение температуры до 600<sup>0</sup>С), промежуточная плата согласования НХ 711, 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 MHz, частота шины: 400 MHz, кэш 2-го уровня 2048 Kb), обработка данных производилась в программных комплексах National Instruments Lab VIEW 2010 и Mathcad (рисунок 3.23).

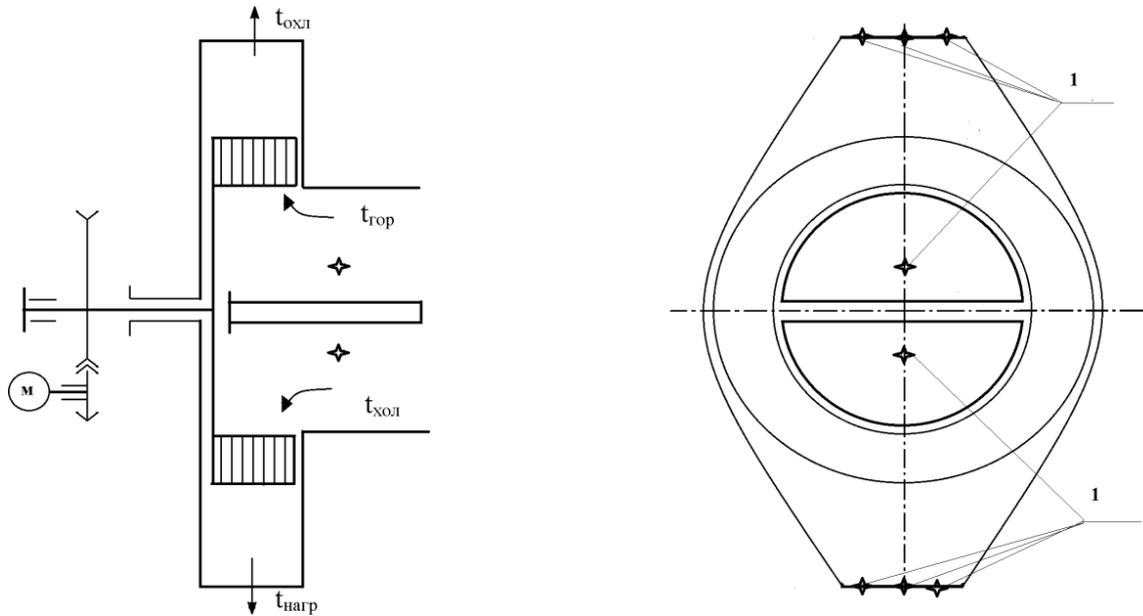


Рисунок 3.21 – Схема установки для оценки эффективности передачи тепла в регенеративном теплообменнике. 1- зоны установки термопар.

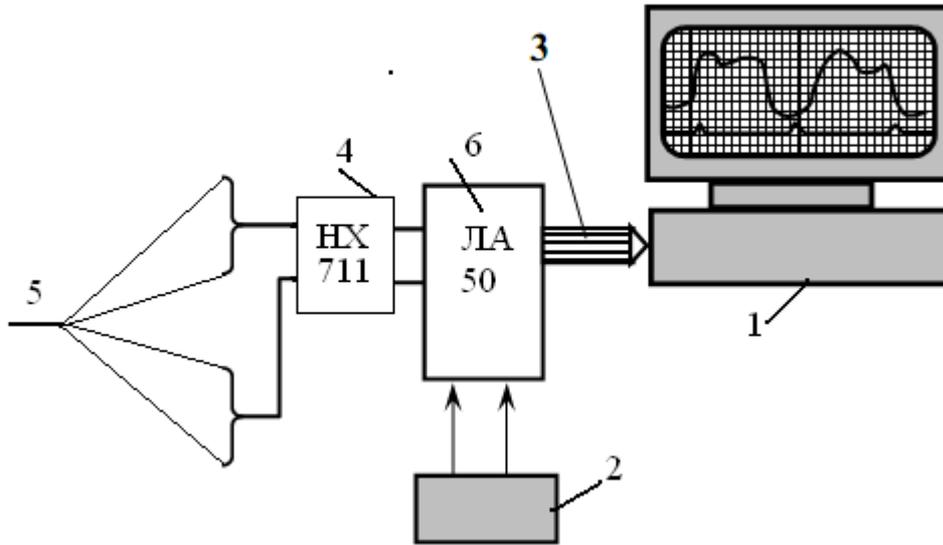


Рисунок 3.22 – Схема включения датчиков: 1- устройство регистрации данных, станция Panasonic CF-18; 2 - источник питания; 3 - шина данных; 4- промежуточная плата согласования НХ 711; 5- датчики; 6 - преобразователь ЦАП и АЦП-ЛА 50.

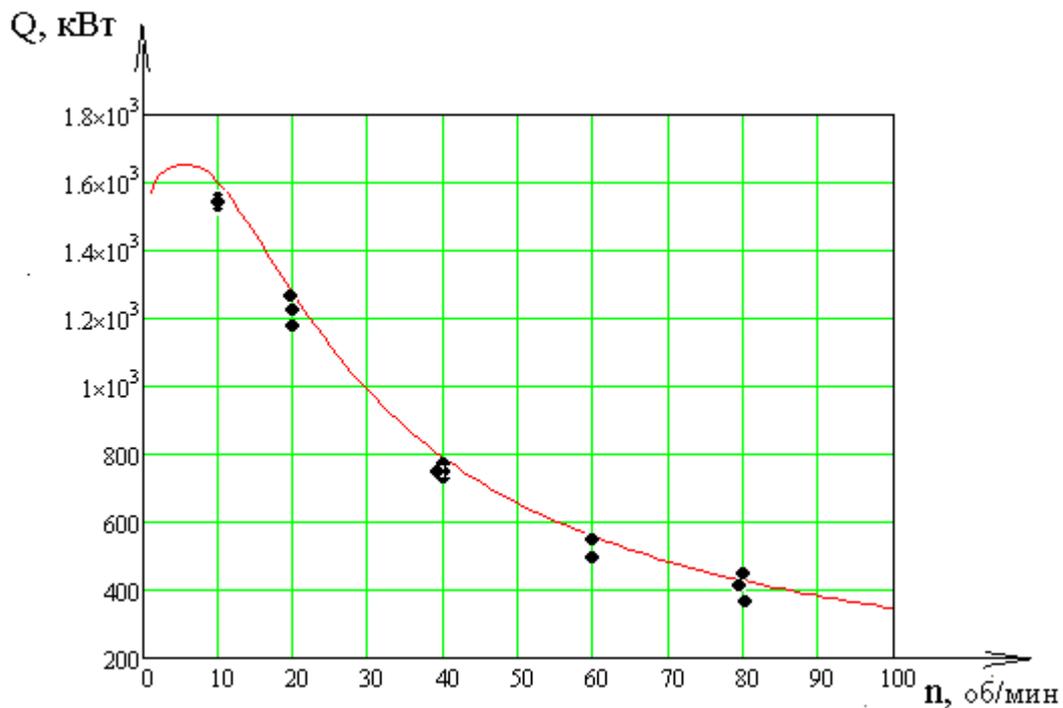


Рисунок 3.23 – Экспериментальные данные и расчетная кривая передаваемого теплового потока как функции оборотов ротора теплообменника

При постановке эксперимента поддерживалась температура на входе в теплообменник равная 180 °С, температура нагреваемого воздуха -20-21 °С. Соблюдалось условие равенства площадей нагрева и охлаждения насадки. Расход газа, как для греющего теплоносителя, так и для нагреваемого, оценивался по площади поперечного сечения канала и средней скорости в канале. Количество передаваемого тепла определялась со стороны греющего теплоносителя как:

$$Q = c_{\text{воз}} \nu \cdot S \cdot \rho_{\text{воз}} (t_{1\text{cp}} - t_{2\text{cp}}) \quad (3.23)$$

### 3.4 Методика обработки экспериментальных данных

При проведении обобщения экспериментальных данных, так и при обработке массивов данных других исследователей использовались стандартные методы проверки на нормальность распределения и проверки на принадлежность выборке по критерию Стьюдента.

Проверка на нормальность производилась с использованием «вероятностной бумаги по оценке отклонений термодиффузионного коэффициента не превышающих заданного. Линейный характер расположения на графике совокупность отсчётов свидетельствует о нормальном распределении выборки. По оси  $x$  наносятся отклонения термодиффузионного коэффициента.

Шкала по оси  $y$  содержит ряд одинаковых интервалов в возрастающем порядке: 61,2; 72,4; 80,2; 87,4; 92,1; 95,5; 97,6; и 98,8%. Вниз точки, соответствующей 50%, откладываются еще восемь одинаковых интервалом в убывающем порядке: 38,8; 27,6; 19,8; 13,6; 7,9; 4,5; 2,4 и 1,2% [118].

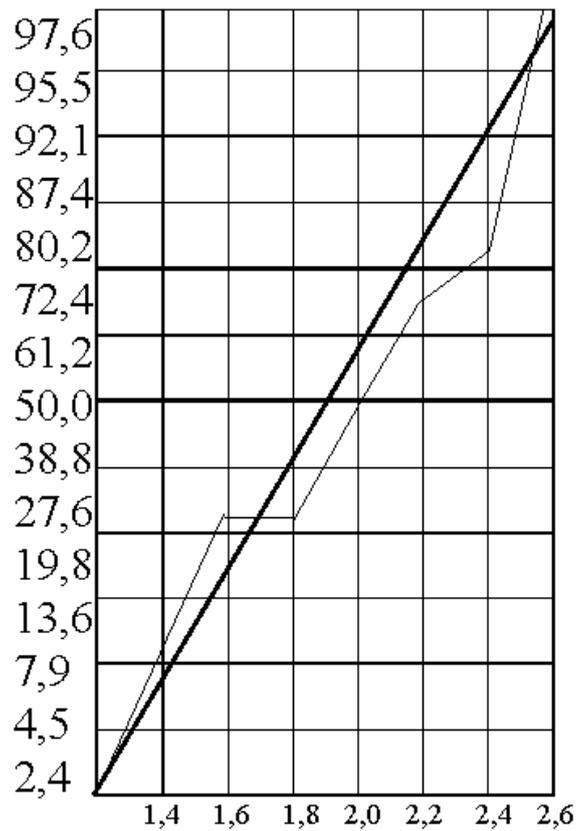


Рисунок 3.24 – Построение вероятностного графика

При наложении графических данных на прямую доказывается, что распределение выборки нормальное.

Таблица 3.5. – Сводные данные для вероятностной бумаги

Термодиффузионный коэффициент, %	Отклонение	Число отклонений, не превышающих данного	Процент отклонений, не превышающих данного
1,49	1,4	0	0
1,51	1,4	0	0
1,57	1,6	3	30
1,75	1,8	3	30
2,00	2,0	5	50
2,03	2,2	7	70
2,22	2,2	7	70
2,26	2,4	8	80
2,43	2,4	8	80
2,45	2,6	10	100

Таблица 3.6. – Сводные данные для вероятностной бумаги

Термодиффузионный коэффициент, %	Отклонение	Число отклонений, не превышающих данного	Процент отклонений, не превышающих данного
2,75	2,70	0	0
2,99	2,85	1	10
3,00	3,00	3	30
3,03	3,15	4	40
3,04	3,15	5	50
3,11	3,3	6	60
3,22	3,3	7	70
3,26	3,45	8	80
3,35	3,45	9	90
3,47	3,6	10	100

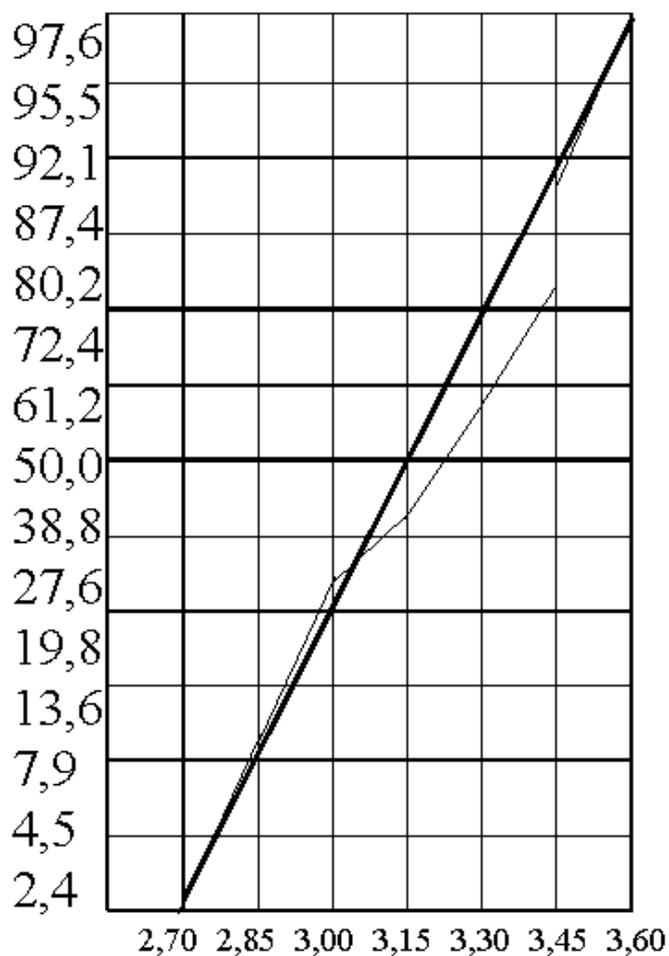


Рисунок 3.25 – Построение вероятностного графика для выборки

Таблица 3.7. – Сводные данные для вероятностной бумаги (см. приложения А)

Термодиффузионный коэффициент, %	Отклонение	Число отклонений, не превышающих данного	Процент отклонений, не превышающих данного
3,79	3,60	0	0
3,83	3,70	0	0
3,89	3,80	1	10
4,02	3,90	3	30
4,12	4,00	3	30
4,14	4,10	4	40
4,16	4,20	7	70
4,17	4,30	8	80
4,21	4,40	9	90
4,36	4,50	10	100

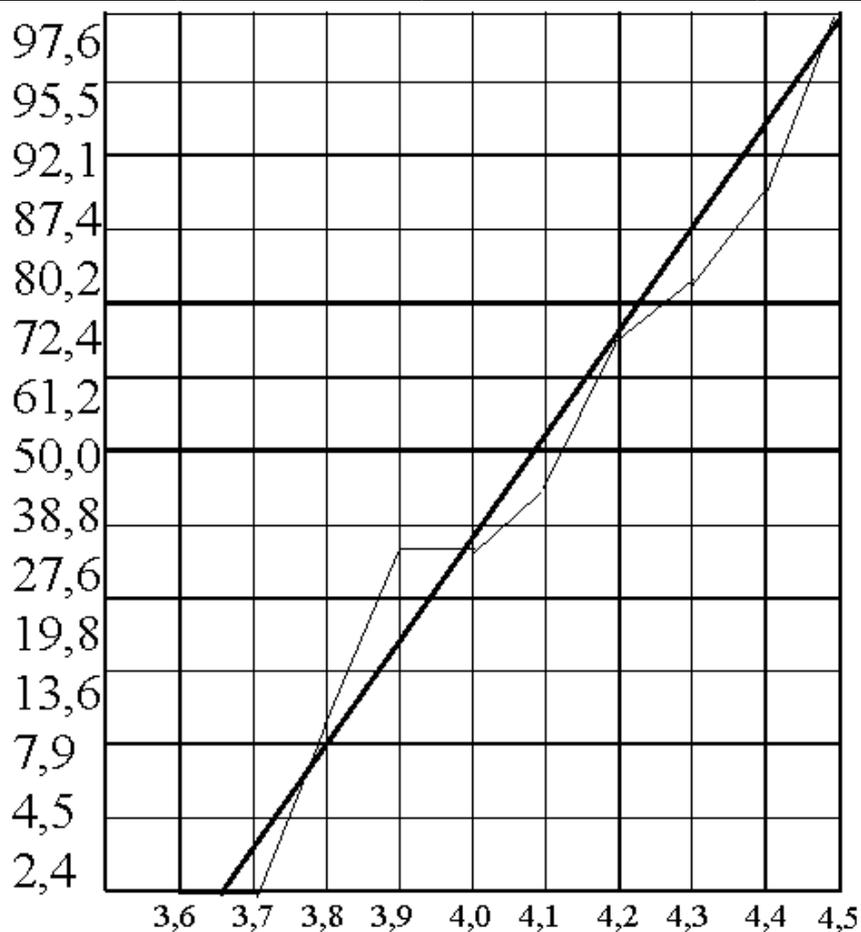


Рисунок 3.26 Построение вероятностного графика для выборки

Проверка на адекватность полученной регрессионной зависимости экспериментальных данных.

Таблица 3.7. – Сводные данные экспериментальных данных

Термодиффузионный коэффициент,	%	Температура,	°С	Влажностное содержание,	%
$X_1 :=$	1,75	$T :=$	40	$U :=$	26
$X_2 :=$	1,49	$T :=$	40	$U :=$	26
$X_3 :=$	2,00	$T :=$	40	$U :=$	26
$X_4 :=$	2,43	$T :=$	40	$U :=$	26
$X_5 :=$	2,22	$T :=$	40	$U :=$	26
$X_6 :=$	1,51	$T :=$	40	$U :=$	26
$X_7 :=$	1,57	$T :=$	40	$U :=$	26
$X_8 :=$	2,03	$T :=$	40	$U :=$	26
$X_9 :=$	2,45	$T :=$	40	$U :=$	26
$X_{10} :=$	2,26	$T :=$	40	$U :=$	26

Рассчитываем значение математического ожидания:

$$X_{cp} = \frac{(\sum_{i=1}^{10} x_i)}{10} \quad (3.24)$$

$$X_{cp} = 1,971$$

Рассчитываем значение дисперсии:

$$D_{cp} = \frac{[\sum_{i=1}^{10} (x_i - x_{cp})^2]}{10} \quad (3.25)$$

$$D_{cp} = 0,124$$

Рассчитываем среднее квадратичное отклонение:

$$\delta = \sqrt{D_{cp}}$$

$$\delta = 0,353$$

Для точности данной измерительной системы удобно выражать показателем точности. Этим показателем является вероятностное отклонение:

$$\eta = \frac{0,707}{\delta} \quad (3.26)$$

$$\eta = 2,005$$

Регрессионная зависимость термодиффузионного коэффициента от температуры и влажности.

$$\delta = 0,241 \cdot U - 0,048T - 1,412 \cdot 10^{-3}U \cdot T - 1,188 \cdot 10^{-3}U^2 + 5,086 \cdot 10^{-4}T^2$$

$|\delta - x_{cp}| \cdot \eta = 1,839$  - это величина отклонения, при которой проверяется функция лежит ли оно в доверительном интервале или нет.

$$k = |\delta - x_{cp}| \cdot \eta \quad (3.27)$$

$k$  – отклонение умноженное на точность эксперимента;

Точность эксперимента рассчитываем по формуле:

$$P = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_{-k}^k e^{-k^2} dk \quad (3.28)$$

$$P = 0,991 = 99,1\%$$

Таблица 3.8. – Сводные данные экспериментальных данных

Термодиффузионный коэффициент,	%	Температура, °C	Влажность ,	%
$X_1 :=$	2,75	$T :=$	40	$U :=$ 32
$X_2 :=$	2,99	$T :=$	40	$U :=$ 32
$X_3 :=$	3,00	$T :=$	40	$U :=$ 32
$X_4 :=$	3,47	$T :=$	40	$U :=$ 32
$X_5 :=$	3,22	$T :=$	40	$U :=$ 32
$X_6 :=$	3,11	$T :=$	40	$U :=$ 32
$X_7 :=$	3,04	$T :=$	40	$U :=$ 32
$X_8 :=$	3,03	$T :=$	40	$U :=$ 32
$X_9 :=$	3,35	$T :=$	40	$U :=$ 32
$X_{10} :=$	3,26	$T :=$	40	$U :=$ 32

Рассчитываем значение математического ожидания:

$$X_{cp} = \frac{(\sum_{i=1}^{10} x_i)}{10} \quad (3.29)$$

$$X_{cp} = 3,122$$

Рассчитываем значение дисперсии:

$$D_{cp} = \frac{[\sum_{i=1}^{10} (x_i - x_{cp})^2]}{10} \quad (3.30)$$

$$D_{cp} = 0,039$$

Рассчитываем среднее квадратичное отклонение:

$$\delta = \sqrt{D_{cp}} \quad (3.31)$$

$$\delta = 0,359$$

Для точности данной измерительной системы удобно выражать показателем точности. Этим показателем является вероятностное отклонение:

$$\eta = \frac{0,707}{\delta} \quad (3.32)$$

$$\eta = 2,245$$

Регрессионная зависимость термодиффузионного коэффициента от температуры и влажности.

$$\delta = 0,241 \cdot U - 0,048T - 1,412 \cdot 10^{-3} U \cdot T - 1,188 \cdot 10^{-3} U^2 + 5,086 \cdot 10^{-4} T^2 \quad (3.33)$$

$|\delta - x_{cp}| \cdot \eta = 1,651$  - это величина отклонения, при которой проверяется функция лежит ли оно в доверительном интервале или нет.

$$k = |\delta - x_{cp}| \cdot \eta \quad (3.34)$$

$k$  – отклонение умноженное на точность эксперимента;

Точность эксперимента рассчитываем по формуле:

$$P = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_{-k}^k e^{-k^2} dk \quad (3.35)$$

$$P = 0,980 = 98\%$$

Таблица 3.9. – Сводные данные экспериментальных данных

Термодиффузионный коэффициент,	%	Температура, °C	Влажность ,	%
$X_1 :=$	3,83	$T :=$	40	$U :=$ 41
$X_2 :=$	3,89	$T :=$	40	$U :=$ 41

$X_3 :=$	4,02	$T :=$	40	$U :=$	41
$X_4 :=$	4,17	$T :=$	40	$U :=$	41
$X_5 :=$	4,36	$T :=$	40	$U :=$	41
$X_6 :=$	4,21	$T :=$	40	$U :=$	41
$X_7 :=$	4,14	$T :=$	40	$U :=$	41
$X_8 :=$	4,12	$T :=$	40	$U :=$	41
$X_9 :=$	3,79	$T :=$	40	$U :=$	41
$X_{10} :=$	4,16	$T :=$	40	$U :=$	41

Рассчитываем значение математического ожидания:

$$X_{\text{cp}} = \frac{(\sum_{i=1}^{10} x_i)}{10} \quad (3.36)$$

$$X_{\text{cp}} = 4,069$$

Рассчитываем значение дисперсии:

$$D_{\text{cp}} = \frac{[\sum_{i=1}^{10} (x_i - x_{\text{cp}})^2]}{10} \quad (3.37)$$

$$D_{\text{cp}} = 0,03$$

Рассчитываем среднее квадратичное отклонение:

$$\delta = \sqrt{D_{\text{cp}}} \quad (3.38)$$

$$\delta = 0,173$$

Для точности данной измерительной системы удобно выражать показателем точности. Этим показателем является вероятностное отклонение:

$$\eta = \frac{0,707}{\delta} \quad (3.39)$$

$$\eta = 4,081$$

Регрессионная зависимость термодиффузионного коэффициента от температуры и влажности.

$$\delta = 0,241 \cdot U - 0,048T - 1,412 \cdot 10^{-3} U \cdot T -$$

$$-1,188 \cdot 10^{-3}U^2 + 5,086 \cdot 10^{-4}T^2 \quad (3.40)$$

$T$  – температура, при которой происходит исследование данного объекта, на данный момент времени, °С;

$U$  – влагосодержание, данного объекта, %

$|\delta - x_{cp}| \cdot \eta = 1,604$  - это величина отклонения, при которой проверяется функция лежит ли оно в доверительном интервале или нет.

$$k = |\delta - x_{cp}| \cdot \eta \quad (3.41)$$

$k$  – отклонение умноженное на точность эксперимента;

Точность эксперимента рассчитываем по формуле:

$$P = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_{-k}^k e^{-k^2} dk \quad (3.42)$$

$$P = 0,977 = 97,7\%$$

Произведен анализ попадания доверительного интервала, расчет показал, что наихудшее вероятность нахождения в доверительном интервале 97,7% наилучший вариант 99,1%. Выше приведены расчеты для наилучшего и наихудшего варианта.

Также была проведена проверка по критерию Стьюдента, которая показала, что при числе степеней свободы 13 получено значение критерия Стьюдента, равное 1,503, соответственно все приведенные выше выборки принадлежат одной совокупности. Следовательно, полученная регрессионная зависимость, является обобщением экспериментальных данных и адекватно описывает термодиффузионный коэффициент в исследуемом в диапазоне влажности и температуры.

## Выводы по 3 главе

1. Разработана методика расчёта геометрических параметров СВЧ установки и встроенного в нее вращающего шнека
2. Разработан метод оценки диэлектрических характеристик, а именно коэффициента диэлектрических потерь для абрикосов, ядра подсолнечника, мокрого опила в диапазоне температур от 7 до 80 °С
3. Получены значения электрофизических свойств абрикоса, ядер подсолнечника, опила. Определены зоны эффективного использования СВЧ нагрева для рассмотренных объектов сушки.
4. Создана экспериментальная установка и разработана методика натурального моделирования процесса влагоудаления на режимах с постоянной скоростью и на режимах осциллирующей сушки. Система позволяет контролировать интенсивность переноса влаги в интервале температур от 1 до 140 °С;
5. Создана экспериментальная установка с диаметром ротора 260 мм, шириной насадки 40 мм, позволившая снять рабочие характеристики вращающегося регенеративного теплообменника. Разработана методика оценки напорной характеристики ротора вращающегося регенеративного теплообменника для диапазона оборотов от 0 до 5000 об/мин. Разработана методика экспериментального определения теплофикационных характеристик регенеративного вращающегося теплообменника;
6. Автором создана система автоматизированного сбора и статистической обработки данных, позволяющая оценить интенсивность передачи влаги в капиллярно пористом теле.

## Глава 4 Результаты теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию конструктивных схем и режимных параметров сушильных установок СВЧ подводом тепла и воздухонагревателя

### 4.1 Результаты математического моделирования процесса влагоудаления с постоянным подводом теплоты

Используя математическую модель, подробно описанную в главе 2, с использованием полученной зависимости для термодиффузионного коэффициента, был поставлен численный эксперимент в вычислительном пакете «MATCAD» (рисунок 4.1). Реализовано численное решение системы дифференциальных уравнений, описывающих перенос влаги в объеме капиллярно пористого тела.

Для решения задач используется конечноразностное преобразование.

$\Delta x$  – шаг по координате;

$\Delta t$  – шаг по времени;

$n$  – номер шага по времени;

$j$  – номер шага по координате.

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{T_j^{n+1} - T_j^{n-1}}{2\Delta t} \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} &= \frac{T_{j+1}^n - T_j^{n+1} - T_j^{n-1} + T_{j-1}^n}{\Delta x^2} \\ \frac{\partial U}{\partial t} &= \frac{U_j^{n+1} U_j^{n-1}}{2\Delta t} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} &= \frac{U_{j+1}^n - U_j^{n+1} - U_j^{n-1} + U_{j-1}^n}{\Delta x^2} \\ D_j^n &= \frac{0,75 \cdot 10^5}{1 - 0,0032 \cdot \gamma_0 \cdot U_j^n} \left( \frac{T_j^n}{1000} \right)^{20} \\ \Delta x^2 U_j^{n+1} - \Delta x^2 U_j^{n-1} &= 2\Delta t D_j^n \rho (U_{j+1}^n - U_j^{n-1} - U_j^{n+1} + U_{j-1}^n) + \\ &+ D_j^n \rho \delta_j^n \Delta x^2 2\Delta t \frac{T_{j+1}^n - T_j^{n+1} - T_j^{n-1} + T_{j-1}^n}{\Delta x^2} \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$U_j^{n+1} = \left( 2\Delta t D_j^n \rho (U_{j+1}^n - U_j^{n-1} - U_j^{n+1} + U_{j-1}^n) + \Delta x^2 U_j^{n-1} + D_j^n \rho \delta_j^n 2\Delta t \frac{(T_{j+1}^n - T_j^{n+1} - T_j^{n-1} + T_{j-1}^n)}{(\Delta x^2 + 2\Delta t D_j^n \rho)} \right) \quad (4.2)$$

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

$$T_j^{n+1} = \left( \Delta x^2 t \cdot T_j^{n-1} + \alpha 2\Delta t \cdot T_{j+1}^n - \alpha 2\Delta t \cdot T_j^{n-1} + \alpha 2\Delta t \cdot T_{j-1}^n + \varepsilon \frac{r}{c} \cdot \Delta x^2 \frac{(U_j^{n+1} - U_j^{n-1})}{(\Delta x^2 + \alpha 2\Delta t)} \right) \quad (4.3)$$

Затем опять определяем  $U_j^{n+1}$  если, различия менее 5%, то переходим на следующую точку по координате, если нет то повторяем итерации после определения U и T по сечению тела на одном временном шаге переходим на следующий и так до достижения заданного интервала времени. В качестве граничных условий принимаем значение U и T на поверхности тела, как начальное принимаем значение температуры и влагосодержание исходного сырья. Применяемая при расчете схема является явной и безусловно устойчивой и сходящейся, это особенность явной разностной схемы Дюфорта-Франкеля[2].

Этот метод позволяет рассчитать значения температуры и влагосодержания по объему тела в любой момент времени. Математическую обработку по схеме приведённой выше в вычислительном пакете «MATCAD» (рисунок 4.1).

Given

$$T_t(x,t) = a \cdot T_{xx}(x,t) + \varepsilon \cdot \frac{r}{c} a^2 \cdot w_{xx}(x,t) + z(t) \cdot A \cdot e^{-k \cdot x}$$

$$w_t(x,t) = a^2 \cdot w_{xx}(x,t) + a^2 \cdot \delta \cdot T_{xx}(x,t)$$

with boundary conditions

$$w(x,0) = 0.5 \quad T(x,0) = 20 \quad L = 0.02$$

$$w(0,t) = 0.2 \quad w(L,t) = 0.2 \quad T_0 = 3200$$

$$\begin{pmatrix} T \\ w \end{pmatrix} := \text{Pdsolve} \left[ \begin{pmatrix} T \\ w \end{pmatrix}, x, \begin{pmatrix} 0 \\ L \end{pmatrix}, t, \begin{pmatrix} 0 \\ T_0 \end{pmatrix}, 400, 4000 \right]$$

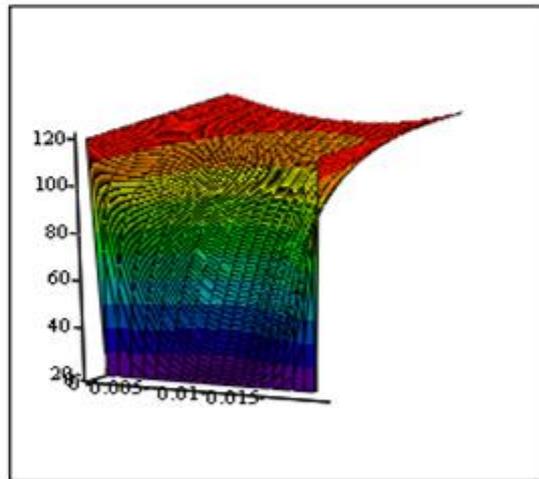


Рисунок 4.1 – Решение системы дифференциальных уравнений в вычислительном пакете «MATCAD». Решая систему дифференциальных уравнений, мы определяем  $U$  и  $T$  в любой момент времени сушки, время влагоудаления влаги.

В качестве высушиваемого материала для верификации модели использовалась древесина. Будучи капиллярно пористым телом, данный материал, по своим геометрическим параметрам позволял использовать термодары при проведении натуральных экспериментов. Рассчитывали поля температур полученные для процесса удаления влаги с элемента сосновой щепы, имеющего толщину 2 мм. Начальные условия: начальная температура  $20^{\circ}\text{C}$ , начальная влажность 50%. В качестве граничных условий использовалась температура сушильного агента  $120^{\circ}\text{C}$ . Расчёт производился до достижения конечной влажности 20% при максимальном времени сушки 2200 секунд. Натурный эксперимент проводился для тех же условий.

Режим с постоянным подводом тепла.

Результаты расчётов интенсивности изменения влагосодержания представлены рисунке 4.2. График 1 соответствует центру тела, а график 6 – внешней границе. Графики 2-5 рассчитаны для промежуточных зон с интервалом

0,2 мм. График влагосодержания 1 соответствующая к центру щепы, показывает рост влагосодержания в центре в течение первых 10 секунд, что обусловлено тепловой инерционностью и отражается с помощью коэффициента термодиффузии. Полученные, с использованием разработанной математической модели, кривые влагоудаления и динамики изменения влагосодержания по толщине во времени приведены на рисунках 4.9, 4.10.

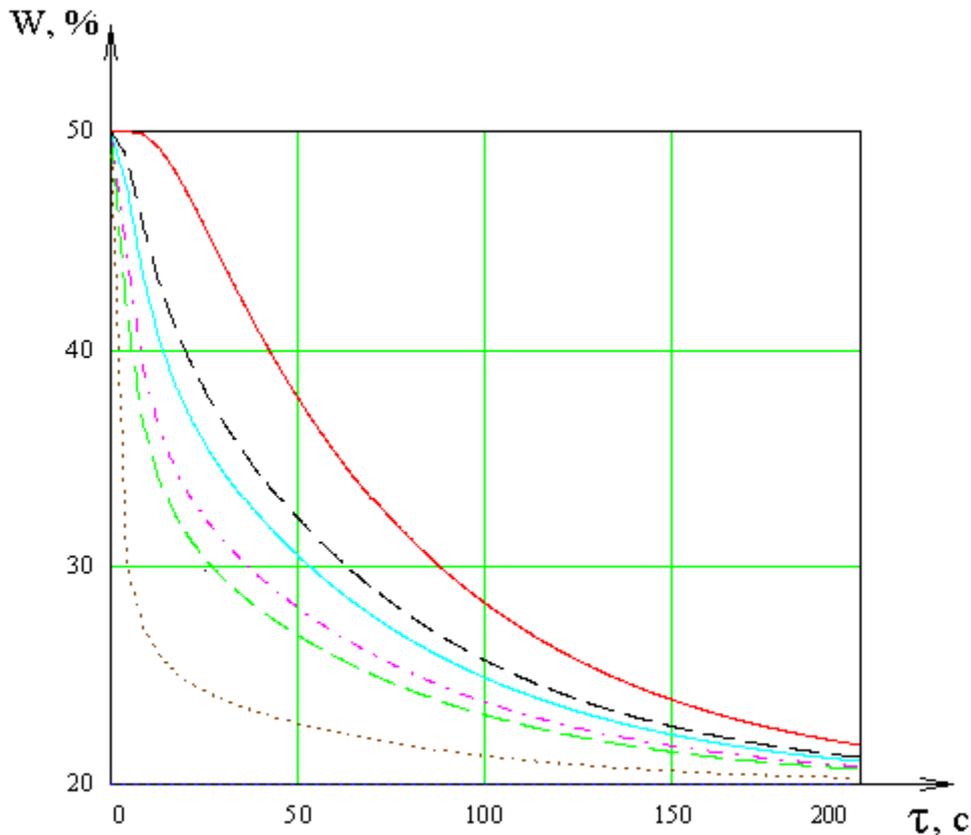


Рисунок 4.2 – Расчётные кривые влагоудаления для разных зон щепы

Анализируя эти зависимости, мы видим, что максимальное изменение влагоудаления происходит в течение первых 90 секунд, в этот момент влагосодержание в центре образца снижается с 50% до 29% и полностью достигает заданного значения по влагосодержанию через 200 секунд. На рисунке 4.9 приведены графики изменения влагосодержания в поперечном сечении высушиваемого элемента при двухстороннем отводе влаги. График 1 соответствует влагосодержанию, достигаемому после 180 секунд сушки, график 6 соответствует 20 секундам, интервал между графиками 20 сек. Полученные зависимости иллюстрируют симметричный характер изменения

влажностення относительно центрального сечения тела, что говорит о качественно верном характере проведения расчётов и устойчивости применённой модели. Более подробно зависимости графиков 4.3 и 4.4 приведены в приложении Б на рисунке 4.3 на котором представлена зависимость влажностення, как комбинированная функции времени и координаты щепы.

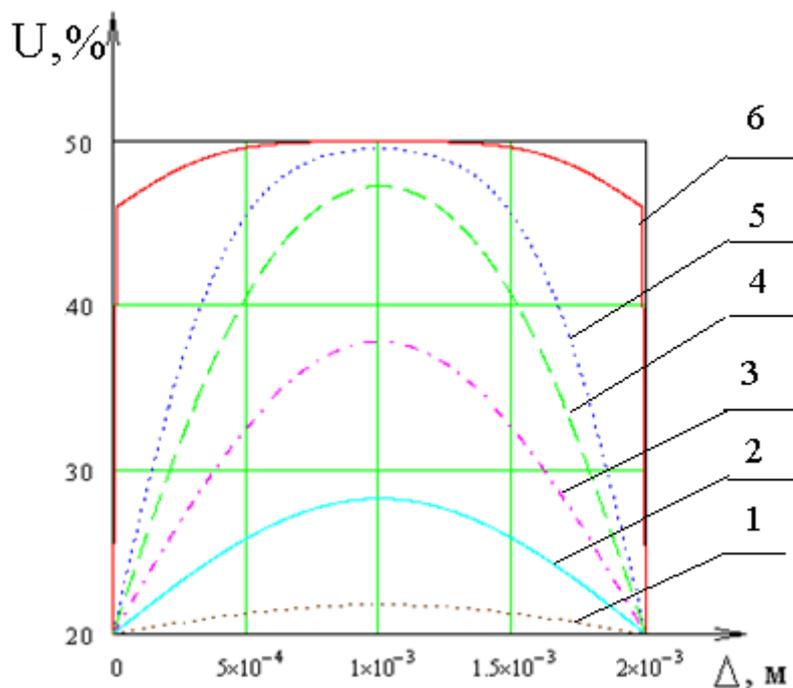


Рисунок 4.3 – Динамика изменения влажностення по толщине во времени для двухстороннего отвода влаги (от начального времени 6 с большим содержанием влаги, до конечного 1)

Полученная поле температур (рисунок 4.4) показывает нам, что наиболее интенсивно изменение температуры происходит в течение первых 30 секунд. Далее скорость изменения температур падает, температурное поле выравнивается линия перегиба соответствует времени 12 секунд, что отражает переход от режима сушки с постоянной скоростью к падающему режиму влагоудаления. На рисунке 4.5 показано симметричное поле распределение температур в исследуемом теле, через различные промежутки времени, что характеризует качественно верное описание существующего процесса применённой математической моделью. Характер изменения полностью

соответствуют, как натурному эксперименту (рис 4.5), так и данным работы [115] Шубина А.С. для симметричного подвода тепла, что косвенно подтверждает адекватность описания реального процесса моделью.

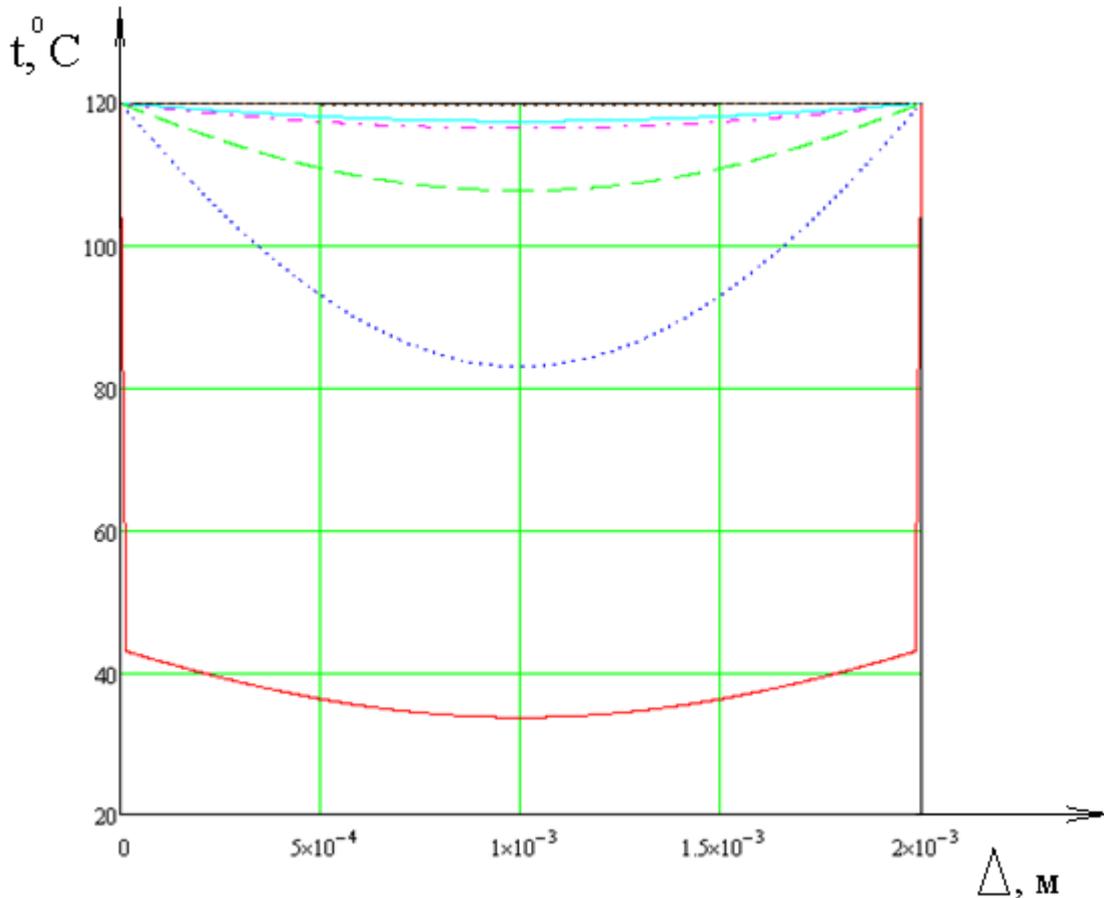
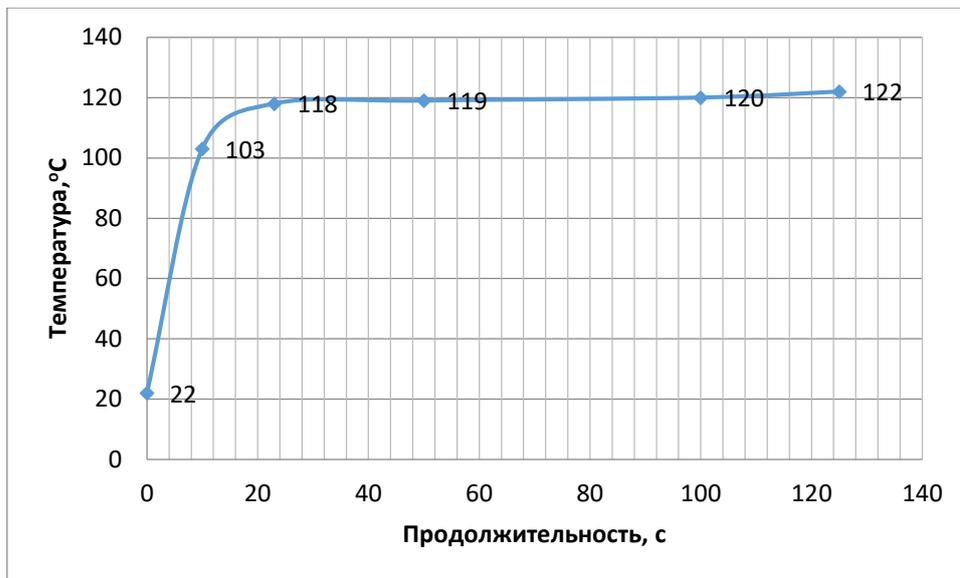


Рисунок 4.4 – Распределения температур по объему тела

Для проверки адекватности расчетов по предлагаемой модели для данных натурного эксперимента описанных в главе 3 был поставлен численный эксперимент и получено распределение температур во времени (смотри рисунок 4.5). На рисунке видно, что изменение температуры имеет явно выраженный перегиб для условий влагоудаления из щепы в течение первых 15-20 секунд. На рисунке 4.5. наложены расчетные кривые изменения температуры на контрольные точки замеров проведенных в эксперименте.



а)



б)

Рисунок 4.5 - а) Динамика нагрева сырья при условии распределения температур во времени. Непрерывная кривая расчёт, отметки - экспериментальные замеры. б) Условия проведения замеров.

Проведённые численные натурный и численный эксперименты показали хорошее совпадение результатов. Точность в пределах 3%, что позволяет проводить расчёты температуры и влагоудаления объектов с использованием модернизированной модели.

### 4.3 Результаты моделирования при пульсационном режиме влагоудаления

Анализ экспериментальных данных и результатов математического моделирования доказывает наличие двух механизмов ограничения интенсивности влагоудаления. Это интенсивность отвода массы влаги с поверхности тела и интенсивность подвода влаги из внутренних слоёв тела к поверхности за счёт диффузии. Кроме того даже при малых толщинах материала процесс влагоудаления нужно рассматривать как нестационарный.

По окончании периода первичного прогрева на поверхности сушеного объекта устанавливается температура соответствующая 100% влажности при данном давлении. Достижение этого режима сопровождается максимальной скоростью влагоудаления и равенством скоростей подвода жидкости из объёма тела за счёт диффузии и поверхностного испарения. Скорость влагоудаления стабилизируется. Поле температур по объёму тела на этом этапе практически постоянно. Испарение проходит только на границе тела. По мере падения влагосодержания зона испарения сдвигается внутрь тела и температура поверхности возрастает. Это приводит к определённой диффузии влаги от поверхности в зону более низких температур в центре тела и к падению скорости удаления влаги. На соотношение этих этапов влияют параметры самого сырья и характер подвода тепла, сильно зависящий от метода нагрева. Так как процессы прогрева, термодиффузии не стационарны и существует механизм переноса влаги от более нагретых зон тела к менее нагретым слоям. То можно утверждать, что периодически повторяющееся охлаждение поверхности на третьем этапе позволяет создать направленное движение потока жидкости к поверхности с последующим испарением путём подвода тепла. Изменение периодов нагрева и охлаждения проведённое экспериментально позволило утверждать о наличии определённого, оптимального соотношения периодов нагрева и охлаждения тела для достижения максимальной скорости влагоудаления. Факторами влияния на значение данных оптимальных периодов являются не только свойства тела подвергавшегося воздействию, теплоёмкость его каркаса, размер пор, но и типы

удерживаемой им влаги но и способы подвода тепла и интенсивность охлаждения.

Для определения диапазонов оптимальных параметров периодов подвода и отвода теплоты был проведён численный эксперимент. На рисунке 4.6 показаны расчетные изменение температуры при пульсационном подводе тепла для древесной щепы толщиной 2 мм, подвод тепла осуществлялся в течение от 0 до 20 секунд, от 25 до 40 секунд, от 45 до 60 секунд, от 70 до 80 секунд и после 100 секунд осуществлялся с постоянной температурой теплоносителя (см.приложение А рисунки 4, 5).

Рассматривая поле температур в щепе с изменением времени, видим симметричное распределение поля температур по сечению, симметричность сохраняется, как на участках подвода, так и на участках отвода тепла [2]. При осциллирующем режиме пульсационное охлаждение осуществлялась с 20 по 25 секунду, с 40-45 секунду, с 60 до 70 секунд и с 80 до 100 секунд. В этих случаях температура на наружной поверхности щепы опускалось до 20 °С и соответствовала температуре охлаждающего теплоносителя.

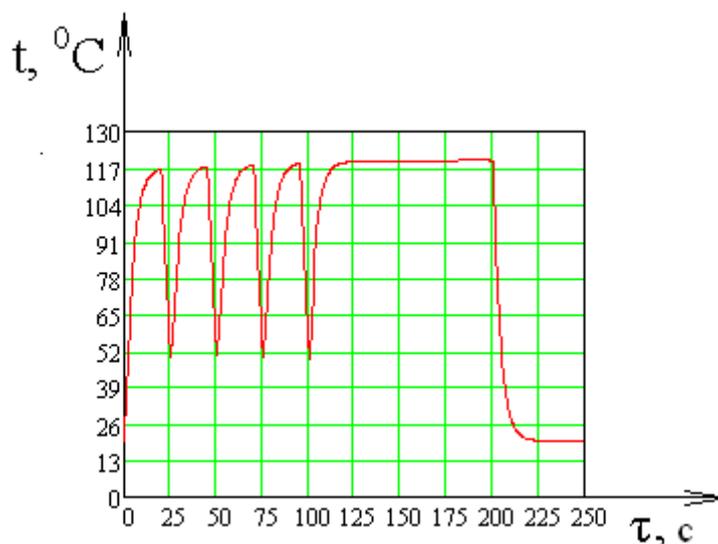


Рисунок 4.6 – Температурная зависимость в центре исследуемого объекта при осциллирующем режиме подвода тепла.

На рисунке 4.7 иллюстрируется изменение влагосодержания от центра щепы прерывистая до оболочки сплошной линии в различные моменты времени, наиболее интенсивный процесс влагоудаления протекает в течение первых 100 секунд и достигает заданных значений по влагосодержания при влагоудаления 200 секунд.

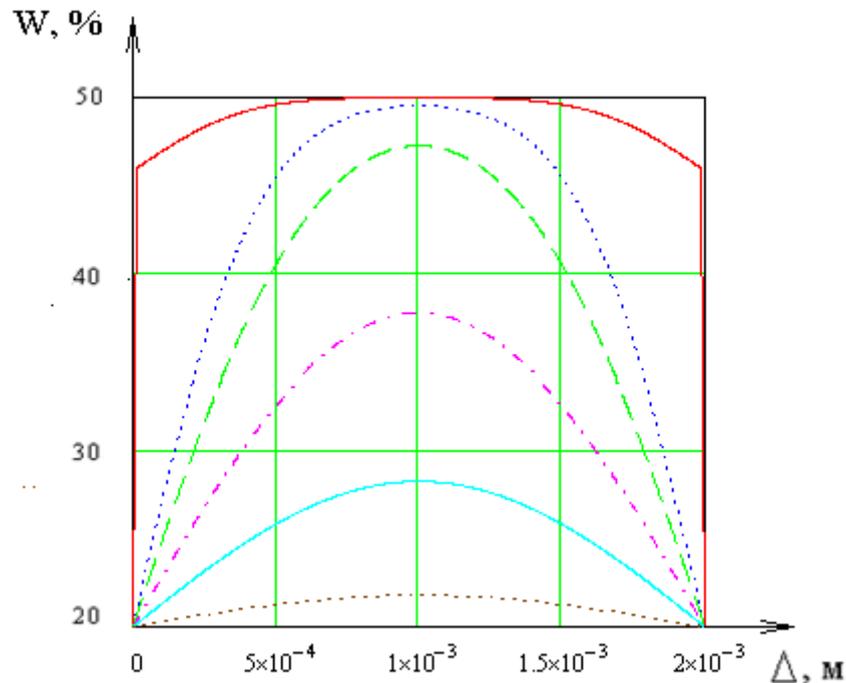


Рисунок 4.7 – График влагосодержания по сечению тела во времени

Семеричная картина влагоудаления полностью соответствует современным техническим и экспериментальным представлениям о процессе влагоудаления.

На рисунках 4.8, 4.9 представлено изменение влагосодержание с течением времени. Рисунок 4.8 соответствует осциллирующему режиму сушки, а рисунок 4.9 соответствует изменению влажности при стационарном режиме подвода тепла, практической полное идентичность характера изменения влагосодержания в течение времени показывает, что удалось расчетным путем выйти на режим, осциллирующий сушки при котором при меньших затратах тепла удастся реализовать аналогичную стационарному режиму скорость влагоудаления.

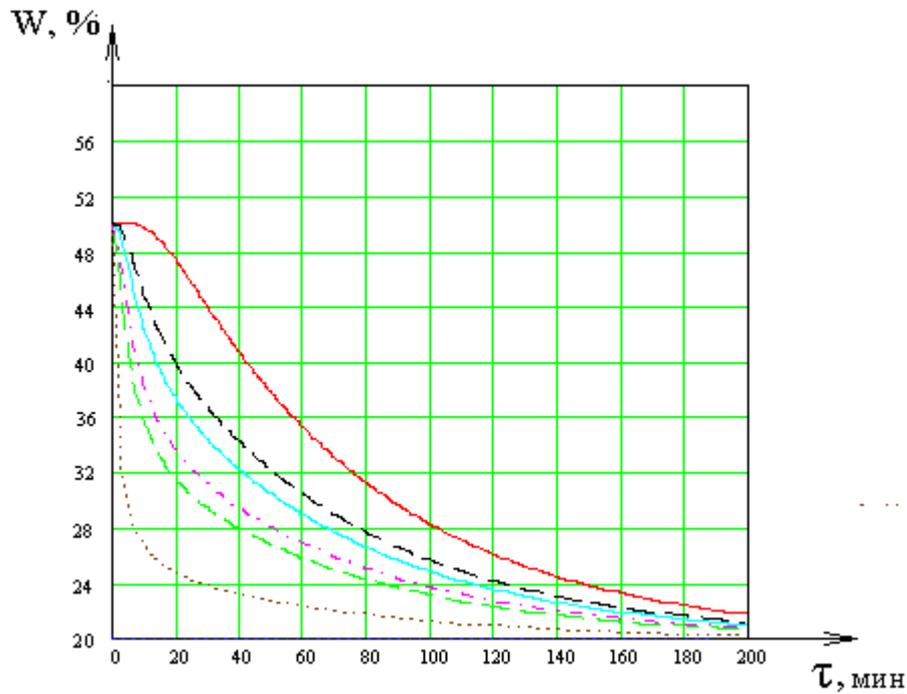


Рисунок 4.8 – График изменения влажности при осциллирующем режиме сушки.

Влагосодержание в щепе распределяется следующим образом от центра это прерывистая линия, до оболочки щепы сплошной красной линии. Сравнение с кривыми стационарного нагрева исследуемого объекта и кривыми влагоудаления при пульсирующем режиме показывает сходный характер скорости влагоудаления.

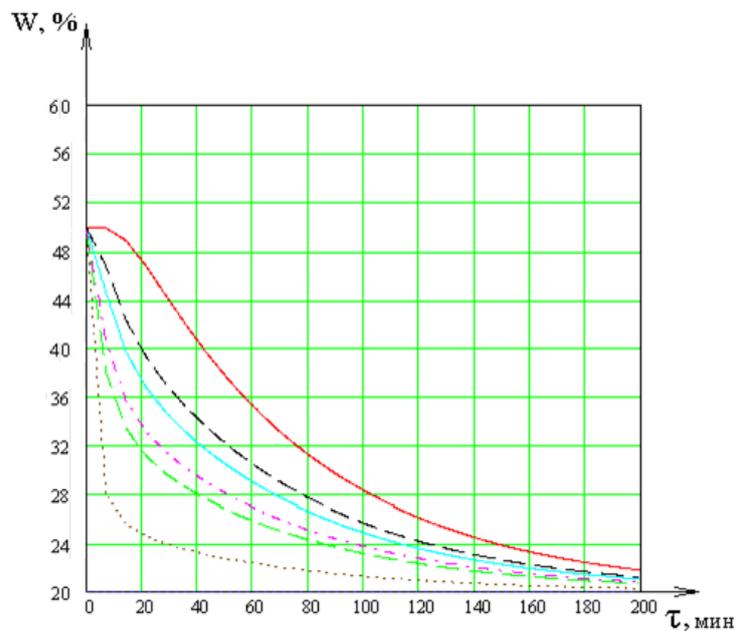


Рисунок 4.9 – График изменения влажности при стационарном режиме сушки.

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. Точность в пределах 3%, что позволяет проводить расчёты температуры и влагоудаления объектов с использованием модернизированной модели.

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

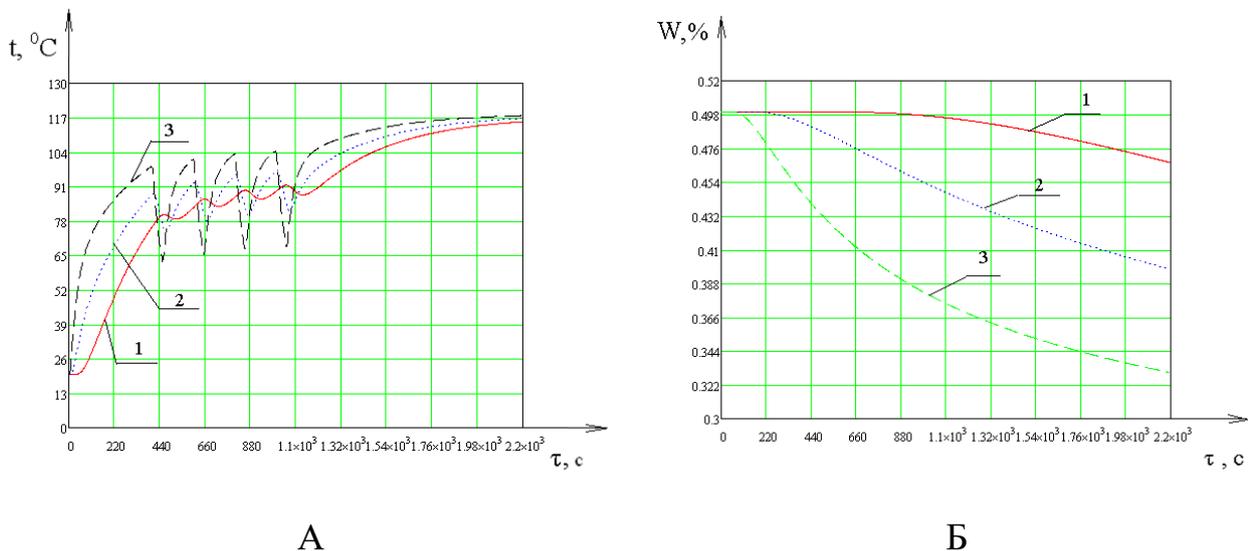


Рисунок 4.10. Графики изменения температуры и влагосодержания по сечению сырья в процессе сушки: а – динамика нагрева в осциллирующем режиме, б – изменение влагосодержания при разной толщине засыпки: 1 – 0,01м; 2 – 0,005м; 3 – 0,003м.

Значения изменения температуры и влагосодержания сравнивали аналогичными значениями, полученными без осциллирующего режима.

Методом численного эксперимента были определены временные диапазоны, обеспечивающие 20% уменьшение расхода энергии при сохранении равного времени влагоудаления со стационарным подводом тепла.

#### 4.4 Результаты математического моделирования работы воздухонагревателя

Полученная методика расчета была реализована в программном продукте Mathcad расчет позволил найти оптимальные зоны оборотов воздухонагревателя, а также диапазон оптимальных значений соотношений периодов нагрева и охлаждения. Решалась задача для воздухонагревателя, по своим параметрам соответствовавшего экспериментальной установке описанной в главе 3 и для опытно промышленного образца воздухонагревателя с наружным диаметром 300мм, внутренним диаметром насадки 270мм с шириной насадки воздухонагревателя 100мм и полной поверхности теплообмена 15м<sup>2</sup> был определен оптимальный диапазон оборотов равный 8,2об/мин (рис 4.11). Кроме этого было определено оптимальное соотношения зон нагрева и охлаждения, что составило 34% от длины окружности насадки для охлаждения и 66% для зоны нагрева соответственно.

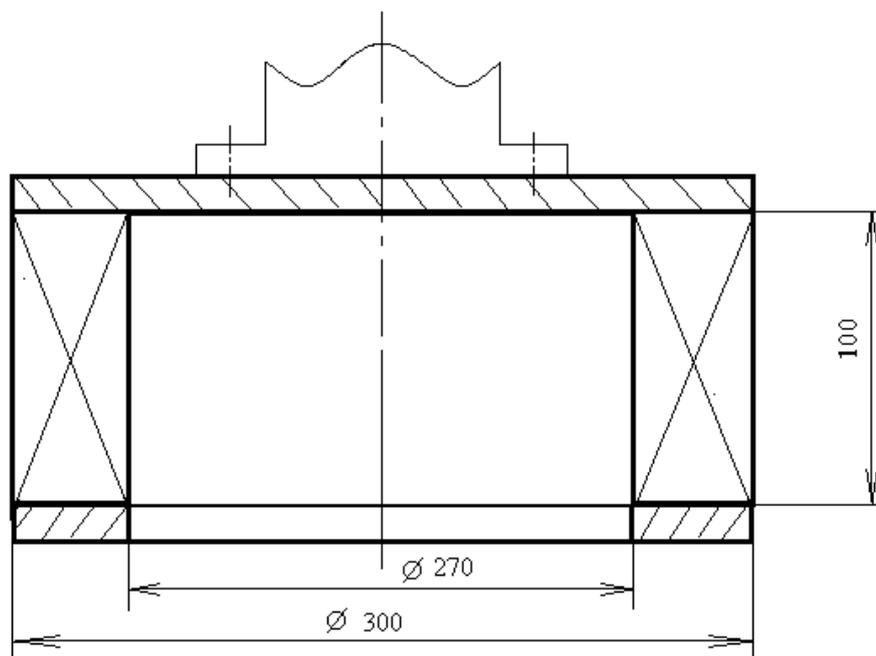


Рисунок 4.11 – Конструкция теплоаккумулирующего устройства

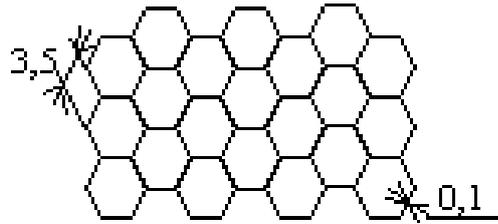


Рисунок 4.12 – Теплоаккумулирующий сотовой наполнитель.

Для верификации результатов получаемых по предлагаемой методике в программных комплексах SolidWorks и ANSYS.

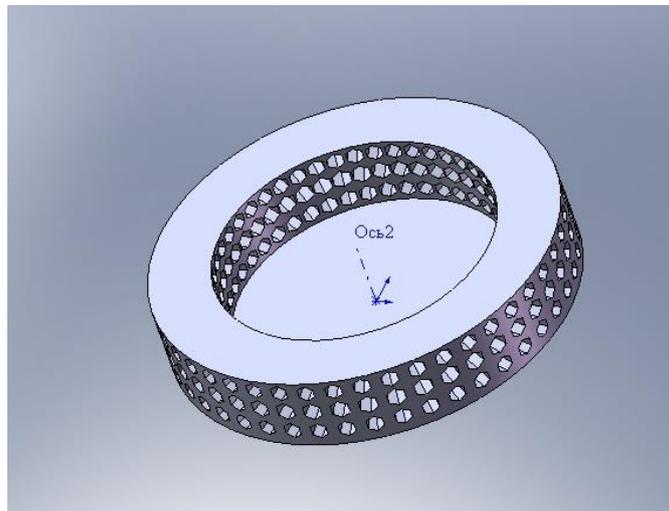


Рисунок 4.12 – Ротор с ячеистой насадкой воздухонагревателя

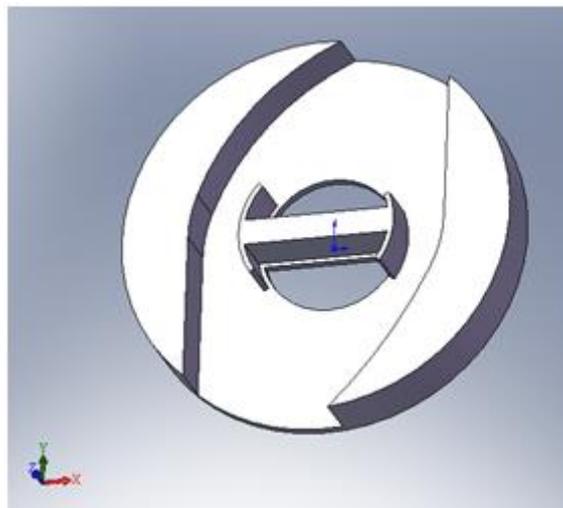


Рисунок 4.13 – Корпус воздухонагревателя

На рисунках 4.12 и 4.13 представлена трехмерная расчетная модель предлагаемой конструкции воздухонагревателя с ячеистой теплоаккумулирующей насадкой.

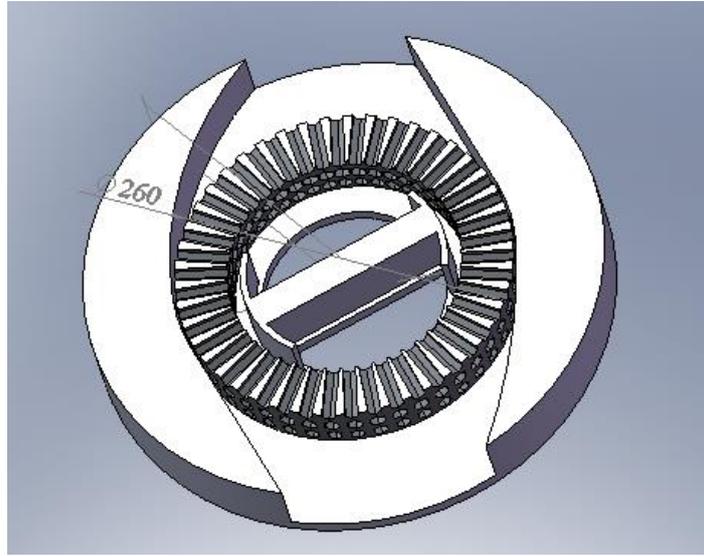


Рисунок 4.14 – Сборка воздухонагревателя

Рисунок 4.14 иллюстрирует расчетную схему «сборки» модели воздухонагревателя.

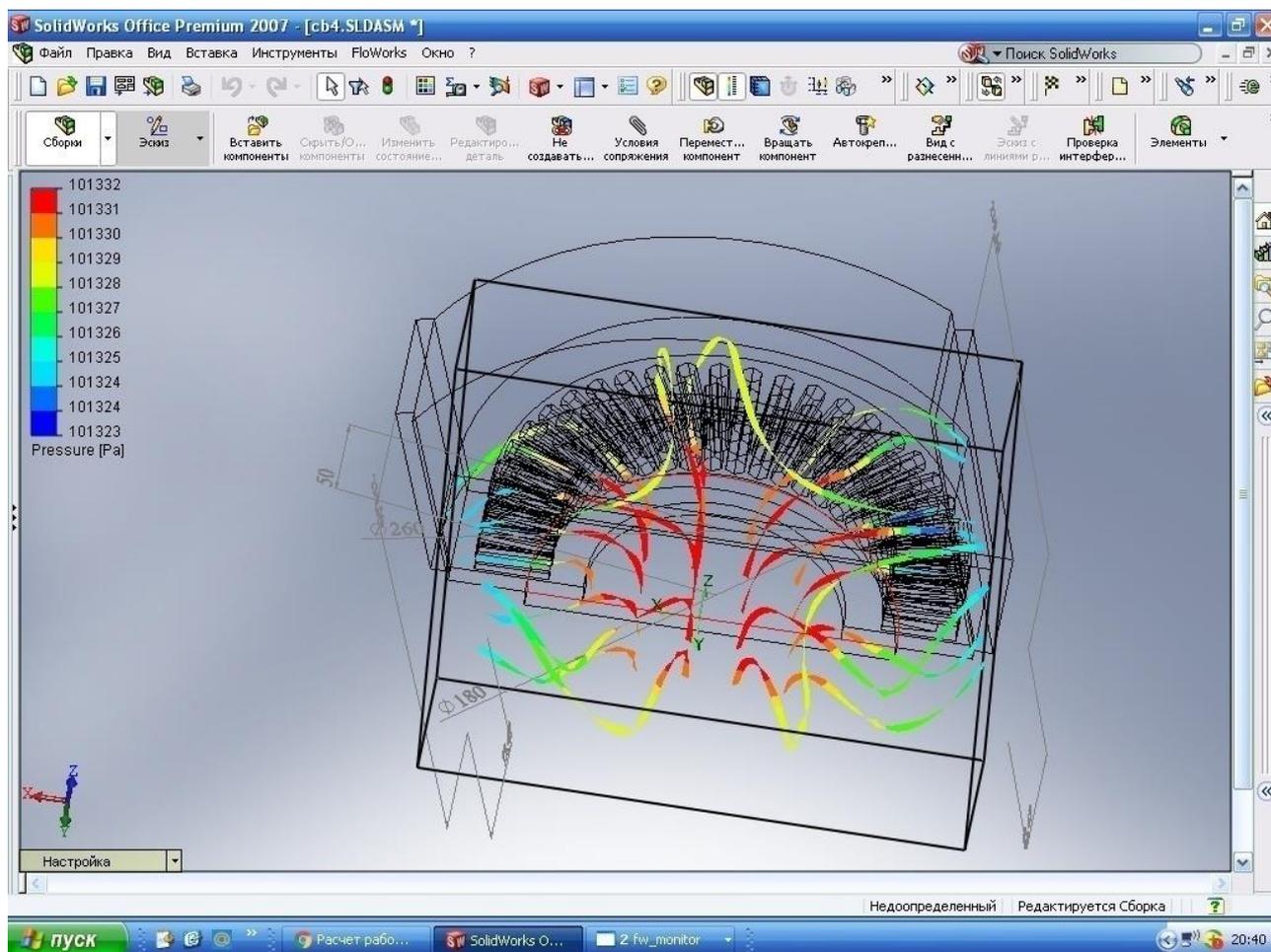


Рисунок 4.15 – Поле давлений при минимальной скорости вращения  
воздухонагревателя

Рисунок 4.15 иллюстрирует поля давлений полученное при расчете системы моделирование в комплексе SolidWorks и ANSYS позволяло получать поля давлений, поля температур, а также скоростей и значение получаемых расходов. Для определения оптимальных значений тепловых потоков производилось варьирование площадями подвода греющего и охлаждающего теплоносителей. Графическая зависимость распределения скоростей при, оптимальных значениях площадей зон подвода и отвода греющего теплоносителя приведена на рисунке 4.16.

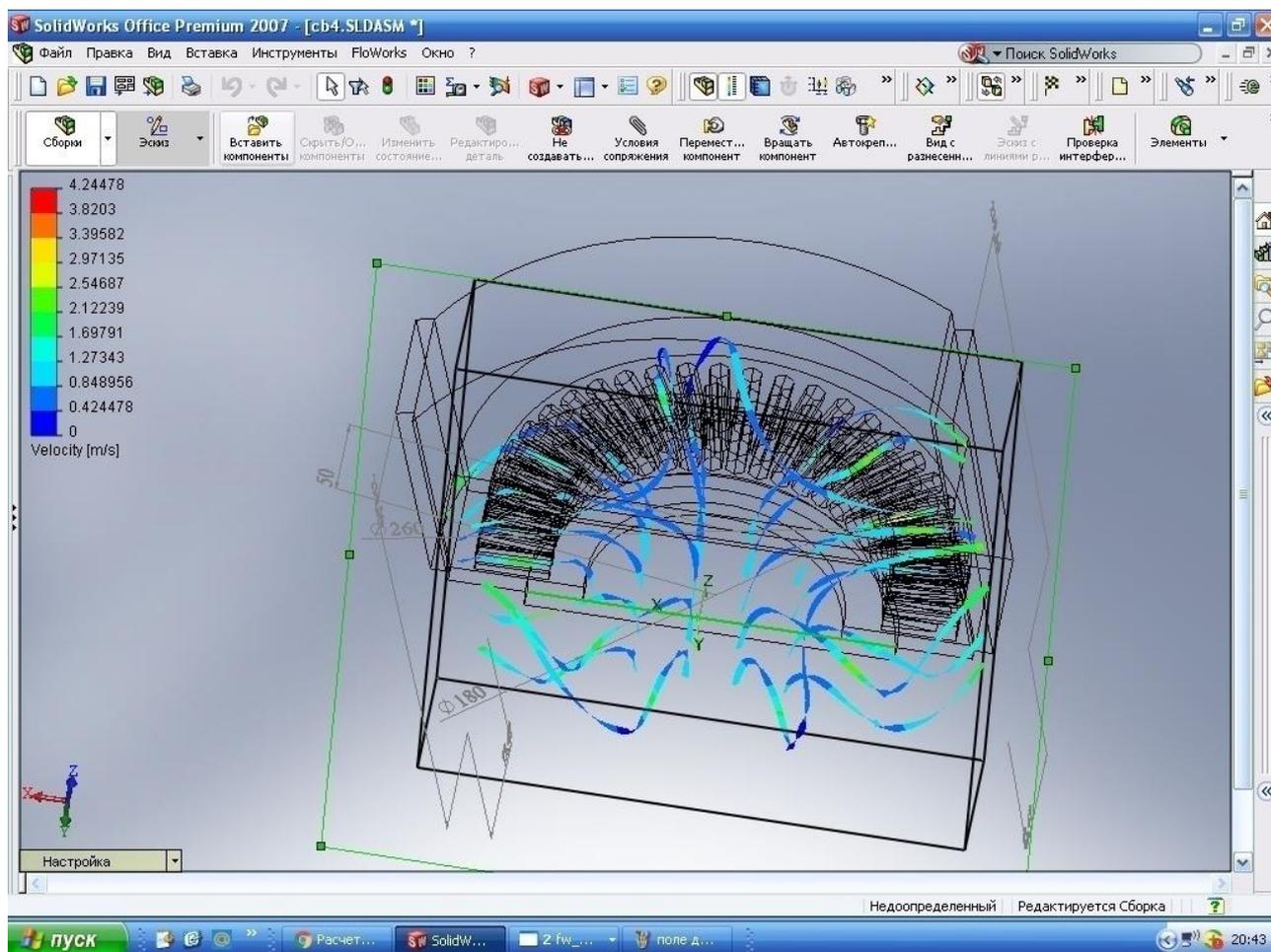


Рисунок 4.16 – Поле давлений при оптимальной скорости вращения воздушнонагревателя.

В программных комплексах ANSYS и SolidWorks смоделирован шнек и произведена проверка прочности с учётом нагрева и аэродинамического сопротивления конструкции ( см. рис. 4.17)

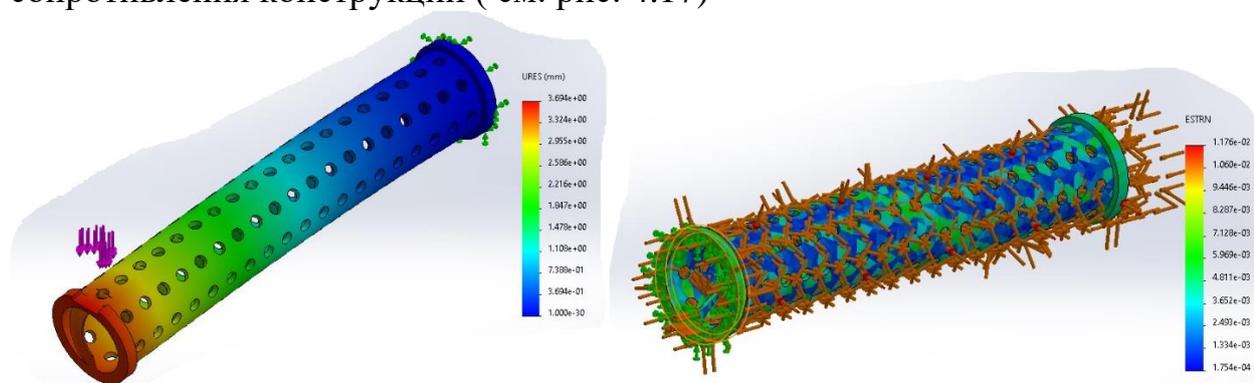


Рисунок 4.17. Прочные характеристики и распределение потоков в перфорированном шнеке камеры СВЧ

Таблица 4.1 – Результаты испытания опытно-промышленной установки

Обороты, об/мин	Количество передаваемого тепла, кВт	Температура холодного теплоносителя, °С	Температура горячего теплоносителя, °С
6	7,7	40,2	160,8
7	8,1	41,1	159,9
8	7,3	41,8	159,2
9	6,7	42,5	158,5
10	6,2	43,5	157,9
11	5,7	43,8	157,4
12	5,4	44,3	156,9
13	5,0	44,8	156,4
14	4,7	45,3	155,9
15	4,5	45,7	155,5
16	4,3	46,6	155,1
17	4,1	47,0	154,4

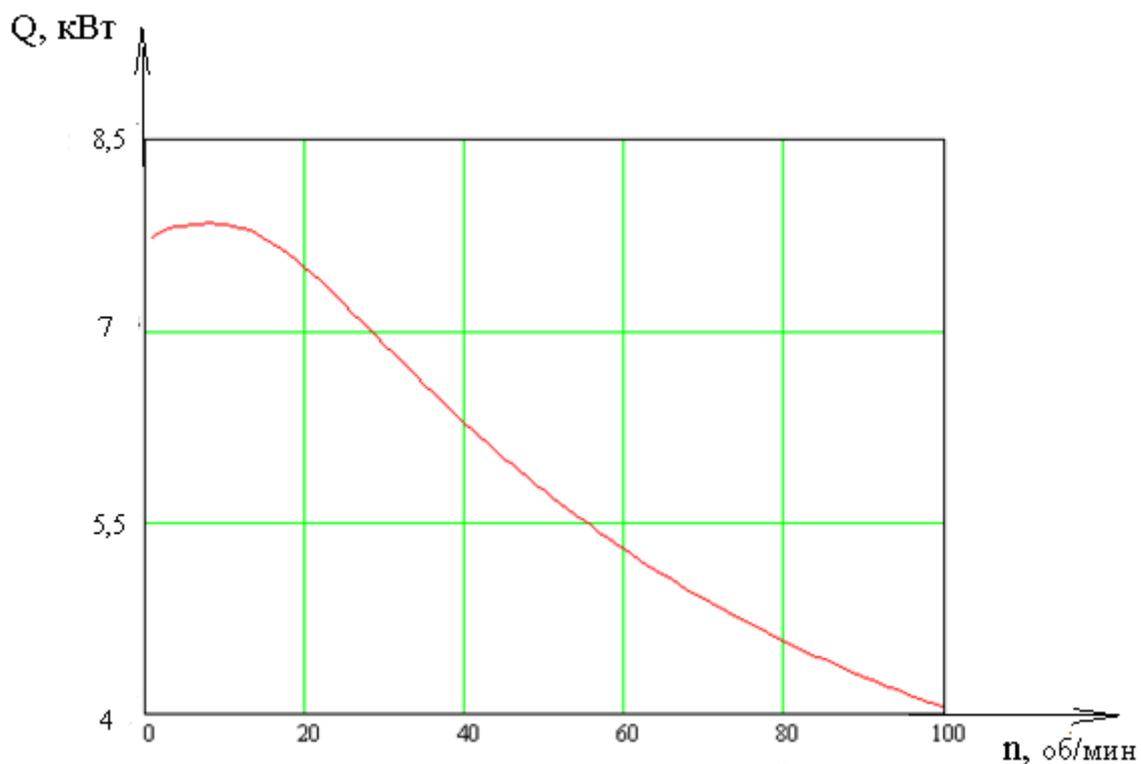


Рисунок 4.18 – Зависимость передаваемого количества тепла от оборотов

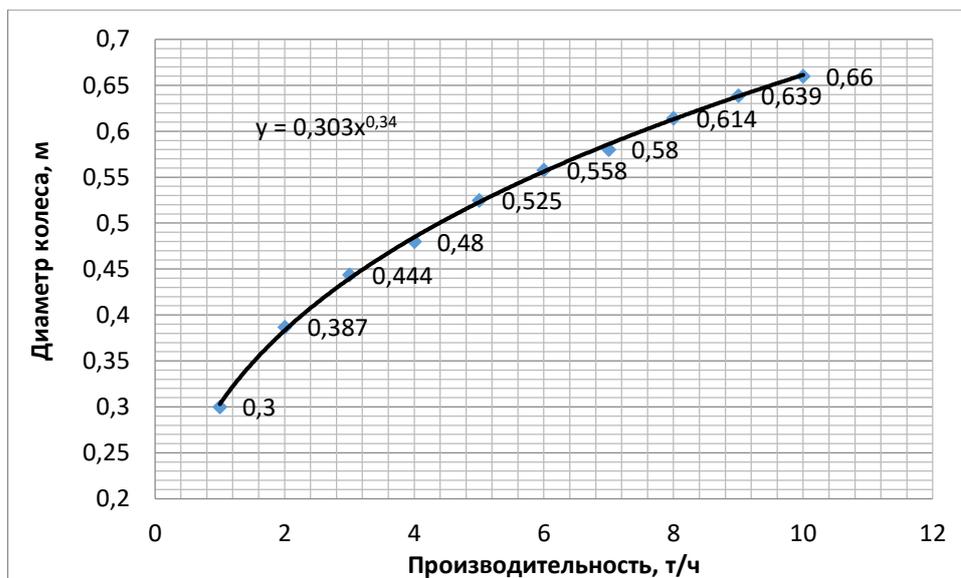


Рисунок 4.19. Подбор диаметра теплоутилизатора в зависимости от производительности при мощности 7 кВт

Сравнение результатов расчетов по инженерной методике и результатов численного эксперимента показывают расхождения не более 10% на всех режимах, включая зону оптимальных оборотов (рис. 4.18), что в полнее достаточно для решения инженерных задач.

Оценивая передаваемую тепловую мощность, было выявлено, наличие экстремума соответствующего 8,2 об/мин, что соответствовало требуемого массе насадке 16,2 кг и диаметру 0,3 м. Исходя из этих данных были рассчитаны остальные характеристики вращающегося воздухонагревателя (рис 4.19). Использование вращающегося воздухонагревателя позволило осуществить экономию порядка 8кВт тепловой мощности на тонну получаемого сырья. Вместе реализации осциллирующего режима сушки это позволяет снизить затраты тепла с тонны продукции на 26 кВт.

**Выводы по 4 главе**

- 1. Предложенная математическая модель адекватно описывает процессы влагоудаления. Точность получаемых результатов при сравнение с результатами эксперимента составило 3%, что подтверждает адекватность основных предпосылок;**
- 2. Автором обоснован метод осциллирующей сушки, позволяющий снизить энергетический затраты на влагоудаления. При СВЧ сушке плодов абрикос в пульсирующем режиме, минимальные затраты электроэнергии могут быть достигнуты при чередовании 30 секундного нагрева и продувки что позволяет снизить потребление на 35,6% с более высоким качеством конечной продукции, но при возрастании общего времени сушки на 25%. Для осциллирующего режима конвекционной сушки включающегося пять участков подвода теплоты и четыре участка охлаждения при длительности периода сушки опила 200 секунд была получена 20% экономия тепловой энергии.**
- 3. Проведен численный эксперимент подтвердивший верность основных предпосылок заложенных в методике расчета вращающегося воздушнонагревателя. Расчет по предлагаемой инженерной методике при сравнение с экспериментальными данными и результатами численного моделирования в программных продуктах SolidWorks и ANSYS показал расхождение не более 10% по расходам газа, что составляет  $0,012 \text{ м}^3/\text{с}$  для 10 об/мин при площади поверхности теплообмена  $15 \text{ м}^2$ .**
- 4. Проведён натурный эксперимент, показавший возможность снижения энергетических затрат при использовании вращающегося воздушнонагревателя на 6,3 кВт при суммарной мощности 70 кВт.**
- 5. Получены значения оптимальных конструкционных и режимных параметров для теплообменника утилизатора составляющих**

**отношения зон нагрева 66% и охлаждения 34%, а также диапазон оптимальных частот вращения от 5 до 8,6 об/мин. для воздухонагревателя с площадью поверхностью нагрева 15 м<sup>2</sup>.**

## Глава 5 Практическое применение результатов исследования СВЧ-сушке абрикос от внедрения воздухонагревателя

### 5.1 Повышение энергоэффективности при СВЧ-сушке абрикосов

В связи с тем, что СВЧ-устройства на рынке более выгодны в ценной политике, то все больше предпринимателей и фирм отдают предпочтение СВЧ-аппаратам. Не исключением была и ООО ПКФ «АТИС», которая проанализировав все имеющиеся сушильные устройства на рынке приобрела СВЧ-устройство «Барахан-3».



5.1 – СВЧ-устройство «Бархан 3»

«Бархан 3» имеет широкое применение. Их используют для сушки: семян и ядер подсолнуха, фисташек, арахиса, сухих смесей для кормов животных, различных круп, «сухая варка» овощей, снижают содержание влаги у промышленно-природных материалов (песок, глина и т.д.). Также их применяют для предпосевной обработки семян, при это получают хорошие результаты по всхожести.

Высокое качество готового продукта после СВЧ-устройства «Бархан 3». Конечный продукт имеет насыщенный вкус и аромат, великолепный внешний вид, высокую однородность прожарки, отсутствие дробления, на поверхности продукта полностью отсутствует сажа.

СВЧ-установка работает в автоматическом режиме при минимальном влиянии оператора. Датчики различного назначения контролируют

технологические параметры и управляют процессом жарки. Управление осуществляется с цветного графического дисплея, на котором отображается информация о состоянии работы установки.

СВЧ-установка не содержит внешних подвижных деталей и поверхностей с повышенной температурой, что исключает возможность ожога. Конструкция установки обеспечивает отсутствие микроволнового излучения во внешнюю среду. Санитарно-эпидемиологическое заключение подтверждает полное соответствие установки принятым нормам.

При высокой производительности установка имеет минимальные вес и габариты, что позволяет размещать ее, практически, в любом помещении. Кроме того, установка в короткие сроки может быть демонтирована и перемещена в другое место.

Таблица 5.1 - Технические характеристики:

	"Бархан 3/1"	"Бархан 3/2"
Количество микроволновых модулей:	1 шт.	2 шт.
Производительность по орехам	200 кг/ч	400 кг/ч
Производительность по семечкам	150-180 кг/ч	250-300 кг/ч
Производительность по абрикосам (по исходному сырью)	80-90 кг/ч	100-120 кг/ч
Рабочая температура:	от +5 до +230 °С	
Электропитание:	3ф 380В, 50-60Гц	
Потребляемая мощность, max:	42 кВт	60 кВт
Габаритные размеры (ДхШхВ):	3600х1300х2300 мм	
Вес:	600 кг	850 кг

Повышение энергетической эффективности установки Бархан 3/2.

Анализируя работу «Бархан 3» можно выделить следующие зоны: транспортная, здесь сырьё подаётся в установку по конвейеру; Зона предварительной сушки; микроволновый модуль основной зоны влагоудаления; зона транспортировки готовой продукции. Варьируя скоростью прохождения сырья и температурой предварительного в широких пределах меняют влагосодержание готового продукта.

Для повышения эффективности сушки установка была модернизирована (см. рис 5.2 б), в первоначальном варианте, нагретый воздух продувки после насыщения влагой сбрасывался в атмосферу с температурой 80- 140 °С. Нами была реализована частичная регенерация отводимого тепла с помощью вращающегося воздухонагревателя выполняющего и функции вентилятора (см. рис 5.2). Кроме того, в установке реализован пульсирующий режим влагоудаления.

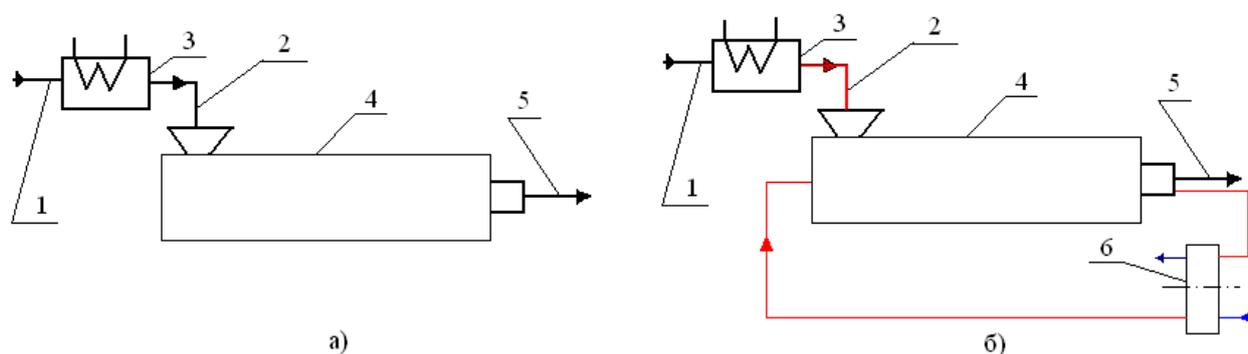


Рисунок 5.2 – Схема действия установки. а) серийная; б) модернизированная

1 – подвод холодного сырья; 2 – ввод подогретого сырья в камеру СВЧ сушки; 3 – подогреватель; 4 – камера СВЧ сушки; 5 – отвод высушенного сырья; 6 – воздухонагреватель.

Реализация пульсирующего режима нагрева в установке была реализована путём изменения системы подачи высушиваемого сырья. Так как расстояние между магнетронами составляет на установке 400 мм (см рис 5.3), то в камере СВЧ сушки существуют «мёртвые» зоны, где интенсивность СВЧ поля минимальна, то дозация высушиваемого сырья осуществлялась, таким образом, чтобы время присутствия в зонах максимума воздействия СВЧ поля и зонах продувки было равным. В главе 4 автором было определено наиболее энергоэффективное соотношение времени нагрева и продувки для абрикосов, как наиболее влагосодержащего продукта. Соотношение времени нагрева и продувки составило 30 секунд СВЧ воздействия и 30 секунд продувки соответственно.

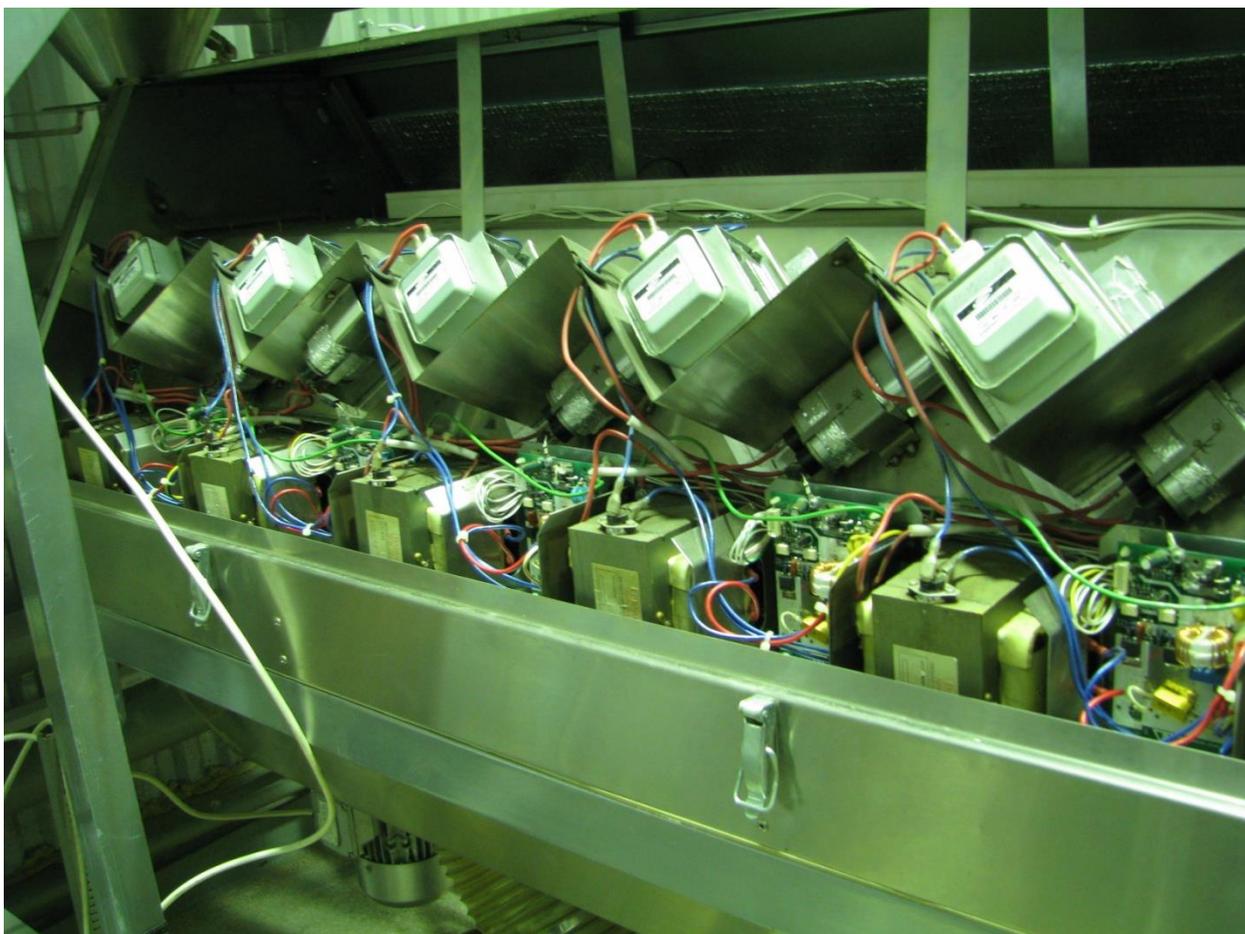


Рисунок 5.3 – Расположение магнетронов установки «Бархан 3»

Применён опытно промышленный образец воздушнонагревателя с наружным диаметром 300мм, внутренним диаметром насадки 270мм с шириной насадки воздушнонагревателя 100мм и полной поверхности теплообмена 15 м<sup>2</sup> был определен оптимальный диапазон оборотов равный 8,2 об/мин. Понижение оборотов осуществлено с помощью планетарного редуктора и частотного преобразователя. Воздушнонагреватель выполнен с оптимальным соотношением зон нагрева и охлаждения, что составило 34% от длины окружности насадки для охлаждения и 66% для зоны нагрева соответственно. Расход воздуха составит 0,1 м<sup>3</sup>/с при нагреве свежего воздуха на 41,7 °С, что эквивалентно тепловой мощности 6,5 кВт.

В главе 4 автором было определено наиболее энергоэффективное соотношение времени нагрева и продувки для абрикосов, как наиболее влагосодержащего продукта. Данный режим был реализован путём выполнения загрузочного- транспортного устройства в виде шнека с шагом равным половине

расстояния между магнетронами (см рис 5.4, 5.5), что составило 200 мм . Высота шнека позволяет захватывать 100 гр абрикос за один оборот на одном витке шнека.

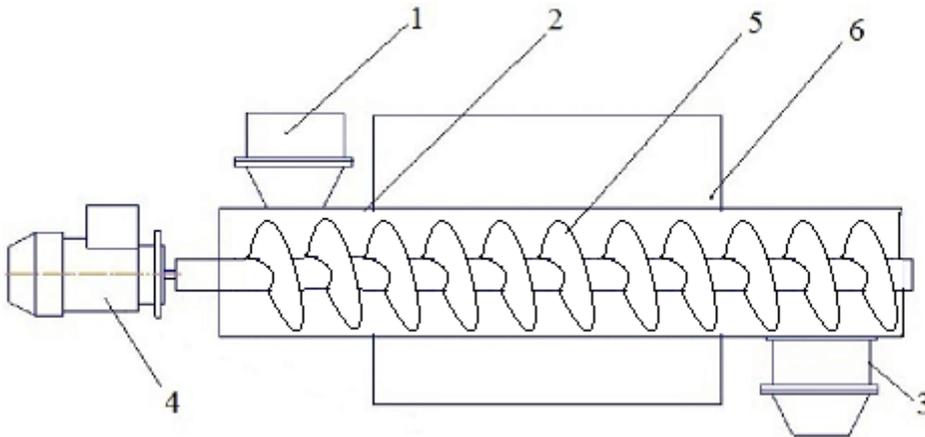


Рисунок 5.4 – Схема предложенного шнекового подающего устройства для установки СВЧ обработки сыпучих диэлектрических материалов: 1 – загрузочное устройство; 2 – камера; 3 – разгрузочное устройство; 4 – электропривод шнека; 5 – шнек из радиопрозрачного материала; 6 – рабочая камера СВЧ нагрева.

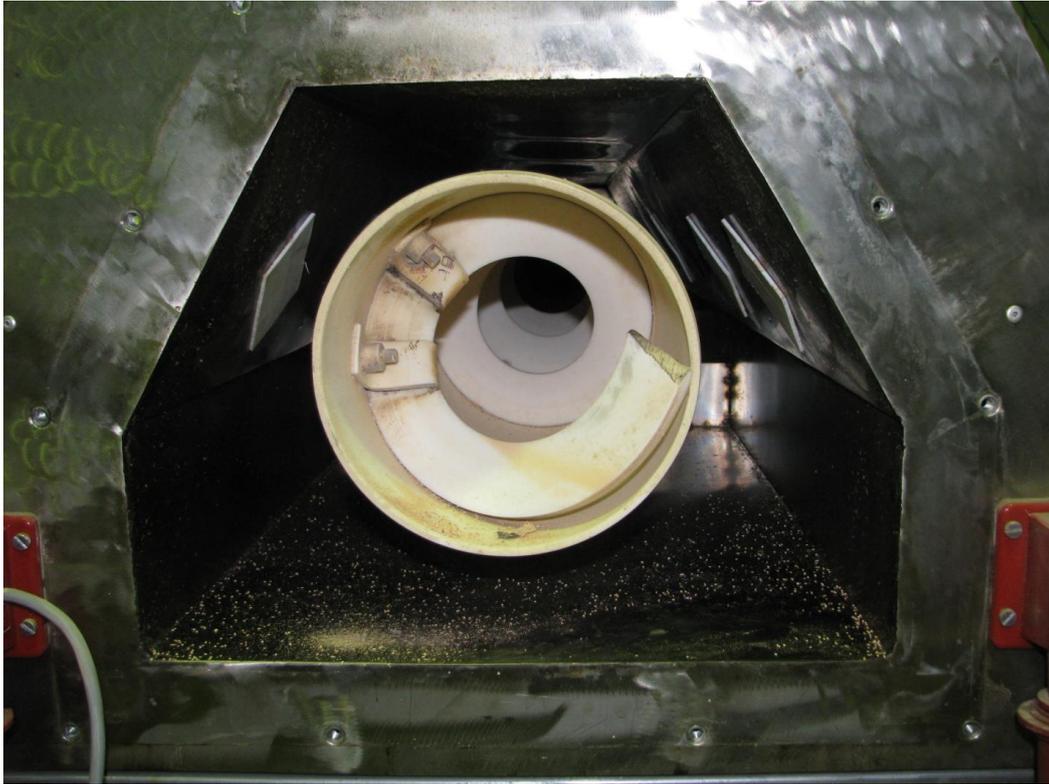


Рисунок 5.5 – Шнек из радиопрозрачного материала

Привод шнека электрический с регулируемым временем пауз и поворотом шнека на заданный угол. Труба – основание шнека в зоне между установками магнетронов перфорирована для прохождения сушильного газа. Движение газа осушки с периферии в центр трубы. Предложенные мероприятия позволили снизить расход электроэнергии на сушку абрикосов 33,4% с более высоким качеством конечной продукции, но при возрастании общего времени сушки на 26%



Рисунок 5.6 – Установка в ходе модернизации

### **Калькуляция на участок производства жареных семян подсолнечника на микроволновой установке Бархан-3/2**

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

#### **Вводные данные:**

- Производительность оборудования по сырью –ядра семечек 250 кг/ч, абрикос 100кг/ч.
- Обслуживающий персонал - рабочий -2 чел./смена(электрик-технолог 15тыс.руб)+2 чел. (директор 40тыс.руб+бухгалтер 30 тыс.руб)
- Выход готовой продукции –ядра семечек 235 кг/ч, сушеный абрикос 50кг/ч.
- Состав оборудования: подающий транспортер, микроволновая установка «Бархан-3/2», теплообменник «Волна», сепаратор, фасовочно - упаковочный автомат с весовым дозатором.
- Установленная электрическая мощность - 70 кВт.
- Расход воды, пара, газа - отсутствуют.
- Фасовка готовой продукции - по 100 г.
- Упаковка в картонные коробки по 10 кг.

Таблица 5.1 - Срок окупаемости ядра подсолнуха

№ п/п	Наименование расходов	Ед. изм.	Кол-во в месяц	Цена, руб.	Стоимость в месяц, руб.
1	Закупочная стоимость сырья ядра подсолнечника	Кг	8ч x14дн x250кг/ч = 28 000	40,00	1 120 000
2	Электроэнергия	кВт*ч	8ч x14дн x70кВт= 7840	5,0759	39 795,06
3	Пакет п/э	Шт.	235кг/ч x 8ч x 14дн= 26320	0,50	13160
4	Коробка	Шт.	23,5	6,50	17108
5	Фонд оплаты труда	Руб./мес. Средняя		25 000,00	66666,7(100 000)
6	Социальные отчисления 26,4%	Руб./мес.			17 533,3
7	Всего прямых затрат:	Руб./мес.			1 274 263,06
8	Накладные расходы 20%	Руб./мес.			254 852,6
9	ИТОГО затраты предприятия:	Руб./мес.			1 529 115,66
10	Себестоимость 1 кг готового продукта ядра подсолнуха	Руб./кг	$1529115,66:235:14:8=59,92$		58,1
11	Оптовая цена жареных семян подсолнечника за 1 кг	Руб./кг			100
12	Прибыль предприятия	Руб./мес.	$(100-58,1) \times 8 \times 14 \times 235 = 1102808$		
13	Срок окупаемости оборудования	мес.	$1102808 \times 12 \text{мес} : 1529115,66 = 8,6 \text{ мес.}$		

Таблица 5.2 – Срок окупаемости абрикос

№ п/п	Наименование расходов	Ед. изм.	Кол-во в месяц	Цена, руб.	Стоимость в месяц, руб.
1	Закупочная стоимость сырья абрикос	Кг	8ч x7дн x100кг/ч = 5600	50,00	280 000
3	Электроэнергия	кВт*ч	8ч x7дн x70кВт= 3920	5,0759	19 897,53
4	Пакет п/э	Шт.	50кг/ч x 8ч x 7 дн= 2800	0,50	19 740
5	Коробка	Шт.	280	6,50	1820
6	Фонд оплаты труда	Руб./мес. Средняя		25 000,00	33333,33(100000)
7	Социальные отчисления 26,4%	Руб./мес.			8800
8	Всего прямых затрат:	Руб./мес.			363590,86
9	Накладные расходы 20%	Руб./мес.			72718,2
10	ИТОГО затраты предприятия:	Руб./мес.			872618,1
11	Себестоимость 100 кг абрикоса	Руб./кг	872618,1:50:7:8=311,65		311,64
13	Оптовая цена сушеного абрикоса за 1 кг	Руб./кг	80руб за 100гр		800
14	Прибыль предприятия	Руб./мес.	(800-311,64)x8чx7днx50=1367408		
15	Срок окупаемости оборудования	мес.	1367408x12мес:872618,1=18 мес.=1год6 мес.		

### 5.2 Внедрение воздухонагревателя в процесс сушке ядер подсолнечника

В ООО ПКФ «АТИС» были заложены следующие факторы: затраты на оборудование, затраты на персонал и срок окупаемости.

В связи сокращением затрат были приняты следующие меры: сократить затраты на электроэнергию. «Бархан 3/2» снабжен магнетронами. Они расположены по 8 штук с двух сторон, всего их 16 потребляемая мощность их по 40 кВт на магнетрон. В транспортной ленте помещены два электродвигателя

по 2 кВт. Также по 2 кВт расходуется на упаковочное устройство. Теплообменник «Волна» потребляет 26 кВт.

Руководство ООО ПКФ «АТИС» решили сократить потребление электроэнергии, поэтому было принято решение применить экспериментальную установку – регенеративный вращающийся воздухонагреватель.

Затраты на изготовление, вращающегося регенеративного воздухонагревателя, включают в себя затраты на изготовление конструкции и стоимость материалов, но так как установка была экспериментальной, то и затраты были минимальны.



Рисунок 5.8 – СВЧ-установка с воздухонагревателем в процессе монтажа

Расход электроэнергии вращающегося регенеративного воздухонагревателя составил 600Вт/ч.

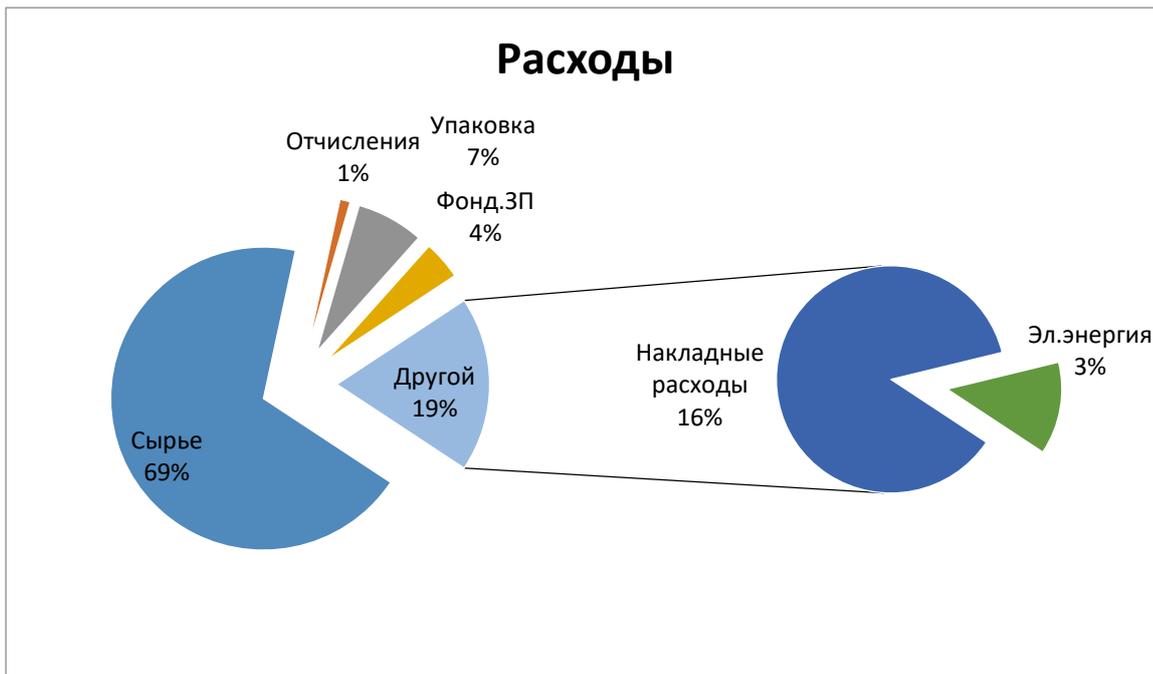


Рисунок 5.8 – Схема затрат на эксплуатацию СВЧ-установки с воздушнонагревателем

$8\text{ч} \times 21\text{ дн} \times 0,6\text{Вт} \times 5,0759\text{руб.} = 511,65\text{ руб/месяц}$

Вместо  $8\text{ч} \times 21 \times 26\text{кВт} \times 5,0759 = 22171,53$  теплообменника «Волна»

Хоть срок окупаемости остался прежним, но в связи с тем, что происходит небольшая экономия в электроэнергии, ежемесячно предприятие экономит до 25 тыс.руб в месяц.

**Выводы по 5 главе**

- 1. Проведена модернизация СВЧ установки сушки. За счёт реализации пульсирующего режима влагоудаления при сушке абрикосов предложенные мероприятия позволили снизить расход электроэнергии на сушку на 33,4% с более высоким качеством конечной продукции, но при возрастании общего времени сушки на 26%.**
- 2. 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.**
- 3. При процессе сушке абрикосов и ядер семечек мы получили экономию в 25 тыс.руб в месяц по электроэнергии. В связи с этим фирма смогла направить сэкономленные денежные средства на дальнейшее развитие.**
- 4. Разработанные методики проведения воздухонагревателя, так и работы в системы в целом показали достаточную для инженерных расчетов точность.**

## 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.

**Список литературы**

1. Алексанян И. Ю., Буйнов А. А. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2004. – 380 с.
2. Алексеев Е.Р. Mathcad – 12 / Е.Р. Алексеев, О.В. Чеснокова / М.: NTPress. – 2005. – 345 с.
3. Амирханов И. В., Павлушова Эрика, Павлуш Мирон. Численное моделирование процессов тепло- и массо- переноса в пористом материале. Журнал Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Математика, информатика, физика. Выпуск № 2-2, 2010. с.55-58.
4. Андрухов, В.Г. Подсолнечник / В.Г. Андрухов, Н.Н. Иванов. – М.: Россельхозиздат, 1990. – 68 с. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х т. Т.1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 384 с.
5. Анискин, В.И. Теория и технология сушки и временной консервации зерна активным вентилированием / В.И. Анискин, В.А. Рыбарук. – М.: Колос, 1972. – 199 с.
6. Арнольд В. И. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Наука, 1984. 272 с.
7. Атаназевич, В.И. Сушка пищевых продуктов / В.И. Атаназевич – М.: ДеЛи, 200. – 289 с.
8. Афанасьев А.М. Переходные явления тепло- и массопереноса при конвективной сушке капиллярнопористых материалов / А.М. Афанасьев, И.А. Конягин, Б.Н. Сипливый // Математическое моделирование. – 2004. - №5(16). – С. 117-127.
9. Ахмедьянова Е. Н. Оценка эффективности использования энергоносителей. В сборнике: Материалы LV международной научно-технической конференции. (Электронный ресурс). ФГБОУ ВО «Южно-

- Уральский государственный аграрный университет». Челябинск, 2016. С. 276-282.
10. Ахмедьянова Е.Н. Модульные энергообеспечивающие установки. В сборнике: Актуальные проблемы энергетики АПК Материалы IV Международной научно-практической конференции. Под редакцией А.В. Павлова. 2013. с. 9-11.
  11. Ахмедьянова Е. Н. Проблемы оптимизации динамики удаления влаги гранулированного материала / Динамика и виброакустика машин : сб. докл. второй Международной науч.-техн. конф. 15 - 17 сент. 2014 г. Т. 2 / ФГАОУ ВПО «Самарский гос. аэрокосмический ун-т им. акад. С. П. Королева (национальный исследовательский ун-т)» .— Самара: СГАУ, 2014 .— С. 714-717 .
  12. Ахмедьянова Е. Н. Теоретические исследования процесса сушки. В сборнике: Наука ЮУрГУ Материалы 68-й научной конференции (Электронный ресурс). 2016. С. 881-887.
  13. Ахмедьянова Е.Н. Повышение энергетической эффективности процесса сушки древесной щепы. В сборнике: Достижения науки - агропромышленному производству Материалы LIII международной научно-технической конференции. Под редакцией П. Г. Свечникова. 2014. с. 7-11.
  14. Ахмедьянова Е.Н. Повышение энергоэффективности в переработки отходов на примере древесных пеллет. В сборнике: Наука ЮУрГУ Материалы 66-й научной конференции (Электронный ресурс). Ответственный за выпуск: Ваулин С.Д.. 2014. С. 1317-1322.
  15. Ахмедьянова Е.Н. Увеличение энергоэффективности установок сушки пеллет. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1-2. С. 352-355.
  16. Ахмедьянова Е.Н., Ахмедьянова К.Т., Редников С.Н. СВЧ-подвод сушки органических продуктов. Научный журнал. АПК России. Том 27 №1, Челябинск 2020. С. 67-71.

17. Ахмедьянова Е.Н., Пташкина-Гирина О.С. Нестационарные режимы влагоудаления. В сборнике: Пром-Инжиниринг труды международной научно-технической конференции. ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет). 2015. с. 40-42.
18. Ахмедьянова Е.Н., Редников С.Н. Математическое моделирование процесса сушки древесных отходов. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № (2). С. 382-385.
19. Ахмедьянова, Е. Н. Гидродинамика процесса сушки /Динамика и виброакустика машин : сб. докл. второй Международной науч.-техн. конф. 15 - 17 сент. 2014 г. Т. 1 / ФГАОУ ВПО «Самарский гос. аэрокосмический ун-т им. акад. С. П. Королева (национальный исследовательский ун-т)» .— Самара: СГАУ, 2014 .— С. 145-149.
20. Баланцева Н.Б. Математическое описание свойств древесины для расчета влажности в процессе сушки / Баланцев Г.А., Баланцева Н.Б. // «Наука - северному региону» вып.78, Архангельск: АГТУ, 2009, с. 9-12.
21. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 2000. – 216 с.
22. Бастрон, А. В. Тепловизионные исследования температурных полей при предпосевной обработке семян сельскохозяйственных культур ЭМП СВЧ/ А. В. Бастрон, А. В. Исаев // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. - 2014. - Вып. 64. - С. 79-85
23. Беляев, А.А. Исследование распределения СВЧ-поля в пространстве рабочей камеры / А.А. Беляев, А.Л. Андержанов, С.А. Андреев, А.И. Соколов // Электропривод и электротехнология на объектах АПК: сб. науч. тр. / МИИСП имени В.П. Горячкина. – М.: 1989-с.12-20.
24. Бородин, И.Ф. Применение СВЧ-энергии в сельском хозяйстве / И.Ф. Бородин, Г.А. Шарков, А.Д. Горин. – М.: ВНИИТЭИагропром, 1987. – 56 с.

25. Братерский, Ф.Д. Активность глутаматдегидрогеназ семян кукурузы при естественной и искусственной сушке / Ф.Д. Братерский // Известия вузов СССР. Пищевая технология. – 1973. - №5. – с. 23-26.
26. Будников, Д.А. Проблемы и возможности использования СВЧ для сушки зерна / Д.А. Будников // Проблемы исследования и проектирования машин. – Пенза, 2006. – с. 113-115.
27. Будников Е.Ф., Сидоров В.Н. Водогрейные котлы и их применение на электростанциях и в котельных издательство. – М.: «Энергия», 1965, 250с.
28. Васильев Л. Л., Киселев В. Г., Матвеев Ю. Н., Молодкин Ф. Ф. Теплообменники-утилизаторы на тепловых трубах / Под ред. Л. И. Колыхана. Минск: Наука и техника, 1987- 200с.
29. Васильев, А.Н. Исследование возможности использования термопар в СВЧ-активной зоне / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, А.А. Васильев, Д.А. Филоненко // Электротехнологии и электрооборудование в сельскохозяйственном производстве: сб. науч. тр. / АЧГАА. – зерноград, 2007. – с. 82-85.
30. Вендин, С.В. Интегральная оценка температурного действия СВЧ обработки семян / С.В. Вендин // Техника в сельском хозяйстве. – 1995. - №3. – с. 103-107.
31. Гаврилова, Р.И. Исследование процесса сушки с переменными коэффициентами тепло- и массопереноса / Р.И. Гаврилова// Инженерно-физический журнал. Т. VII. №8. 1964. С. 37 - 42.
32. Гамаюнов Н.И., Ильченко Л.И. Закономерности внутреннего переноса влаги и структурообразования при сушке различных материалов// Хим. пром-ть. 1979. - № 6, – 348с.
33. Ганеев, И.Р. Выявление зависимости кинетики сушки от мощности СВЧ-излучения / И.Р. Ганеев, Ш.Ф. Файзрахманов // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «Ремонт. Восстановление. Реновация». – Уфа: ФГОУ ВПО «Башкирский ГАУ», 2011. – с. 95-96..

34. Гельперин Н. И., Айнштейн В. Г., Кваша В. Б. Основы техники псевдооживления. М., Химия, 1967. 664 с.
35. Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. М., Пищевая промышленность, 1973, - 528 с.
36. Гинзбург А. С. Некоторые современные проблемы теории и технологии сушки // Хим. пром-сть. 1979. - №6, - 328 –330 с.
37. Гинзбург А.С., Резчиков В.А. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое. Изд. «Пищевая пром.» - М. – 1966, – 196с.
38. Глухих В.Н. Аналитическое определение коэффициента усушки по ширине доски / В.Н. Глухих // Изв. ВУЗов «Лесной журнал». 1973 - № 4.
39. Гостеев Ю.А., Коробейников Ю.Г., Федоров А.В., Фоминых В.М. Экспериментальное определение влагопроводности образцов из сосны в продольном направлении при конвективной сушке. - Прикладная механика и техническая физика. 2003. Т. 44, N-о 3117-123 с.
40. Гринчик Н.Н., Гишкелюк И.А., Кундас С.П. Моделирование конвективной диффузии растворимых веществ в капиллярно-пористых средах при неизотермическом влагопереносе Тез. докл. VI Минского междунар. форума по тепло- и массообмену. Т.2. Минск. 2008. с. 190-192
41. Дан П. Д., Рей Д. А. Тепловые трубы: Пер. с англ. М.: Энергия, 1979.
42. Дмитриев В.М. Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление конвективной сушки гранулированных и пленочных полимерных материалов // Дис. ... докт. техн. наук. Тамбов.: ТГТУ. 2003. 460 с.
43. Дорняк О.Р., Шульман З.П. Математическое моделирование развития двумерных полей температуры и влагосодержания в древесине // Труды 5 Минского междунар. форума по тепло- и массообмену. 24–28 мая 2004. с.7-11
44. Дорохин, Р.В. Научное обеспечение процесса комбинированной СВЧ-конвективной сушки специй при импульсном энергоподводе / Р. В. Дорохин // диссертация канд. тех. наук, - Воронеж, 2013 - 162 с.

- 45.Ефремов Г., Марковски М., Бялобръзевски И. Макрокинетика процессов сушки. М.: Изд. МГОУ, 2009. 335 с.
- 46.Казарцев, Д.А. Совершенствование процесса сушки семян кориандра в аппарате с СВЧ-энергоподводом: дис. ...канд. техн. наук.: 05.18.12 / Д.А. Казарцев. – Воронеж, 2004. – 147 с.
- 47.Калашников, Г. В. Кинетика СВЧ-сушки яблок [Текст] / Г. В. Калашников, Е.В. Литвинов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. - 2012. - № 2. - С. 40-42.
- 48.Клоков, Ю.В. Теория удаления влаги.О нагреве пищевых продуктов в ЭМП СВЧ «объемно». // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2003. - №7. – с.29-31.
- 49.Коломинова М.В. Технологические процессы лесозаготовительного производства: Учебное пособие / М.В. Коломинова. – Ухта: УГТУ, 2002. – 88с
- 50.Красухина Л.П. О рациональных режимах сушки березовых пиломатериалов в камерах периодического действия / Л.П. Красухина // Деревообрабатывающая промышленность. – 1988. – № 6. – С. 5 - 7.
- 51.Кречетов И.В. Сушка древесины./ Бриз. М., -1992.-449с.
- 52.Кришер О. Научные основы техники сушки. – М: Изд. иностранной литературы, 1961 -540 с.
- 53.Куталадзе С.С. Основы теории теплообмена. // Машгиз Л., - 1968,- 456с.
- 54.Куц П.С. Некоторые закономерности тепловлагообмена и приближенные методы расчета кинетики процесса сушки влажных материалов / П.С. Куц, А.И. Ольшанский // ИФЖ. – 1977 – Т. 32, № 6. – 1007 – 1014с.
- 55.Кучин, Л.Ф. Воздействие низкоэнергетическими СВЧ-полями на биологические объекты растениеводства / Л.Ф. Кучин // Использование СВЧэнергии в с.х. производстве: сб. науч. тр. / ВНИПТИМЭСХ. – зерноград, 1989. – 18-23 с. 57. Лебедев, П.Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки / П.Д. Лебедев. – М.: «Энергия», 1972. – 320 с.

56. Лебедев П. Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки. Учебник для студентов технических вузов. Изд. 2-е, перераб. М., «Энергия», 1972- 320с.
57. Лебедев П.Д. Сушка инфракрасными лучами. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1955- 232 с.
58. Лебедев, П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок / П.Д. Лебедев. – М.: -Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 320 с.
59. Левин Д.М. Термодинамическая теория и расчет сушильных установок пищевой промышленности: Автореферат дис.канд.техн.наук.-Москва, 1958-15с.
60. Логинов Л.И. Численное интегрирование системы уравнений тепломассообмена с помощью неявных формул / Л.И. Логинов, П.П. Юшков// Инженерно-физический журнал. Т. III. №10. 1960. С. 93 - 108.
61. Лупашко А., Дикусар Г., Настас О. Кинетика сушки абрикос с использованием токов СВЧ. // Электронная обработка материалов.- 1999.-№2.- с.46-49.
62. Лупашко А.С., Дикусар Г.К., Лупу О.Ф. Кинетика сушки ядер абрикос с использованием ТВЧ. Технический университет Молдовы, Бул. Штефана чел Маре, 168, MD-2004, г. Кишинев, Республика Молдова.
63. Лурье М.Ю. Сушильное дело. Общий курс. 2-е, перераб. изд. — М.: Госэнергоиздат, 1938. — 384 с.
64. Лыков А. В. Тепло – массообмен в процессах сушки. Госэнергоиздат, 1956, - 464с.
65. Лыков А.В. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов / А.В. Лыков, П.С. Куц, А.И. Ольшанский // ИФЖ. – 1972. – Т. 23, № 3. – 401 – 406с.
66. Лыков А.В. О предельных переходах системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса / А.В. Лыков// Инженерно-физический журнал. 1973. Т. XXIV. №1. С. 152 - 155.

67. Лыков А.В. О системах дифференциальных уравнений теплопереноса в капиллярно-пористых телах / А.В. Лыков // Инженерно-физический журнал. 1974. Т. XXVI. №1. С. 18 - 25.
68. Лыков А.В. Сушка в химической промышленности. М. Издательство «Химия», 1970 - 432 с.
69. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
70. Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М.: Госэнергоиздат. – 1963. – 535 с.
71. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967- 600с.
72. Максименко Ю. А. Термодинамика внутреннего массопереноса при взаимодействии плодоовощных продуктов с водой // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. – 2012. – №1 (53). – с. 41–45.
73. Маслов В. П. Асимптотические методы и теория возмущений. М.: Наука, 1988. 312 с.
74. Микроволновая сушильная установка «Бархан» [Электронный ресурс]: [http://www.rs-agroprom.ru/trade/offer/offer\\_576.html](http://www.rs-agroprom.ru/trade/offer/offer_576.html)
75. Минин В.Е. Воздухонагреватели для систем вентиляции и кондиционирования воздуха. – М.: Стройиздат 1976- 199с.
76. Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов. М.: Химия, 1988. – 352 с.
77. Наумович В.М. Сушка торфа и сушильные установки брикетных заводов. – М.: Недра 1971- 280с.
78. Никитенко Н. И., Снежкин Ю. Ф., Сорокова Н. Н. Математическое моделирование теплопереноса, фазовых превращений и усадки с целью оптимизации процесса сушки термолабильных материалов // Инженерно-физический журнал. 2005. — Т. 78. — №1. - С. 74-88.
79. Никитин, Н. И. Химия древесины и целлюлозы / Н.И. Никитин. М.- Л.: Изд. АН СССР, 1962. - 630 с.
80. Огаркова Т.В. Влияние влаги на коэффициент усушки древесины / Т.В. Огаркова // Сушка древесины. – Архангельск. – 1968. – с. 201 – 206.

81. Ольшанский А.И. Некоторые закономерности кинетики влаготеплообмена при сушке влажных материалов / А.И. Ольшанский, Е.Ф. Макаренко, В.И. Ольшанский // ИФЖ. – 2008. – Т. 81, № 6. – 1102 – 1110с.
82. Гороховский А. Г. Технология сушки пиломатериалов на основе моделирования и оптимизации процессов тепломассопереноса в древесине: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.21.05 / А. Г. Гороховский. – Санкт-Петербург, 2008. – 274 с.
83. Павло К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи процессов и аппаратов химической технологии. Химия Л., 1969.-624 с.
84. Патаркан С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: пер. с англ. / С. Патанкар; под ред В.Д. Виоленского. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 124 с.
85. Патент на изобретение RU№2614428 Регенеративный воздухонагреватель / Е.Н. Ахмедьянова, С.Н. Редников, О. С. Пташкина-Гирина от 28.03.2017 г. ФГОУ ВО ЮУрГАУ.
86. 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.
87. Патент на полезную модель RU №202175 U1 Микроволновая печь для тепловой обработки сыпучих продуктов / Ахмедьянова Елена Наильевна, Ахмедьянова Карина Тагировна, Редникова Арина Сергеевна, Редникова Валерия Сергеевна, Редников Сергей Николаевич, Ахметов Данил Наильевич; правообладатель Ахмедьянова Е.Н. №2020222389; заявл. 26.03.2020 ; опубл. 05.02.2021.
88. Пен Р.З. Статистические моделирования и оптимизации процессов ЦБП / Р.З. Пен/ Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та. 1982.
89. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1976- 352с.

90. Пиевский И.М. и др. Сушка керамических стройматериалов пластического формования. Киев: Наукова думка, 1985- 142 с.
91. Пижурин А. А. Основы моделирования и оптимизации процессов деревообработки / А. А. Пижурин, М. С. Розенблит/ М.: Лесная промышленность, 1988.
92. Пинчевская Е.А. Оценка качества сушки пиломатериалов с учетом изменчивости свойств материала и среды / Е.А. Пинчевская// Деревообрабатывающая промышленность. 2008. №4. С. 9 - 12.
93. Поляков В. В., Скворцов Л. С. Насосы и вентиляторы: Учебник для вузов. - М.: Стройиз-дат., 1990. - 336 с.
94. Постановление Правительства Челябинской обл. «О Концепции промышленной политики Челябинской области на период до 2020 года» от 19 декабря 2012 года № 676-П. Режим доступа : [http://www. econom-chelreg.ru](http://www.econom-chelreg.ru).
95. Пташкина-Гирина О.С., Ахмедьянова Е.Н. Использование пеллет в системах теплоснабжения в Челябинской области. В сборнике: Достижения науки - агропромышленному производству ЛП Международная научно-техническая конференция. 2013. с. 231-233.
96. Пташкина-Гирина О.С., Ахмедьянова Е.Н., Редников С.Н. Особенности модернизации систем теплообеспечения сельских поселений челябинской области. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 4-2. с. 568-570.
97. Рабинович Г.Д., Слободкин Л.С., Куц П.С. Тепло- и массообмен в сушильных и термических процессах. Минск: Наука и техника, 1966. – 334 с.
98. Рахимов Р.С., Ахмедьянова Е.Н., Редников С.Н. Совершенствование конструкции регенеративного теплообменника. Международный технико-экономический журнал. 2018. №3. С.21-26.
99. Редников С.Н., Ахмедьянова Е.Н. Методы исследования свойств углеводов при давлениях свыше 150 МПа. В сборнике:

- Фундаментальные и прикладные проблемы науки: материалы VII Международного симпозиума. Т. 3 / РАН, Межрегиональный совет по науке и технологиям (МСНТ) .— Москва: РАН, 2012 .с. 49-54.
100. Рей Д., Макмайл Д. Тепловые насосы. /Изд. Энергоиздат. -1982. – 224 с.
101. Рудобашта С.П. Аналитический расчет процесса глубокой сушки гранулированных полимерных материалов в шахтных сушилках/ С.П. Рудобашта, В.М. Дмитриев, А.Н. Плановский// Хим. и нефтяное машиностроение. 1979. №4. С. 14–16.
102. Рудобашта С.П. Тепломассообмен в аппарате с кольцевым слоем зернистого материала/ С.П. Рудобашта, В.М. Дмитриев, Э.М. Карташов// Теор. основы хим. технол. 2002. Т. 36. №5. С. 1– 6.
103. Рудобашта, С.П. Комбинированная СВЧ-конвективная сушка зерна в псевдооживленном слое / С.П. Рудобашта, Е.Л. Бабичева, А.В. Балачев // Теоретические и практические основы расчета термической обработки пищевых продуктов: тезисы докладов научных чтений, посвящ. проф. А.М. Бражникову / Моск. гос. ун. приклад. биотех. – М.: 1997. – с. 55.
104. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. Архангельск: ЦНИИМОД, 1985- 137с.
105. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки пиломатериалов / Архангельск: ОАО «Научдревпром- ЦНИИМОД», 2000. – 125 с.
106. Сажин Б. С. Основы техники сушки. М.: Химия, 1984- 320 с.
107. Серговский П.С. О рациональных режимах сушки пиломатериалов в воздушных камерах периодического действия / П.С. Серговский// Деревообрабатывающая промышленность. 1969. №2. С. 1 – 4.; №3.1 – 4с
108. Слободкин А.С. Приближенный метод расчета кинетики прогрева влажного материала в кипящем слое при осциллирующем режиме. ИФЖ, №3, 1964,-93с.
109. Смирнов М.С. О системе дифференциальных уравнений процесса сушки / М.С. Смирнов// Инженерно-физический журнал. Т. IV. №9. С. 40 - 44.

- 110.Снежкин Ю.Ф., Боряк Л.А., Хавин А.А. Энергосберегающие теплотехнологии производства порошков из вторичных сырьевых ресурсов // К: Наукова думка, – 2004. –228 с.
- 111.Степанов В. И. Проектирование сушильных камер непрерывного действия: учеб.пособие для студентов специальности 26.02.00 всех форм обучения/ В. И. Степанов, Т.В. Ермолина, П. Е. Зубань, В. Ф. Ушанов. – Красноярск: СибГТУ, 2001. – 122 с. – ISBN 5-8173-0028-1.
- 112.Тепнадзе М. Оценка влияния термовлагопроводности на общий влагоперенос в древесине при осциллирующей сушке. *Annals of warsaw university of life sciences – sggw. Forestryandwoodtechnologyno* 76, 2011: 134-138 с.
- 113.Уголев Б.Н. Контроль напряжений при сушке древесины/ Б.Н. Уголев, Ю.Г. Лапшин, Е.В. Кротов. М.: Лесн. промсть. 1980. 206 с.
- 114.Федеральный закон "О качестве и безопасности пищевых продуктов"/ М.: Проспект, 2010.- 186 с.
- 115.Федяев А. А. Математическое моделирование динамики процессов тепловлажностной обработки капиллярно-пористых коллоидных дискретных материалов/ А. А. Федяев, В. Н. Федяева, Ю. В. Видин// Журнал Сибирского Федерального Университета. Энергетика и технологии. – 2008. – №1. – С. 68–75.
- 116.Филоненко Г.К., Лебедев П.Д. Сушильные установки. М.: Госэнергоиздат, 1952 – 262 с.
- 117.Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры: Учебник для теплоэнергетических специальностей вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 416 с.
- 118.Чижский А.Ф. Сушка керамических материалов и изделий. М.: Изд-во лит.по строительству, 1971- 176 с.
- 119.Шарков В.И. Технология гидролизных производств. /Учебник: В.И. Шарков, С.А. Сапотницкий, О.А. Дмитриева, И.Ф. Туманов. Лесная промышленность, 1973. 550 с.

120. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М. Изд-во «Мир». 1972.
121. Шервуд Т. Сушка твердых тел. М.: Гослесиздат, 1935- 64 с.
122. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины / Г.С Шубин. – М.: Лесная промышленность, 1990. - 336 с.
123. Шубин, Г.С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины / Г.С. Шубин. – М., 1973. – 248 с
124. Щванская, И.А. Сушка семян масленичных культур с использованием СВЧ-нагрева / И.А. Щванская // Техника и оборудование для села. – 2003. - №8. – с.18-19.
125. Юрова И.С. Тепло - и массообмен при сушке семян расторопши в вихревой камере с СВЧ - энергоподводом [Текст] / И.С. Юрова, И.Т. Кретов, А.В. Журавлев, Д.А. Казарцев; Воронеж, гос. ун-т. инж. технол. - Воронеж: ВГУИТ, 2012.-192 с.
126. Юшков П.П. О численном интегрировании уравнения теплопроводности в случае, когда термические коэффициенты зависят от температуры / П.П. Юшков// Инженерно-физический журнал. Т. I. №9. 1958. С. 102 - 108.

**Список литературы на иностранном языке:**

127. Anilkumar S. M., Arun S. Mujumdar. Drying of Solids: Principles, Classification, and Selection of Dryers // Drying 94: proceedings of the 9th International Drying Symposium (IDS '94). Gold Coast, Australia, 1994. August 1-4.
128. Balchen J. G., Kenneth I. M. Process control: structures and applications. New York: Van Nostrand Reinhold company, cop. 1988. 540 p.
129. Brambilla A., Nardini, G., Stabert Z. Dynamic model of rotary dryer // 2 nd symposium on the use of computers in chemical engineering. Tchekhoslovakia, 1973. Vol. II. P. 218-231.
130. DeVries D. A. Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Media // Transactions, American Geophysical Union. V. 39, No. 25. October, 1958. Glaser H.// Kéaltetechnik. 1958. H. 3. S. 86.

131. Mathematical modeling and apparatus arrangements of deep drying process disperse polymers 12-th International Congress of Chemical and Process Engineering / S.P. Rudobashta, V.M. Dmitriev, G.S. Kormiltsin, L. Ya. Rudobashta // CHISA-96, Praha, Czech Republik, August, 1996. Heat Transfer Processes and Equipment Drying and Food Engineering.
132. Mathematical modeling and apparatus of deep drying process disperse polymers / S.P. Rudobashta, V.M. Dmitriev, G.S. Kormiltsin, L. Ya. Rudobashta // Drying Technology – An international Journal. Neu York, Dekker. 1998. Vol. 16. N 7. P. 1471–1485.
133. Optimal designing of the process and apparatus with flowing streams for the granular materials drying 11-th International Drying Symposium (IDS-98) / S.I. Dvo-retsky, V.M. Dmitriev, G.S. Kormiltsin, A.V. Klimchikov. Halkidiki, Greece. 1998. Vol. A. P. 464–471.
134. Philip J. R., de Vries D. A. Moisture Movements in Porous Materials under Temperature Gradient // Transactions, American Geophysical Union. 1957. V. 38. P. 222.
135. Pitukhin E. A. Optimal Design of the Control System Elements Admissions // Proceedings of TOOLMET'97 - Tool Environment and Development Methods for Intelligent Systems / University of Oulu. Control Engineering Laboratory, Report A. No April 1997.
136. Yliniemi L. Advanced Control of a Rotary Dryer / Oulun Yliopisto. Oulu, 1999.
137. Yliniemi L., Arola A., Jutila E., Leiviskä K. Modelling and Simulation of a Pilot-Plant Rotary Drier // Proceedings of Process Engineering Department / University of Oulu. Oulu, 1980.

**Ресурсы Internet (в том числе на иностранном языке)**

138. «Бизон» Режим доступа: <http://www.spnx.supportinfo@spnx.ru>
139. «Бютнер», email: [info@rexroth.pro](mailto:info@rexroth.pro), [sales@vladogu.ru](mailto:sales@vladogu.ru),: [info@ladogaprof.ru](mailto:info@ladogaprof.ru)
140. «ПИК -Прогресс», [mail@kosmotronika.ru](mailto:mail@kosmotronika.ru)
141. Siemens S200, S300 Режим доступа: <http://www.siemens.a-k-c.su>

142. АВМ фирмы «Перес» - 3-х ходовые. Режим доступа. <http://www.>
143. Государственный комитет «Единый тарифный орган Челябинской области». Режим доступа: <http://www.tarif74.ru>.
144. КСМ 2-050 Режим доступа: <http://www.zapadpribor.com>
145. ТРМ 151 ОВЕН Режим доступа: <http://www.souz-pribor.ru>
146. ТС 1797 Режим доступа <http://www.mirasu.ru>
147. ЭРА-М Режим доступа <http://www.robototehnika.ru>
148. Критерий Стюдента, Фишера. Режим доступа:  
<http://www.chemstat.com.ru>

## Приложения

## Приложения А

Таблица 1.1 – Верификация результатов расчетов

Температура, °С	Влажность , %	Термодиффузионный коэффициент, %	Среднеарифметический термодиффузионный коэффициент, %
40	26	1,75	2
		1,49	
		2,00	
		2,43	
		2,22	
		1,51	
		1,57	
		2,03	
		2,45	
		2,26	
40	32	2,75	3
		2,99	
		3,00	
		3,47	
		3,22	
		3,11	
		3,04	
		3,03	
		3,35	
		3,26	
40	41	3,83	4
		3,89	
		4,02	
		4,17	
		4,36	
		4,21	
		4,14	
		4,12	
		3,79	
		4,16	
40	52	4,81	5

		4,34	
		5,39	
		5,13	
		4,90	
		4,85	
		4,36	
		5,34	
		5,11	
		4,95	
40	65	5,71	6
		5,74	
		6,39	
		5,93	
		5,90	
		5,85	
		6,36	
		5,95	
		6,00	
		5,95	
40	85	6,75	6,7
		6,81	
		6,78	
		6,65	
		6,50	
		6,47	
		6,83	
		6,59	
		6,67	
		6,71	
40	100	5,65	5,6
		5,71	
		5,46	
		5,45	
		5,63	
		5,77	
		5,55	
		5,61	
		5,62	
		5,56	

Продолжение таблицы – 2.1

Температура, °С	Влажность , %	Термодиффузионный коэффициент, %	Среднеарифметический термодиффузионный коэффициент, %
		5,65	
		5,71	
		5,46	
		5,45	
		5,63	
		5,77	
		5,55	
		5,61	
		5,62	
		5,56	
40	125	3,09	3
		2,78	
		2,87	
		2,93	
		3,21	
		3,02	
		2,97	
		3,03	
		3,01	
		2,89	
70	10	0,97	1
		0,78	
		1,01	
		1,12	
		1,02	
		1,11	
		0,99	
		0,89	
		1,05	
		1,07	
70	25	2,03	2
		2,05	
		2,01	
		1,97	
		1,89	
		1,99	
		2,03	
		2,03	
		2,07	

		2,00	
70	36	2,97	3
		2,88	
		3,01	
		3,10	
		3,05	
		2,87	
		3,20	
		3,03	
		2,95	
		3,03	
		70	
37,20			
36,59			
37,13			
37,15			
37,21			
36,47			
37,01			
36,60			
36,90			

Продолжение таблицы – 2.1

Температура, °С	Влажность , %	Термодиффузионный коэффициент, %	Среднеарифметический термодиффузионный коэффициент, %
70	60	38,01	38
		38,01	
		37,70	
		37,80	
		37,98	
		37,99	
		38,01	
		38,35	
		38,23	
		38,16	
70	77	2,97	3
		2,87	
		3,01	
		3,12	
		3,05	
		3,21	
		2,78	
		2,98	
		3,34	
		3,05	
70	93	2,23	2
		1,98	
		1,87	
		2,12	
		2,01	
		1,81	
		1,99	
		2,01	
		2,19	
		2,08	
70	100	1,24	1,4
		1,37	
		1,56	
		1,43	
		1,57	
		1,37	
		1,29	
		1,39	
		1,44	

		1,40	
100	10	1,12	1
		0,98	
		0,87	
		1,21	
		0,78	
		1,03	
		1,12	
		0,99	
		1,05	
		1,07	

Продолжение таблицы – 2.1

Температура, °С	Влажность , %	Термодиффузионный коэффициент, %	Среднеарифметический термодиффузионный коэффициент, %
100	25	2,12	2
		2,23	
		1,87	
		1,98	
		1,99	
		2,01	
		2,05	
		2,02	
		2,04	
		2,01	
100	40	2,45	2,5
		2,65	
		2,54	
		2,37	
		2,48	
		2,45	
		2,47	
		2,45	
		2,56	
		2,50	
100	52	2,12	2
		1,95	
		1,87	
		2,23	
		2,02	
		2,17	
		1,76	
		1,98	
		1,90	
		2,02	
100	73	1,12	1
		1,04	
		0,88	
		0,78	
		1,23	
		1,03	
		0,99	
		0,96	
		1,07	
		1,09	

Приложение Б Трехмерное изображение влияние термодиффузионного коэффициента в зависимости от температуры и влажности

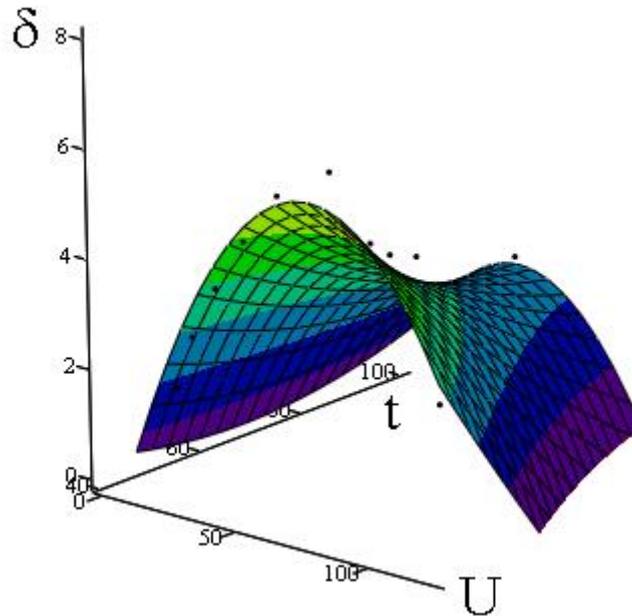


Рисунок 1. Зависимость термодиффузионного коэффициента.  $\delta$  – термодиффузионный коэффициент,  $T$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $U$  – влажность, %.

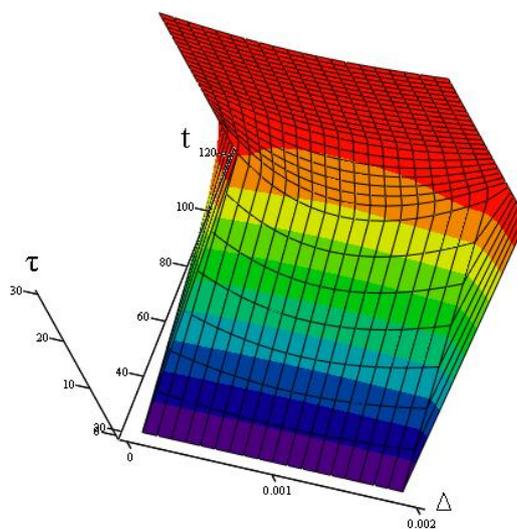


Рисунок 2 Поле температур в щеле для двухстороннего отвода влаги. На трехмерном изображении послойно видно концентрации влаги, снизу высокое

содержание влаги, когда происходит подвод горячего и холодного воздуха поочередно, видно послойное удаление влаги

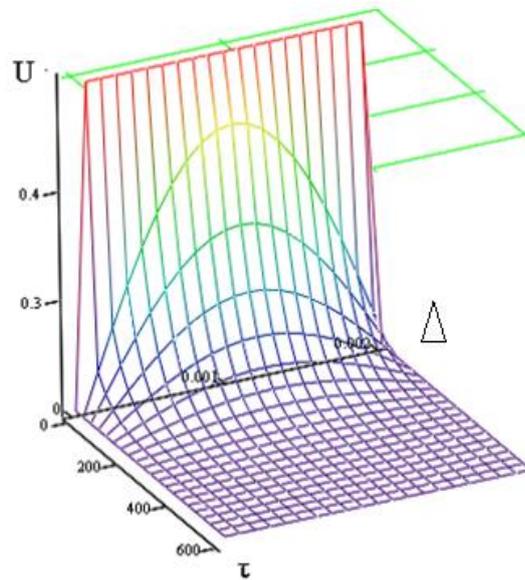


Рисунок 3 Трёхмерное представление полученной зависимости изменения влагосодержания.  $U$  – влагосодержание (%),  $\tau$  – время (с),  $\Delta$  – толщина (мм). Распределение в щеле влаги во временном промежутке.

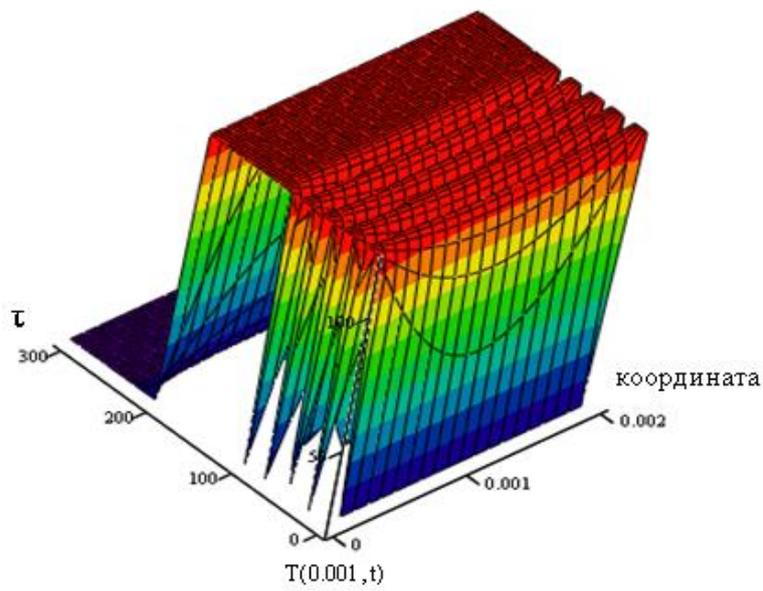


Рисунок 4 Трёхмерное представление поля температур в исследуемом объекте. Трёхмерное представление осциллирующего режима, где подвод горячего и холодного воздуха происходит поочередно.

## Приложение С



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
(ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ))

Проспект Ленина, 76, Челябинск, Россия 454080,  
Тел./факс (351)267-99-00, <http://www.susu.ru/>, e-mail: [info@susu.ru](mailto:info@susu.ru)  
ОКПО 02066724, ОГРН 1027403857568, ИНН/КПП 7453019764/745301001

№ \_\_\_\_\_

да № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Основные расчеты по научно-исследовательской работе аспирантки Ахмедьяновой Елены Наильевны, а именно компьютерное моделирование процессов, протекающих в вращающемся теплоутилизаторе выполнены с использованием лицензионного программного обеспечения ANSYS CFX и с использованием оборудования Суперкомпьютерного центра ЮУрГУ.

Проректор по информатизации

Л.Б. Соколинский

Бородулин К.В.  
+7(351)267-90-06

084990



Общество с ограниченной ответственностью  
«САН»

ИНН 6685020045, КПП 668501001, ОГРН 1126685027347,  
Р/сч. 40702810162080000594  
К/с 30101810900000000795  
Банк ОАО УБРиР г.Екатеринбург., БИК 046577795

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Разработки Ахмедьяновой Елены Наильевны

«26» мая 2017г.

Разработка Ахмедьяновой Елены Наильевны, а именно регенеративный теплоутилизатор сочетающий качества воздуходувки и теплообменника показал высокую эффективность и эксплуатационную надёжность. Преимущество разработки заключается в обеспечении экономии тепла в 7 кВт при расходах отсасываемого воздуха 120-130 кг/ч.ремонт.

Технический директор \_\_\_\_\_ / Степанов А.С. /





# ООО «ИРП»

ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБОТКИ ПРОИЗВОДСТВО

454010, Россия, г. Челябинск, ул. Енисейская д. 40, телефон: (351) 233-28-32, +7-919-319-74-74  
тел/факс: (351) 261-69-99 E-mail: [2332832@mail.ru](mailto:2332832@mail.ru)

Акт внедрения разработки Ахмедьяновой Е.Н.

17.11.2015г

Разработка Ахмедьяновой Е.Н., а именно установка для сушки щепы, использована в модульной системе по производству пеллет, эксплуатируемой в составе отопительного модуля Дома культуры посёлка Бердяуш Саткинского муниципального района Челябинской области.

Преимущество разработки заключается в повышении экономичности производства гранулированного топлива, обеспечивающего снижение расхода энергоносителей на 25 %. Установка имеет более 5000 часов безаварийной работы.

Технический директор



Ю.Ю. Полканов

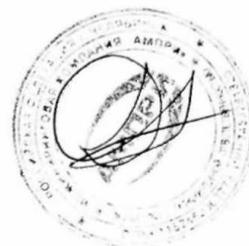
## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

разработки кафедры «Тепловодогазоснабжения сельского хозяйства» (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования - Институт агроинженерии ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет») автора Ахмедьяновой Е.Н.

«11» 03 2016 г

Разработка кафедры «Тепловодогазоснабжения сельского хозяйства», а именно сушильная камера для древесной щепы использована в комплексе технологического оборудования. Преимущество разработки заключается в снижении энергозатрат на производство готовой продукции на 17% что дало экономический эффект снижения затрат 450 рублей с тонны продукции.

Директор  
ООО Инжиниринговая Компания «АМПРИ»,  
к.т.н. Дурасов А.А.





Частное учреждение дополнительного профессионального образования  
**Международный институт технических инноваций**  
International institute of technical innovations  
620078, г. Екатеринбург, ул. Коминтерна 16, офис 412, тел. (343) 213-4-213,  
e-mail: [manager@iiti.ru](mailto:manager@iiti.ru), www: [iiti.ru](http://iiti.ru)

Исх. № 001/2016  
от 25.04.2016 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Разработки кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы»  
ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ)  
«25» апреля 2016г.

Сушильная установка разработанная аспирантом Южно-Уральского ГАУ Института агроинженерии, г. Челябинск, Ахмедьяновой Е.Н. под руководством к.т.н., доцента Пташкиной-Гириной О.С., испытана. Получены положительные результаты.

Настоящим актом подтверждаем, работоспособность установки. Сушильная установка принята в опытно-промышленную эксплуатацию в составе комплекса производства гранулированного топлива.

Расчетный экономический эффект от использования установки составляет 168 000 рублей в год за счет экономии на органическом топливе и электроэнергии.

С уважением,

Управляющий – ИП  
УДПО «МИТИ»



Н.С.Коршунова



Индивидуальный Предприниматель *Константинов Алексей Сергеевич*  
ИНН 667112410274; ОГРНИП 314667129000045; БИК 046577674; Кор/сч 30101810500000000674  
Р/сч 40802810616540007964 в Банке Уральский Банк ОАО "Сбербанк России" г. Екатеринбург  
г. Екатеринбург, ул. Чайковского 11, оф. 415 (БЦ «Чайковский»)

Исх. №02/05/17-01 от 02 июня 2017 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**  
**Разработки Ахмедьяновой Елены Наильевны.**

Настоящим подтверждаю: разработка Ахмедьяновой Елены Наильевны, а именно регенеративный теплоутилизатор, сочетающий в себе качества воздуходувки и теплообменника, показал высокую эффективность и эксплуатационную надёжность.

Преимущество разработки заключается в обеспечении экономии тепла в размере 7 кВт при расходах отсасываемого воздуха 120-130 кг/ч.

С Уважением, КОМАН Групп

Константинов А.С. \_\_\_\_\_



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11)**202 175**<sup>(13)</sup> **U1**(51) МПК  
H05B 6/64 (2006.01)  
F26B 3/347 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**(52) СПК  
H05B 6/64 (2020.08); F26B 3/347 (2020.08)

(21)(22) Заявка: 2020112389, 26.03.2020  
 (24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
 26.03.2020  
 Дата регистрации:  
 05.02.2021  
 Приоритет(ы):  
 (22) Дата подачи заявки: 26.03.2020  
 (45) Опубликовано: 05.02.2021 Бюл. № 4  
 Адрес для переписки:  
 454078, г. Челябинск, ул. Вагнера, 73, кв. 105,  
 Ахмедьянова Елена Наильевна

(72) Автор(ы):  
 Ахмедьянова Елена Наильевна (RU),  
 Ахмедьянова Карина Тагировна (RU),  
 Редникова Арина Сергеевна (RU),  
 Редникова Валерия Сергеевна (RU),  
 Редников Сергей Николаевич (RU),  
 Ахметов Данил Наильевич (RU)  
 (73) Патентообладатель(и):  
 Ахмедьянова Елена Наильевна (RU)  
 (56) Список документов, цитированных в отчете  
 о поиске: RU 2655756 C2, 29.05.2018. RU  
 2704192 C1, 24.10.2019. RU 48243 U1, 27.09.2005.  
 US 6035546 A1, 14.03.2000.

**(54) МИКРОВОЛНОВАЯ ПЕЧЬ ДЛЯ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ СЫПУЧИХ ПРОДУКТОВ**

(57) Реферат:  
 Полезная модель относится к оборудованию для тепловой обработки сыпучих продуктов (семян подсолнечника, орехов, зерна и т.п.). Технический результат, который может быть получен при использовании полезной модели, заключается в повышении надежности и экономичности микроволновой печи. Технический результат достигается за счет того, что в микроволновой печи, содержащей закрытую

кожухом камеру с микроволновыми генераторами, загрузочное устройство и разгрузочное устройство с клапаном выхода паровоздушной смеси, в камере печи установлена перфорированная диэлектрическая труба с жестко закрепленным внутри нее диэлектрическим перфорированным шнеком и соединенная с подшипниками скольжения, и имеющая привод вращения. 2 ил.

RU 202175 U1

RU 202175 U1

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 165396

**СУШИЛЬНАЯ УСТАНОВКА**Патентообладатель(ли): *Ахмедьянова Елена Наильевна (RU)*Автор(ы): *Ахмедьянова Елена Наильевна (RU), Редников Сергей Николаевич (RU), Пташкина-Гирина Ольга Степановна (RU), Ахметов Данил Наильевич (RU)*

Заявка № 2015144229

Приоритет полезной модели 14 октября 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 27 сентября 2016 г.

Срок действия патента истекает 14 октября 2025 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности
 Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2614428

## РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЬ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Южно-Уральский государственный аграрный университет" (ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ) Институт агроинженерии (RU)*

Авторы: *Ахмедьянова Елена Наильевна (RU), Редников Сергей Николаевич (RU), Пташккина-Гирина Ольга Степановна (RU)*

Заявка № 2015143954

Приоритет изобретения 13 октября 2015 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 28 марта 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 13 октября 2035 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиева