

На правах рукописи



ЖУРАВЛЕВ Алексей Владимирович

**НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И РАЗРАБОТКА
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ МАШИННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ В ЗАКРУЧЕННОМ
ПОТОКЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ
(теория, техника, управление)**

Специальность 05.18.12 – «Процессы и аппараты
пищевых производств»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Воронеж – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВО «ВГУИТ»)

Научный консультант – заслуженный изобретатель РФ,
доктор технических наук, профессор
Антипов Сергей Тихонович
(ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет инженерных технологий»)

Официальные оппоненты – **Пеленко Валерий Викторович**
доктор технических наук,
профессор, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный университет информационных
технологий, механики и оптики», заместитель директора
по учебной работе института холода и биотехнологий

Алексаия Игорь Юрьевич
доктор технических наук,
профессор, ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный
технический университет», заведующий кафедрой
«Технологические машины и оборудование»

Попов Виктор Михайлович
заслуженный работник высшей школы РФ,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»,
профессор кафедры «Электротехника, теплотехника
и гидравлика»

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования, Московская область

Защита состоится «23» июня 2016 года в 13 часов 30 мин на заседании диссертационного совета Д 212.035.01 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» по адресу: 394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19, конференц-зал.

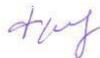
Отзывы на автореферат (в двух экземплярах), заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять в адрес диссертационного совета университета.

Автореферат размещен на сайтах Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <https://vak3.ed.gov.ru> и ФГБОУ ВО «ВГУИТ» <http://www.vsuet.ru> «22» марта 2016 г.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «ВГУИТ». Полный текст диссертации размещен в сети «Интернет» на официальном сайте ФГБОУ ВО «ВГУИТ» <http://www.vsuet.ru> «11» марта 2016 г.

Автореферат разослан «17» мая 2016 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций
на соискание ученой степени кандидата наук,
на соискание ученой степени доктора наук
Д 212.035.01



Л.Н. Фролова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для обеспечения динамичного устойчивого роста экономики России принципиально важным является переход к инновационному типу ее развития, формированию экономики, основанной на знаниях. Конкурентоспособность России на мировых рынках определяется темпами внедрения новейших научно-технических решений и развития наукоемких производств, эффективностью инновационных процессов. В современном мире широкое использование инноваций в хозяйственной деятельности становится одним из основных источников повышения конкурентоспособности и устойчивого экономического роста. Инновационное развитие агропромышленного комплекса, исходя из стратегии «Инновационная Россия - 2020», представляет собой такой тип экономического развития, основным фактором которого становятся инновации как конечный результат инновационной деятельности.

Стратегия развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации за период 2012-2020 гг. ставит задачу обеспечения устойчивого снабжения населения высококачественными продуктами питания в объемах и ассортименте, необходимых для формирования правильного, всесторонне сбалансированного рациона питания на уровне рекомендуемых физиологических норм потребления.

Процесс сушки является основной стадией многих технологических процессов в различных отраслях промышленности, определяющий в значительной степени показатели производства и качество готового продукта. Ресурсосбережение наряду с повышением интенсивности влагоотдачи рассматривается как важнейшая задача при разработке новой технологии сушки и конструкций сушилок, а также при совершенствовании существующих.

Значительный вклад в теорию сушки дисперсных материалов внесли такие ученые, как А.В. Лыков, П.А. Ребиндер, К.Г. Филоненко, П.Г. Романков, А.С. Гинзбург, В.И. Муштаев, В.М. Ульянов, Б.С. Сажин, Б.И. Леончик, И.Т. Кретов, С.Т. Антипов, А.Н. Остриков, А.А. Шевцов, В.Е. Куцакова, С.П. Рудобашта и многие другие.

Прогнозируемый согласно «Стратегии продовольственной безопасности России» рост объемов производства пищевых продуктов приведет к увеличению дефицита ресурсов. Поэтому проблема ресурсосбережения стоит очень остро и решается путем их экономного использования, это требует определенной перестройки во всех отраслях, а также широкого внедрения ресурсосберегающих техники и технологии.

Одним из перспективных направлений создания новой сушильной техники является разработка и внедрение в промышленность высокоинтенсивных аппаратов с закрученными потоками теплоносителя. Использование закрученных потоков теплоносителя, а также

комбинирование их с различными гидродинамическими режимами и СВЧ-энергоподводом позволяет интенсифицировать процесс сушки и расширить область применения сушильных аппаратов. Учитывая это, разработка ресурсосберегающих машинных технологий сушки дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя требует научного обоснования и представляет как теоретический интерес, так и практическую ценность.

Работа проводилась в соответствии с планом НИР кафедры машин и аппаратов пищевых производств ВГУИТ на 2011-2015 гг. «Адаптация пищевых машинных технологий к тепло- и массообменным процессам на основе диагностики техники и технологии пищевых производств»; государственного задания 2014/22; ОЦП Воронежской области «Развитие инновационной деятельности в промышленности Воронежской области на 2005-2008 гг.» государственный контракт № 23 «Исследование и разработка инновационной технологии переработки и утилизации основных отходов спиртового производства»; ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. государственный контракт № П2608 «Разработка ресурсосберегающей техники и технологии сушки сельскохозяйственных дисперсных продуктов во взвешенно-закрученном потоке теплоносителя» и государственный контракт № П459 «Разработка ресурсосберегающих технологий комплексной переработки сельскохозяйственного сырья»; приоритетного направления развития НОЦ ВГУИТ «Энергоресурс» «Разработка энергосберегающих технологий и оборудования пищевой и химической промышленности»; Стратегической программы исследований технологической платформы «Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК-продукты здорового питания» на 2014-2020 гг. «Разработка энергосберегающего оборудования пищевых и перерабатывающих производств АПК».

Цель и задачи диссертационной работы. Цель работы – развитие научно-теоретических основ ресурсосбережения в машинных технологиях сушки в аппаратах с закрученным потоком теплоносителя и разработка высокоэффективных сушилок, способов производства и управления технологическими системами, обеспечивающих повышение качества готового продукта.

Для достижения цели решались следующие **основные задачи**:

1. Разработать на основании системного подхода научную концепцию создания ресурсосберегающих машинных технологий сушки дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя.

2. Провести системную оценку структурно-механических, теплофизических и электрофизических характеристик дисперсных продуктов как объектов сушки.

3. Разработать и экспериментально апробировать математические модели процесса сушки сферической частицы во взвешенно-закрученном слое,

цилиндрической частицы в закрученном потоке теплоносителя, сферической частицы в СВЧ-аппарате с закрученным потоком теплоносителя.

4. Разработать математические модели процесса движения твердой дисперсной частицы в криволинейном канале, движения дисперсной частицы в вихревой камере, распределения полей скоростей теплоносителя и частицы в цилиндроконической сушильной камере, тепло- и массообмена в процессе сушки с закрученным потоком теплоносителя.

5. Провести комплексные теоретические и экспериментальные исследования гидродинамических и кинетических закономерностей процессов сушки в закрученном потоке теплоносителя и определить рациональные интервалы изменения параметров процесса.

6. Разработать научно-практические подходы к ресурсосбережению в процессах сушки в закрученном потоке теплоносителя с возможностью оперативного поиска наилучшего варианта между качеством готового продукта и удельными затратами.

7. Разработать новые высокоинтенсивные конструкции сушильных установок с закрученными потоками теплоносителя, а также с применением СВЧ-энергоподвода.

8. Разработать программно-логические алгоритмы функционирования систем многоканального управления, обеспечивающих получение готовой продукции высокого качества при эффективном использовании материальных ресурсов.

9. Выполнить системное проектирование ресурсосберегающих машинных технологий комплексной переработки дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя.

10. Провести промышленную апробацию и коммерциализацию разработанных технических решений: высокоинтенсивных сушильных установок, способов производства и управления в закрученном потоке теплоносителя.

Научная концепция. Разработка и научное обеспечение подходов и методов ресурсосбережения в машинных технологиях сушки в аппаратах с закрученным потоком теплоносителя; создание высокоэффективных способов производства высушенных продуктов с соответствующим аппаратурным оформлением на основе анализа гидродинамических и кинетических закономерностей, математического моделирования и системного проектирования, обеспечивающих ресурсосбережение и высокое качество готового продукта.

Научные положения, выносимые на защиту:

– концептуальный подход к созданию ресурсосберегающих машинных технологий сушки дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя, включающий структуризацию процессов сушки в закрученном потоке теплоносителя, построение моделей и обоснование рациональных параметров методами математического моделирования;

– результаты теоретических и экспериментальных исследований структурно-механических, тепло- и электрофизических, гидродинамических и кинетических закономерностей тепломассообменных процессов сушки в закрученном потоке теплоносителя и их использование при проектировании высокоэффективных сушильных установок;

– комплекс алгоритмов и математических моделей, описывающих процессы сушки дисперсных продуктов в аппаратах с закрученным потоком теплоносителя;

– определение рациональных режимов процессов сушки, способствующих снижению удельных энергетических затрат, повышению производительности и качества готового продукта;

– обоснование принципов и методов интенсификации и создания инновационных высокоэффективных машинных технологий, оборудования и способов регулирования и управления процессом сушки в закрученном потоке теплоносителя, обеспечивающих получение готовой продукции высокого качества.

Научная новизна. Разработана совокупность научных положений, представляющих системный концептуальный подход к созданию высокоэффективных ресурсосберегающих машинных технологий сушки дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя, направленных на интенсификацию, сбережение и рациональное использование материальных ресурсов, что достигается моделированием и оптимизацией перспективных конструкций сушильных установок.

Выявлено влияние влажности и температуры на физико-механические, структурно-сорбционные, теплофизические и электрофизические свойства семян расторопши, амаранта, рапса, гречихи, дробины посевной зерновой барды, а также предложены математические уравнения, адекватно описывающие полученные экспериментальные зависимости.

Установлены основные зависимости гидродинамики взвешенно-закрученного слоя. Выявлены механизм и основные закономерности кинетики сушки семян расторопши, амаранта, рапса, гречихи и дробины посевной зерновой барды в закрученном потоке теплоносителя, нестационарность полей температуры и влагосодержания частиц продукта; определены численные значения и диапазон изменения основных кинетических характеристик; по результатам планирования экспериментов и статистической обработки экспериментальных данных установлено влияние различных факторов на кинетику процесса сушки, проведена теоретическая оптимизация сушильных установок и выявлены рациональные интервалы изменения параметров процесса.

Разработаны и экспериментально апробированы:

– математическая модель динамического изменения полей температуры и влагосодержания в условиях сопряженного тепломассообмена в

процессе сушки семян амаранта во взвешенно-закрученном слое, позволяющая проводить оценку скорости движения теплоносителя в цилиндрической области сушильного аппарата;

– математическая модель процесса сушки семян рапса в аппарате с закрученным потоком теплоносителя и СВЧ-энергоподводом, позволяющая проводить вычислительные эксперименты по определению нестационарных полей влагосодержания, температуры и давления с целью установления их структуры и взаимовлияния;

– математическая модель распределения полей скоростей теплоносителя и гречихи в цилиндроконической сушильной камере, позволяющая вычислить коэффициенты тепло- и массоотдачи от поверхности частицы к теплоносителю;

– математическая модель процесса сушки дробины послеспиртовой зерновой барды в аппарате с закрученным потоком теплоносителя в безразмерном критериальном виде, позволяющая производить инженерные расчеты по прогнозированию кинетики сушки.

Разработано математическое описание процесса движения дисперсного продукта в кольцевом канале вихревой камеры, устанавливающее связь между высотой кольцевого канала и минимальным расходом теплоносителя и определяющее момент уноса частицы из камеры после высушивания ее в электромагнитном поле СВЧ.

Разработаны конечно-разностные схемы для численного интегрирования уравнений диффузионно-фильтрационной модели А.В. Лыкова с сопряженными граничными условиями, с помощью которых получены динамические распределения полей температуры, влагосодержания и давления, позволяющие определить влияние их структуры на кинетику явлений переноса в процессах сушки в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ-энергоподводом.

Разработаны программно-логические алгоритмы функционирования систем управления технологическими параметрами процесса сушки в аппаратах с закрученными потоками теплоносителя с использованием микропроцессорной техники для обеспечения ресурсосбережения и высокого качества готовой продукции.

Практическая значимость работы. Комплексные теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в лабораторных и производственных условиях, результаты математического моделирования, а также анализ работы сушильного оборудования позволили разработать методологические подходы к созданию высокоэффективных способов сушки с соответствующим аппаратным оформлением (пат. РФ № 2263262, 2272230, 2301386, 2338981, 2362102, 2480693). Развита положения по ресурсосбережению, которые реализованы в разработанных аппаратах и способах (пат. РФ № 2290583, 2335717, 2340853, 2547345).

Определены и обоснованы рациональные технологические режимы процесса сушки семян амаранта, рапса, расторопши, гречихи и дробины послеспиртовой зерновой барды в закрученном потоке теплоносителя, а также с применением СВЧ-энергоподвода. Разработан комплекс экспериментальных стендов, действующих макетов, приборов и методик для исследования процессов интенсивного обезвоживания дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя.

Разработана программа для ЭВМ (свид. Роспатента о гос. регистрации № 2015615868) и программно-логические алгоритмы (пат. РФ № 2290583, 2547345, 2239138) функционирования систем, позволяющие обеспечить многоканальное многоуровневое управление и получать готовый продукт высокого качества за счет оптимизации технологических параметров процесса сушки дисперсного материала в закрученном потоке теплоносителя.

С целью повышения эффективности процесса сушки и обеспечения ресурсосбережения разработаны: способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов в вихревом режиме (пат. РФ № 2335717), способ автоматического управления процессом сушки полидисперсных материалов во взвешенно-закрученном слое (пат. РФ № 2340853), способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ-энергоподводом (пат. РФ № 2547345), способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов с рециркуляцией теплоносителя в аппаратах с активной гидродинамикой (пат. РФ № 2350866).

Проведен эксергетический анализ процесса сушки в закрученном потоке, свидетельствующий о термодинамическом совершенстве разработанных способов производства. Выполнены расчеты и разработана конструкторская документация на сушилки со взвешенно-закрученным слоем ВСЖ-300, ВСЖ-1000 (пат. РФ № 2338981).

Разработаны ресурсосберегающие машинные технологии комплексной переработки объектов исследования: технологическая линия белково-витаминного кормопродукта из послеспиртовой зерновой барды (пат. РФ № 2307155), способ безотходной переработки семян амаранта и технологическая линия для его осуществления (пат. РФ № 2426773), технологическая линия безотходной переработки семян рапса (пат. РФ № 2494141); проведено их системное проектирование.

Проданы лицензии (договоры № РД 0065317 от 03.06.2010 г., № РД 0076125 от 04.02.2011 г., № РД 0068245 от 10.08.2010 г., № РД 0119399 от 21.02.2013 г., Л.Д. № 27/10 «НОУ-ХАУ» от 20.08.2010 г.) на право использования интеллектуальной собственности предприятиями ООО «Авангард», ООО «Тигровый орех», ООО «Кормопродукт», ООО «Энергия Природы», ООО «Техинмаш» по патентам РФ на изобретения № 2312280, 2327095, 2338981, 2425311.

Полученные результаты используются в учебном процессе в качестве материалов курсового и дипломного проектирования.

Апробация работы. Материалы и отдельные результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались на международных, всероссийских, межрегиональных научных, научно-технических и научно-практических конференциях, симпозиумах и семинарах: (Новочеркасск, 2005), (Калининград, 2006), (Казань, 2006), (Тамбов, 2008), (Воронеж, 2004, 2012, 2013, 2014, 2015), (Москва, 2013, 2014, 2015), (Прага, 2014), (Уфа, 2014), (Пенза, 2015) и на отчетных научных конференциях ВГУИТ (Воронеж, 2003 – 2016).

Результаты работы демонстрировались на международных, всероссийских, межрегиональных, региональных выставках: «ПРОДТОРГ» (Воронеж, 2004, 2005, 2008), «РОСПРОМЭКСПО» (Воронеж, 2005), «ИННОВ-2005» (Новочеркасск, 2005), «Малый бизнес - опора экономики» (Воронеж, 2007), «Воронежский Промышленный Форум» (Воронеж, 2008, 2009), «Агропромышленная выставка «Золотая осень» (Москва, 2008), «Агропром» (Воронеж, 2009, 2010), «ВОРОНЕЖАГРО» (Воронеж, 2009), «Воронежский Агропромышленный Форум» (Воронеж, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012), по итогам которых работа награждена дипломами и медалями.

За большой вклад в развитие науки и образования губернатором Воронежской области объявлена благодарность (постановление администрации Воронежской области от 19.12.2007 № 1164). Автор является победителем конкурса научно-инновационных и бизнес-проектов среди студентов, аспирантов и работников учреждений высшего профессионального образования Воронежской области (приказ Департамента образования, науки и молодежной политики № 379 от 01.12.2009); награжден ведомственным знаком «Педагог-наставник лауреата премии по поддержке талантливой молодежи» (приказ Департамента образования, науки и молодежной политики № 369 от 22.12.2014). За многолетнюю плодотворную работу по развитию и совершенствованию учебного процесса, значительный вклад в дело подготовки квалифицированных специалистов объявлена благодарность Министерства образования и науки РФ (приказ Министерства образования и науки РФ № 474/к-н от 02.06.2015 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 120 работ, в том числе 4 монографии, 35 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, получен 21 патент РФ на изобретения и 1 свидетельство Роспатента о регистрации программ для ЭВМ

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав, основных выводов и результатов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 345 страницах машинописного текста, содержит 298 рисунков и 55 таблиц. Список литературы включает 252 наименования, в том числе 36 на иностранных языках. Приложения к диссертации представлены на 133 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении охарактеризовано современное состояние процессов сушки пищевых дисперсных продуктов, обоснована актуальность темы диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

В первой главе «Анализ развития приоритетных тенденций ресурсосбережения в машинных технологиях сушки дисперсных продуктов» систематизированы литературные данные о современном состоянии техники сушки дисперсных материалов, способах и аппаратах сушки дисперсных материалов в закрученном потоке теплоносителя; рассмотрены основные возможности совершенствования и интенсификации процесса сушки и создания высокоэффективного сушильного оборудования; уделено внимание гидродинамике и тепло- и массообмену при сушке влажных дисперсных продуктов в аппаратах с закрученным потоком теплоносителя; рассмотрено взаимодействие микроволновых электромагнитных полей с пищевыми продуктами. На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе «Комплексная оценка объектов сушки. Методики исследований» для научного обоснования рациональных методов обработки и оптимальных режимов процесса сушки, инженерного расчета процесса и аппаратов, а также создания современных систем автоматического управления была проведена системная оценка объектов исследования. Дана характеристика продуктов как объекта сушки, в качестве которого использованы семена амаранта, рапса, расторопши, гречихи и дробина послеспиртовой зерновой барды. Приводятся новые данные по физико-механическим, теплофизическим, электрофизическим свойствам. Обсуждаются результаты процесса термолиза методом дифференциально-термического анализа и интервалы температурных зон испарения влаги с различной формой и энергией связи влаги с материалом.

В третьей главе «Исследование гидродинамики и кинетики процесса сушки дробины послеспиртовой зерновой барды с закрученным потоком теплоносителя» приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований гидродинамики и кинетики процесса сушки дробины зерновой барды в закрученном потоке теплоносителя с использованием математических методов планирования экспериментов.

Исследование гидродинамики взвешенно-закрученного слоя дробины барды проводилось на экспериментальной установке в различных конически-цилиндрических камерах с углом при вершине конуса 15°, 20°, 25°, 30°, 35°. Характер движения продукта изучали с помощью кино съемок, фотографирования, а также визуального наблюдения, причем во всех случаях синхронно записывались гидравлические характеристики системы.

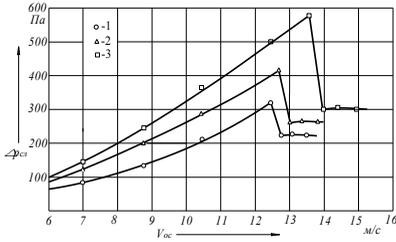


Рисунок 1 – Кривые псевдооживления осевым потоком воздуха в камере с углом при вершине конуса 25° : 1 – $75,7 \text{ кг/м}^2$; 2 – $113,6 \text{ кг/м}^2$; 3 – $151,4 \text{ кг/м}^2$

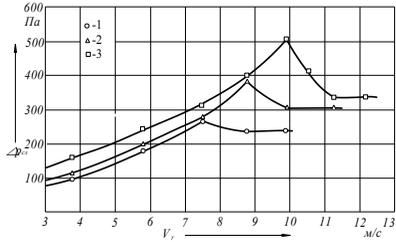


Рисунок 2 – Кривые псевдооживления тангенциальным потоком воздуха в камере с углом при вершине конуса 25° : 1 – $75,7 \text{ кг/м}^2$; 2 – $113,6 \text{ кг/м}^2$; 3 – $151,4 \text{ кг/м}^2$

В результате исследований гидродинамики (рисунок 1, 2, 3) были установлены скорости, перепады давления, удельная нагрузка позволяющие осуществить интенсивный взвешенно-закрученный слой в сушильном аппарате.

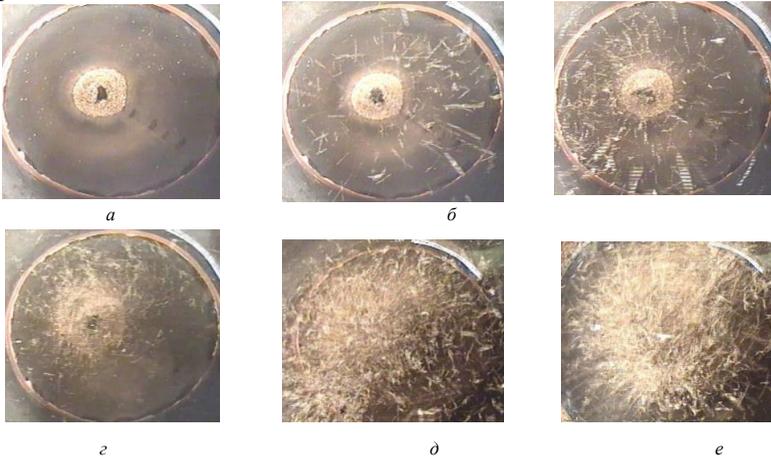


Рисунок 3 – Фотографии характерных стадий взвешенно-закрученного слоя дробины послеспиртовой зерновой барды: а – образование канала в слое; б – оживление в разбавленной фазе; в – начало разрушения канала; г – начало закручивания слоя; д, е – устойчивое взвешенно-закрученное состояние слоя при оживлении осевым и тангенциальным потоками теплоносителя

Исследовано влияние температуры теплоносителя, скорости тангенциального потока теплоносителя и угла при вершине конуса конической части сушильной камеры на кинетику процесса сушки дробины барды в аппарате с закрученным потоком теплоносителя. Так, из обработки экспериментальных данных (рисунок 4) следует, что при сушке наблюдается период прогрева, причем продолжительность его тем больше, чем ниже температура теплоносителя.

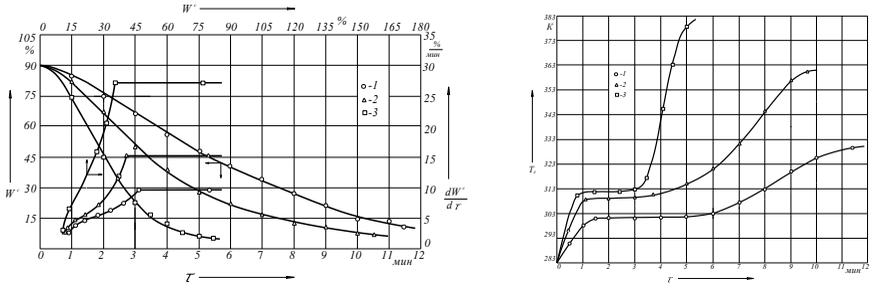


Рисунок 4 – Кривые сушки и скорости сушки, кривые нагрева дробины послеспиртовой зерновой барды при $W^e=90\%$, $V_i=10$ м/с, $V_{ac}=11,5$ м/с, $G_{уд}^K=6$ кг/м³, $\alpha = 25^\circ$:
 1 – $T_{ca}=333$ К; 2 – $T_{ca}=363$ К; 3 – $T_{ca}=393$ К

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающие процесс под влиянием исследуемых факторов. По регрессионным моделям были построены инженерные номограммы для определения режимных параметров процесса, а также поставлена и решена задача оптимизации. Определены рациональные параметры процесса сушки дробины барды: температура теплоносителя – 375...393 К; скорость тангенциального потока теплоносителя – 7,15...13,0 м/с; угол при вершине конуса конической части сушильной камеры – 24...27°.

Разработана математическая модель теплопереноса в процессе сушки цилиндрической частицы (рисунок 5) в закрученном потоке теплоносителя и ее численное решение. Установлено, что гидродинамические, тепло- и массообменные поля имеют однородную структуру или хотя бы близкую к ней. В связи с этим кинетика процесса сушки рассматривается на микроуровне, т. е. в рамках одной частицы. В основу модели положены уравнения линейной термодинамики для капиллярно-пористых тел А.В. Лыкова:

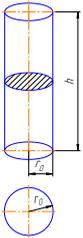


Рисунок 5 –
 Физическая
 модель
 частицы

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + a_m \delta \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{r \cdot \varepsilon}{c} a_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \left(a_q + \frac{\varepsilon \cdot r}{c} a_m \delta \right) \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right). \quad (2)$$

В начальный момент времени температура и влагосодержание равномерны по координатам:

$$t(r,0) = t_0; \quad u(r,0) = u_0. \quad (3)$$

На оси симметрии предполагается отсутствие переноса тепла и влаги:

$$\frac{\partial t(0,\tau)}{\partial r} = \frac{\partial u(0,\tau)}{\partial r} = 0. \quad (4)$$

На внешней границе сформулированы сопряженные условия тепло-массообмена в виде:

$$-\lambda_q \frac{\partial t(r_0, \tau)}{\partial r} + \alpha_q [t_c - t(r_0, \tau)] - (1 - \varepsilon) r \alpha_m [u(r_0, \tau) - u_c] = 0, \quad (5)$$

$$\lambda_m \left[\frac{\partial u(r_0, \tau)}{\partial r} + \delta \frac{\partial t(r_0, \tau)}{\partial r} \right] + \alpha_m [u(r_0, \tau) - u_c] = 0. \quad (6)$$

С целью приведения теоретического и расчетного анализа, а также выяснения структуры критериального множества, от которого зависят искомые потенциалы процесса, приведем математическую модель к безразмерному виду:

$$\frac{\partial U}{\partial Fo} = Lu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial R} \right) + Lu Pn \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} \right); \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial Fo} = \frac{Fe \cdot Lu}{Pn} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial R} \right) + (1 + Fe \cdot Lu) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} \right); \quad (8)$$

$$T(R, 0) = 0; U(R, 0) = 0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial T(0, Fo)}{\partial R} = \frac{\partial U(0, Fo)}{\partial R} = 0; \quad (10)$$

$$-\frac{\partial T(1, Fo)}{\partial R} + Bi_q [1 + T(1, Fo)] - (1 - \varepsilon) Bi_m \cdot Ko \cdot Lu [U(1, Fo) - 1] = 0; \quad (11)$$

$$-\frac{\partial U(1, Fo)}{\partial R} + Pn \frac{\partial T(1, Fo)}{\partial R} + Bi_m [U(1, Fo) - 1] = 0. \quad (12)$$

Математическая модель представлена в безразмерном критериальном виде, ее решение получено численно, с применением конечно-разностных технологий. Решение позволяет производить инженерные расчеты по прогнозированию кинетики сушки в аппаратах с закрученными потоками теплоносителя. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных на примере сушки дробины послеспиртовой зерновой барды показал хорошую сходимость: отклонение расчетных от экспериментальных данных не превышало 13,8 % (рисунок 6).

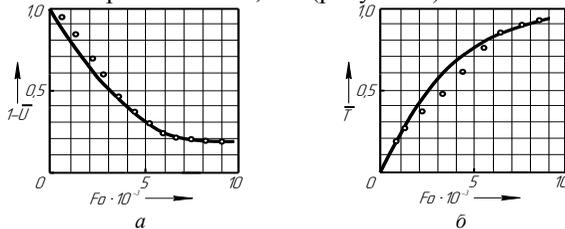


Рисунок 6 – Кинетика процесса сушки послеспиртовой зерновой барды в аппарате с закрученным потоком теплоносителя: а – сравнение расчетной (—) и экспериментальной (o) кривой процесса сушки; б – сравнение расчетной (—) и экспериментальной (o) термограммы сушки

Проведены исследования комплексной оценки качества дробины послеспиртовой зерновой барды, высушенной во взвешенно-закрученном слое по органолептическим и физико-химическим показателям, а также по составу аминокислот и определению токсичности. Установлено, что послеспиртовая зерновая барда, высушенная в закрученном потоке, является экологически безопасным кормопродуктом.

В четвертой главе «Теоретические и экспериментальные исследования процесса сушки семян амаранта в аппарате со взвешенно-закрученным слоем» представлены результаты исследований гидродинамических и кинетических закономерностей процесса сушки семян амаранта во взвешенно-закрученном слое с использованием математических методов планирования эксперимента.

Исследование гидродинамики взвешенно-закрученного слоя семян амаранта проводилось на экспериментальной установке в цилиндроконической камере с углом при вершине конуса 25° . Исследовался переход слоя семян амаранта относительной влажностью 12...25 % во взвешенно-закрученное состояние под действием осевого и закручивающего потоков теплоносителя (при соотношении расходов осевого и общего потока воздуха $X=0...1$), имеющего температуру 293 К, при удельной нагрузке семян амаранта на газораспределительную решетку $s=106...177 \text{ кг/м}^2$. На рисунке 7 приведены кривые псевдоожождения, а на рисунке 8 представлены обобщенные гидродинамические зависимости во взвешенно-закрученного слоя семян амаранта. В результате исследований были установлены скорости, перепады давления, удельная нагрузка семян, позволяющие осуществить интенсивный взвешенно-закрученный слой в сушильном аппарате.

Исследование кинетики процесса проводилось в рамках центрального композиционного униформ-ротатабельного планирования, выбран полный факторный эксперимент типа 2^4 . Изучено влияние температуры теплоносителя T_{ca} , соотношения осевого и общего расходов теплоносителя X , угла отклонения закручивающего потока теплоносителя от тангенциального положения в вертикальной плоскости $\alpha_{в.п.}$, угла отклонения закручивающего потока теплоносителя от тангенциального положения в горизонтальной плоскости $\alpha_{г.п.}$ на кинетику сушки семян амаранта.

Влияние температуры теплоносителя на кинетику сушки и температуру нагрева семян амаранта в процессе сушки представлено на рисунках 9, 10. Повышение температуры теплоносителя интенсифицирует как внутреннюю диффузию влаги, так и испарение ее с поверхности семян амаранта. Установлено, что изменение угла отклонения приводит к значительному изменению гидродинамической обстановки в сушильной камере, оказывает существенное влияние на высоту взвешенно-закрученного слоя.

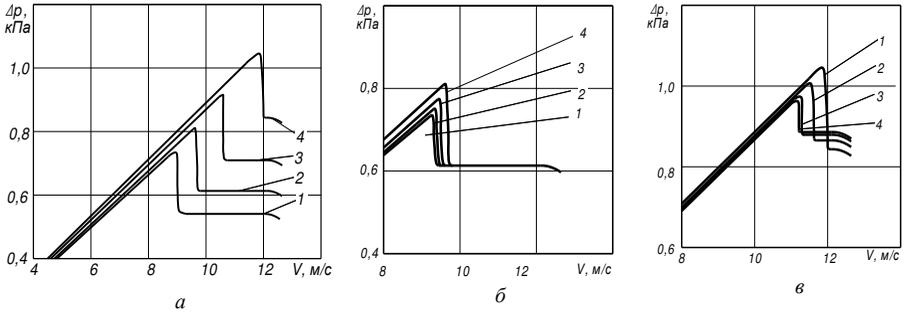


Рисунок 7 – Кривые псевдооживления слоя семян амаранта: а - при $W=25,00\%$, $X=1,0$: 1 - $s=106$ кг/м^3 ; 2 - $s=130$ кг/м^3 ; 3 - $s=153$ кг/м^3 ; 4 - $s=177$ кг/м^3 ; б - при $s=130$ кг/м^3 , $X=1,0$: 1 - $W=12,00\%$; 2 - $W=16,33\%$; 3 - $W=20,67\%$; 4 - $W=25,00\%$; в - при $W=25\%$, $s=177$ кг/м^3 : 1 - $X=1,0$; 2 - $X=0,75$; 3 - $X=0,5$; 4 - $X=0,25$

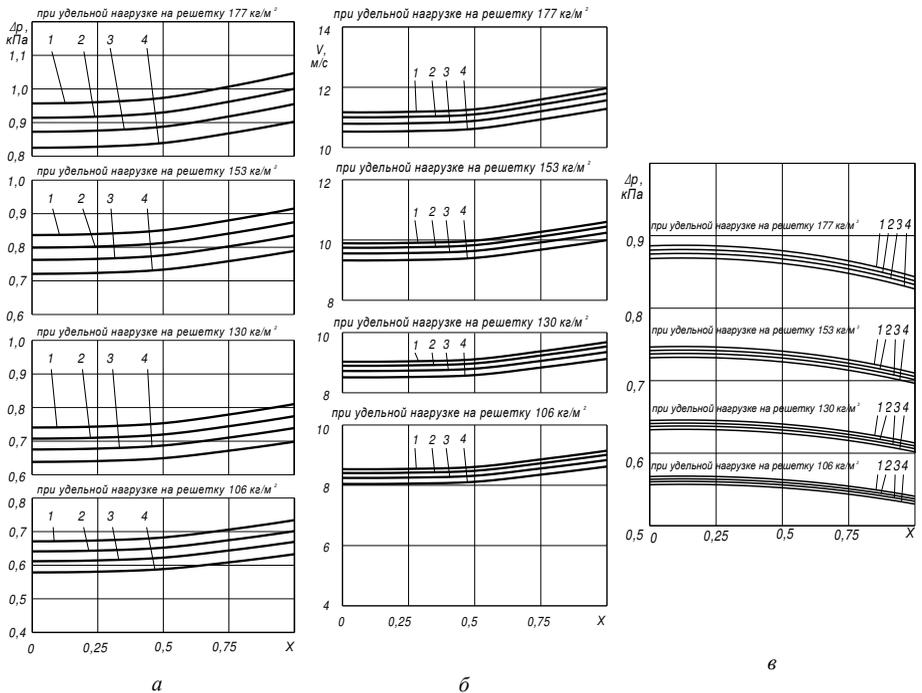


Рисунок 8 – Основные графические зависимости гидродинамики взвешенно-закрученного слоя семян амаранта: а - Зависимость давления псевдооживления слоя от соотношения потоков теплоносителя при: 1 - $W=25,00\%$, 2 - $W=20,67\%$, 3 - $W=16,33\%$, 4 - $W=12,00\%$; б - Зависимость минимальной скорости псевдооживления от соотношения потоков теплоносителя при: 1 - $W=25,00\%$, 2 - $W=20,67\%$, 3 - $W=16,33\%$, 4 - $W=12,00\%$; в - Зависимость рабочего давления псевдооживленного слоя от соотношения потоков теплоносителя при: 1 - $W=25,00\%$, 2 - $W=20,67\%$, 3 - $W=16,33\%$, 4 - $W=12,00\%$

Установлено, что изменение угла отклонения закручивающих потоков теплоносителя относительно тангенциального положения в вертикальной плоскости позволяет осуществлять регулирование влажности высушиваемого продукта на выходе из сушильной камеры, изменяя высоту взвешенно-закрученного слоя, а изменение угла отклонения закручивающих потоков теплоносителя относительно тангенциального положения в горизонтальной плоскости позволяет регулировать диаметр взвешенно-закрученного слоя без потери высоты, что использовано нами в разработке высокоэффективных сушильных установок и способов их автоматического управления.

В результате многофакторного статистического анализа процесса сушки семян амаранта получены: уравнения регрессии, адекватно описывающие процесс сушки под влиянием исследуемых факторов; инженерные номограммы для определения режимных параметров процесса и решена оптимизационная задача.

Получены рациональные режимы процесса: температура теплоносителя 343...353 К; соотношение осевого и общего расходов теплоносителя 0,42...0,45; угол отклонения закручивающего потока теплоносителя от тангенциального положения в вертикальной плоскости 3,7...10,6°, в горизонтальной плоскости 0,5...3,7°.

Разработана математическая модель процесса сушки сферической частицы во взвешенно-закрученном слое. На рисунке 11 представлена схема аппарата. Уравнения модели:

$$-\rho \frac{v_{\theta}^2}{r} = -\frac{\partial P}{\partial r}; \quad (13)$$

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \cdot v_{\theta}) \right] = 0; \quad (14)$$

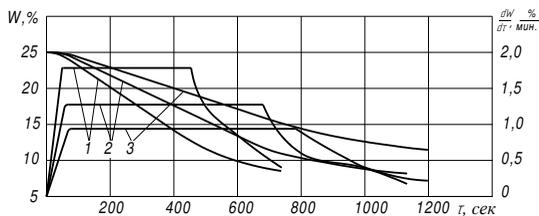


Рисунок 9 – Кривые сушки и скорости сушки семян амаранта при $X=0,5$; $\alpha_{в.н.}=22,5^\circ$; $\alpha_{г.н.}=15^\circ$;

1 – $T_{ca}=363$ К; 2 – $T_{ca}=343$ К; 3 – $T_{ca}=323$ К

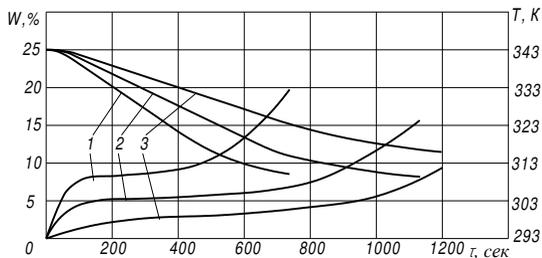


Рисунок 10 – Кривые нагрева семян амаранта при $X=0,5$; $\alpha_{в.н.}=22,5^\circ$; $\alpha_{г.н.}=15^\circ$;

1 – $T_{ca}=363$ К; 2 – $T_{ca}=343$ К; 3 – $T_{ca}=323$ К

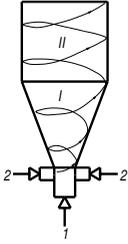


Рисунок 11 – Схема аппарата: 1 – осевая подача сушильного агента; 2 – симметричная подача закручивающего потока сушильного агента; I – конусная часть аппарата; II – цилиндрическая часть аппарата

$$\frac{\partial P}{\partial z} = 0; \quad (15)$$

Общее решение:

$$v_{\theta} = \omega_o (r / r_o), \quad (16)$$

где $\omega_o = G_o / (\rho \cdot S)$ – скорость тангенциального потока; G – массовый расход тангенциального потока; S – площадь поперечного сечения подающего патрубка; r_o – радиус поперечного сечения аппарата во входной части.

Из (16) следует среднее значение скорости в рабочей области аппарата:

$$\bar{v}_{\theta} = \frac{1}{2} \omega_o \frac{r_o}{r_1}, \quad (17)$$

где r_1 – радиус цилиндрической части.

Осевая составляющая скорости:

$$v_z' = G_n / (\rho \cdot S_1), \quad (18)$$

где G_n – массовый расход через осевой патрубок; S_1 – площадь поперечного сечения рабочей области.

Из (17) и (18) следует оценка скорости движения теплоносителя в цилиндрической области сушильного аппарата:

$$v = \sqrt{(0,5\omega_o r_o / r_1)^2 + [G_n / (\rho r_1^2)]^2}, \quad (19)$$

по которой рассчитываются локальные значения коэффициентов тепло- и массоотдачи. Процесс рассматривается для одиночной сферической частицы, затем с учетом суммирования итоговых потоков влаги для всех фракций находятся макрокинетические закономерности.

Уравнения полученной модели:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + (a_{m1}^T + a_{m2}^T) \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right); \quad (20)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{r^* \varepsilon}{c} a_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \left(a_q + \frac{\varepsilon r^*}{c} a_m \delta \right) \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right); \quad (21)$$

$$u(r, 0) = u_o, \quad t(r, 0) = t_o; \quad (22)$$

$$\frac{\partial u(0, \tau)}{\partial r} = \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial r} = 0; \quad (23)$$

$$-\lambda_q \frac{\partial t(r_o, \tau)}{\partial r} + \alpha_q [t_c - t(r_o, \tau)] - (1 - \varepsilon) r^* \alpha_m [u(r_o, \tau) - u_c] = 0. \quad (24)$$

Модель базируется на фундаментальных уравнениях А.В. Лыкова, описывает тепло-влажноперенос в капиллярно-пористых средах в линейном термодинамическом приближении, учитывая конвективный способ подвода теплоты и малые размеры высушиваемых частиц. Уравнения модели описывают динамическое изменение полей температуры и влагосодержания в условиях сопряженного тепло-массообмена на границе

«твердая фаза – теплоноситель». Кинетика сушки определяется коэффициентами тепло-массообмена на границе раздела фаз, которая зависит от скорости теплоносителя в рабочей зоне аппарата, вычисляемой в по формуле 19.

Уравнения модели в безразмерном виде:

$$\frac{\partial U}{\partial Fo} = Lu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial U}{\partial R} \right) + Lu Pn \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial T}{\partial R} \right); \quad (25)$$

$$\frac{\partial T}{\partial Fo} = \frac{Fe \cdot Lu}{Pn} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial U}{\partial R} \right) + (1 + Fe \cdot Lu) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} \right); \quad (26)$$

$$U(R, 0) = T(R, 0) = 0; \quad (27)$$

$$\frac{\partial U(0, Fo)}{\partial R} = \frac{\partial T(0, Fo)}{\partial R} = 0; \quad (28)$$

$$\frac{\partial U(1, Fo)}{\partial R} + Pn \frac{\partial T(1, Fo)}{\partial R} + Bi_m [U(1, Fo) - 1] = 0; \quad (29)$$

$$\frac{\partial T(1, Fo)}{\partial R} + Bi_q [1 - T(1, Fo)] - (1 - \varepsilon) Bi_m \cdot Ko \cdot Lu \cdot [U(1, Fo) - 1] = 0; \quad (30)$$

Система (25)-(30) решена численно с помощью конечно-разностного метода и апробирована на семенах амаранта. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о достаточном уровне сходимости: отклонение расчетных и экспериментальных кривых не превышает 14,2 % (рисунок 12).

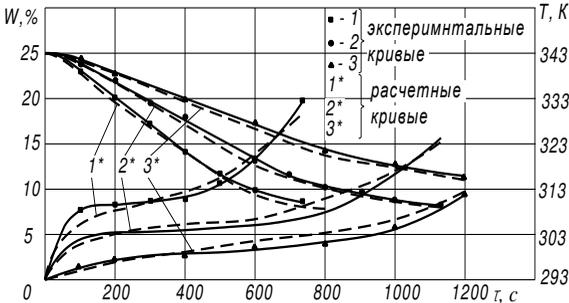


Рисунок 12 – Кинетика процесса сушки семян амаранта в аппарате во взвешено-закрученном слое при: $X=0,5$; $\alpha_{в.н.}=22,5^\circ$; $\alpha_{з.н.}=15^\circ$: 1 – $T_{ca}=363$ К; 2 – $T_{ca}=343$ К; 3 – $T_{ca}=323$ К

Проведена качественная оценка амарантового масла, полученного из семян, высушенных на экспериментальной установке при температуре теплоносителя 363 К. Полученные результаты подтверждают сохранение и улучшение качественных показателей амарантового масла на уровне, соответствующем ТР ТС 024/2011.

В пятой главе «Разработка научно-практических основ процесса СВЧ-сушки семян рапса в закрученном потоке теплоносителя» приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований кинетики процесса сушки семян рапса в СВЧ-аппарате с закрученным потоком теплоносителя с использованием математических методов планирования экспериментов.

Для постановки опытов было применено центральное композиционное равномер-ротатабельное планирование и выбран полный факторный эксперимент типа 2^3 . В качестве основных факторов, влияющих на процесс сушки, выбраны: начальное влагосодержание семян рапса W , температура T теплоносителя, подводимая СВЧ-мощность P . В ходе проведения предварительных испытаний экспериментальной установки был определен оптимальный интервал скоростей закрученного потока теплоносителя, который составил 35...40 м/с. Критерии оценки: удельные энергозатраты на килограмм испаренной влаги и напряжение объема сушильной камеры по испаренной влаге.

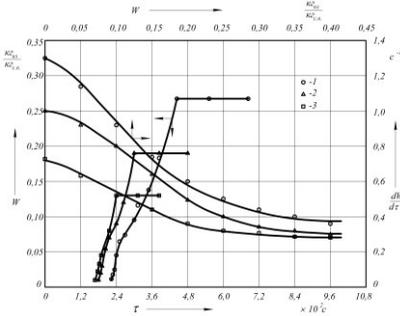


Рисунок 13 – Кривые сушки и скорости сушки семян рапса при $T=338$ К, $P_{уд}=525$ Вт/кг:
1 – $W=32$ %; 2 – $W=25$ %; 3 – $W=18$

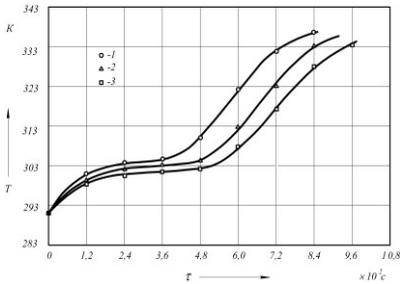


Рисунок 14 – Кривые нагрева семян рапса при $T=338$ К, $P_{уд}=525$ Вт/кг:
1 – $W=32$ %; 2 – $W=25$ %; 3 – $W=18$

Исследовано влияние основных факторов на кинетику сушки. Влияние начального влагосодержания семян рапса на кинетику сушки и температуру нагрева материала в процессе сушки представлено на рисунке 13, 14. Из графиков видно, что с ростом влагосодержания увеличивается величина критического влагосодержания и доля периода убывающей скорости сушки. Анализ температурных кривых (рисунок 14) показал, что увеличение начального влагосодержания приводит к повышению температуры продукта. Это связано с повышением коэффициента диэлектрических потерь ϵ'' с увеличением влагосодержания.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, по которым построены инженерные номограммы, а также поставлена и решена задача оптимизации. Для выходных параметров в качестве рациональных получены следующие интервалы значений: влагосодержание семян рапса – 23,3...31,6, температура теплоносителя – 333...355 К и подводимая СВЧ-мощность – 472...700 Вт.

Для определения нестационарных полей влагосодержания, температуры и давления с целью установления их структуры и взаимовлияния в процессе сушки сферической частицы рапса в СВЧ-аппарате с закрученным потоком теплоносителя разработана математическая модель при следующих допущениях: частицы имеют сферическую форму; потенциалы задачи по поверхности дисперсной

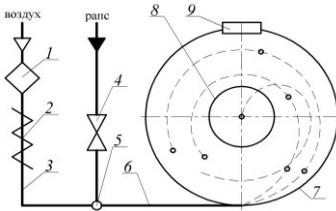


Рисунок 15 – Схема аппарата:
 1 – вентилятор; 2 – теплообменник;
 3 – воздухопровод; 4 – питатель регули-
 ровочный; 5 – смеситель; 6 – входной
 патрубок; 7 – камера сушильная; 8 –
 выходной патрубок;
 9 – СВЧ-излучатель

частицы распределены однородно в силу наличия гидродинамической структуры идеального перемешивания; процесс предполагается в силу однородности потенциалов осесимметричным. На рисунке 15 представлена расчетная схема аппарата.

Приближение гидродинамической обстановки в сушильной камере к режиму идеального перемешивания позволяет сформулировать массообменную задачу для одной дисперсной частицы и же применить упрощенные граничные условия. В основу математической модели положены уравнения А.В. Лыкова с сопряженными краевыми условиями и с объемно-распределенным источником теплоты q , имитирующим СВЧ-нагрев, представленные в безразмерном виде:

$$\frac{\partial U}{\partial Fo} = Lu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial U}{\partial R} \right) + Lu Pn \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial T}{\partial R} \right) + Lu Pn_p \left(\frac{\partial^2 P}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial P}{\partial R} \right); \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial Fo} = & \frac{Fe \cdot Lu}{Pn} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial U}{\partial R} \right) + (1 + Fe \cdot Lu) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial T}{\partial R} \right) + \\ & + \frac{Fe \cdot Lu \cdot Pn_p}{Pn} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial P}{\partial R} \right) + Q; \end{aligned} \quad (32)$$

$$\frac{\partial P}{\partial Fo} = -\varepsilon Lu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial U}{\partial R} \right) - \varepsilon Lu \cdot Pn_p \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial T}{\partial R} \right) + (Lu_p - \varepsilon Lu \cdot Pn_p) \left(\frac{\partial^2 P}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial P}{\partial R} \right). \quad (33)$$

Начальные условия принимали постоянными в зависимости от геометрической координаты:

$$U(R, 0) = 0, \quad T(R, 0) = 0, \quad P(R, 0) = 0. \quad (34)$$

Граничные условия при отсутствии переноса потенциала в точке симметрии:

$$\frac{\partial U(0, Fo)}{\partial R} = \frac{\partial T(0, Fo)}{\partial R} = \frac{\partial P(0, Fo)}{\partial R} = 0. \quad (35)$$

Упрощенные граничные условия:

$$U(1, Fo) = 1; \quad T(1, Fo) = 1; \quad P(1, Fo) = 0. \quad (36)$$

Система (31)-(36) решена численно с помощью конечно-разностного метода. Это решение позволяет производить инженерные расчеты по прогнозированию кинетики сушки сферической частицы в СВЧ-аппаратах с закрученными потоками теплоносителя. В целях установления влияния основных параметров модели проведены вычислительные эксперименты с семенами рапса. Определены нестационарные поля влагосодержания, температуры, давления и механизмы их взаимодействия.

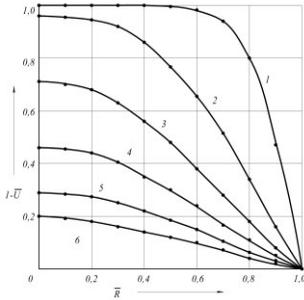


Рисунок 16 – Изменение влагосодержания по радиусу при различных значениях числа Фурье (Fo):
1 – 1; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 5; 5 – 20; 6 – 24

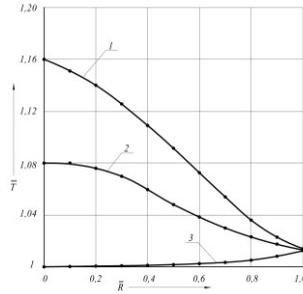


Рисунок 17 – Изменение температуры по радиусу при различных значениях числа Фурье (Fo):
1 – 1; 2 – 5; 3 – 24

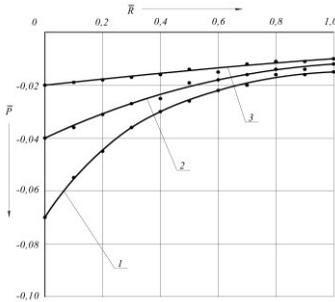


Рисунок 18 – Изменение давления по радиусу при различных значениях числа Фурье (Fo): 1 – 1; 2 – 2; 3 – 24

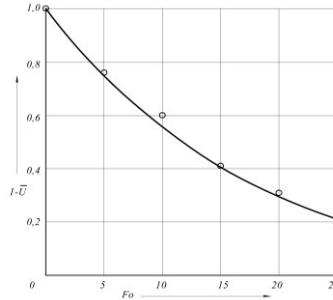


Рисунок 19 – Кинетика сушки семян рапса:
(—) – расчетная кривая; (o) – экспериментальные данные

Установлено (рисунок 16), что в начальный момент времени интенсивность влагоудаления максимальна, далее она снижается. Обратим внимание, что градиент влагосодержания всегда отрицателен. Отсутствует сопротивление диффузии влаги из центра к поверхности частицы. Температура при СВЧ-нагреве неоднородна в частице: к поверхности ниже, к центру она выше (рисунок 17). Это объясняется тем, что влажность в центре частицы выше и при испарении влаги с поверхности происходит охлаждение. Установлено, что градиенты температуры и влагосодержания направлены от центра в сторону поверхности и имеют один знак. При комбинированном СВЧ-энергоподводе высокая интенсивность испарения обуславливает организацию внутри частицы давления ниже атмосферного, что образует в рамках бародиффузии противоположный поток влаги с поверхности в центр частицы (рисунок 18). Сравнение полученных результатов машинного эксперимента с экспериментальными значениями (рисунок 19) свидетельствует о достаточной сходимости: отклонение не превышает 7,7 %.

Проведена комплексная оценка качества семян рапса. Установлено, что СВЧ-сушка в аппарате с закрученным потоком теплоносителя обеспечивает снижение кислотного и перекисного чисел рапсового масла, не влияет на суммарный состав аминокислот, а содержание витамина Е в семенах рапса, высушенных по предлагаемой технологии, несколько выше, что обеспечивает повышение антиоксидантной активности.

В шестой главе «Разработка способа сушки семян рапса в вихревой СВЧ-камере» приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса сушки семян рапса в вихревой камере с СВЧ-энергоподводом с использованием математических методов планирования эксперимента, сравнительного анализа качества семян рапса, математического моделирования гидродинамической обстановки в вихревой камере.

Особую роль в экспериментальной вихревой камере (Пат. № 2425311) играют направляющие вставки, которые закреплены таким образом, чтобы создать устойчивый вращающийся кольцевой слой высушиваемого материала, избежать оседания высушиваемых частиц в зоне максимального сопротивления потока теплоносителя и отделения высушенных частиц от общего вращающегося потока и направления их в центральную зону вихревой камеры (рисунок 20).

Вращение частиц в течение основного времени сушки происходит в пристенной зоне вихревой сушильной камеры, ограниченной направляющими вставками, позволяющими обеспечить локальное увеличение скорости потока в начале процесса и увеличить ее удерживающую способность. Затем более легкие подсушенные частицы смещаются к внутренней поверхности кольцевого канала, через окна между направляющими вставками выходят в центральную зону вихревой сушильной камеры, где продолжают вращение до полного высушивания и уноса через отводной патрубок. Минимальная (критическая) скорость теплоносителя, при которой происходит транспортирование твердых частиц в кольцевом канале без осаждения частиц в нем, определяется выражением:

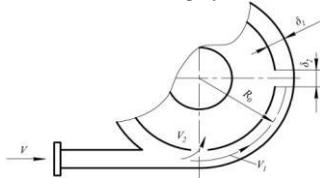


Рисунок 20 – Схема движения частиц в кольцевом канале

$$v_{кр.} = 7,1 \cdot \delta_1^{0,34} \cdot d_s^{0,36} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{0,5} \cdot m^{0,25}. \quad (37)$$

Из выражения (37) следует, что минимальная скорость потока теплоносителя $v_{кр.}$, обеспечивающая устойчивое движение частиц по каналу, уменьшается с уменьшением ширины канала δ_1 . С другой стороны, уменьшение величины δ_1 приводит к увеличению гидравлического сопротивления кольцевого канала и уменьшению расхода газа V_1 в нем. Существует оптимальное значение величины δ_1 , обеспечивающее устойчивое движение потока частиц при минимальном общем расходе теплоносителя V ,

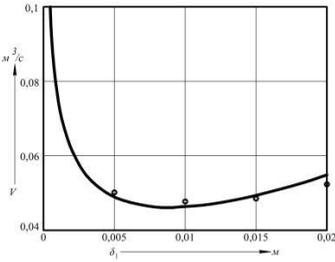


Рисунок 21 – График зависимости расхода теплоносителя V от ширины кольцевого канала δ_1

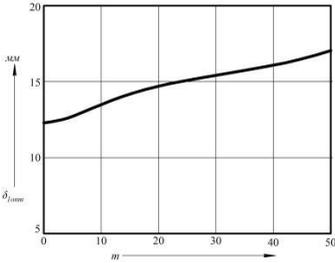


Рисунок 22 – График зависимости оптимальной ширины канала от коэффициента взвеси m

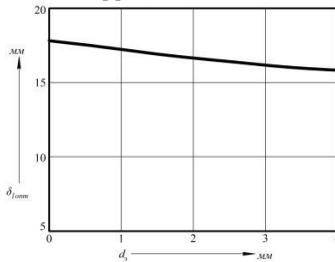


Рисунок 23 – График зависимости оптимальной ширины канала от диаметра частиц d_3

для нахождения которого по формуле (37) определяется критическая скорость газа.

На рисунке 21 представлена графическая зависимость общего расхода воздуха V от ширины канала δ_1 и различных значений ширины окна δ_2 . Влияние коэффициента взвеси m , диаметра частиц d_3 , на оптимальные значения ширины канала δ_1 проявляется слабо (рисунок 22, 23).

Траектория движения частицы в криволинейном канале будет определяться силой, действующей на частицу со стороны воздушного потока, центробежной силой инерции, а также условиями отражения частицы при соударении со стенками канала.

Уравнение движения частицы в проекциях на координаты оси имеет вид:

$$m \frac{dw_x}{d\tau} = \psi \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho}{2} \sqrt{(v-w_x)^2 + w_y^2} \cdot (v-w_x), \quad (38)$$

$$m \frac{dw_y}{d\tau} = \psi \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho}{2} \sqrt{(v-w_x)^2 + w_y^2} \cdot w_y + \frac{mw_x^2}{R_0}. \quad (39)$$

Начальные условия (для тангенциального ввода): $w_x(0) = w_x$, $w_y(0) = 0$. Отражение частицы при ударе о стенку канала полагаем зеркальным. В результате она теряет часть своей кинетической энергии за счет трения ее о стенки канала. Условия отражения частицы при ударе о стенку имеют вид: $w_x' = \psi_1 w_x$, $w_y' = \psi_1 w_y$.

Из-за нелинейности уравнений модели задача была решена численно с использованием явной схемы в виде:

$$w_{x,i+1} = w_{x,i} + \frac{\Delta\tau}{m} \psi \frac{\pi d^2 \rho}{8} \sqrt{(v-w_{x,i})^2 + w_{y,i}^2} \cdot (v-w_{x,i}), \quad (40)$$

$$w_{y,i+1} = w_{y,i} + \Delta\tau \left[\psi \frac{\pi d^2 \rho}{8m} \sqrt{(v-w_{x,i})^2 + w_{y,i}^2} \cdot w_{y,i} + \frac{v_{x,i}^2}{R_0} \right]. \quad (41)$$

Координаты x , y положения частицы определяются интегрированием выражений для проекций скорости:

$$x_{i+1} = x_i + w_{x,i} \cdot \Delta\tau, \quad y_{i+1} = y_i + w_{y,i} \cdot \Delta\tau. \quad (42)$$

На рисунке 24 представлены зависимости проекций вектора скорости частицы w_x , w_y от времени τ . Величина w_x скачком изменяется при каждом соударении частицы со стенкой, величина w_y изменяет направление на противоположное, модуль скорости w_y при каждом ударе о стенку

уменьшается. На рисунке 25 представлена траектория движения частицы в криволинейном канале. Из графика видно, что со временем частица приближается к внутренней стенке, все больше отдаляясь от наружной стенки канала.

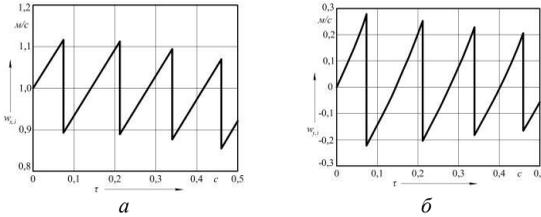


Рисунок 24 – График зависимости проекций вектора скорости частицы w_x (а), w_y (б) от времени τ

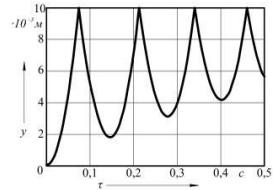


Рисунок 25 – Траектория движения частицы в криволинейном канале

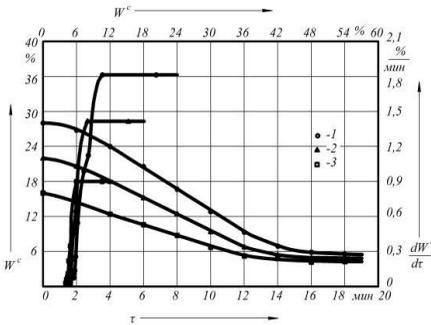


Рисунок 26 – Кривые сушки и скорости сушки семян рапсоропши при $T = 353 \text{ K}$, $P = 525 \text{ Вт/кг}$:
1 – $W^c = 28 \%$; 2 – $W^c = 22 \%$; 3 – $W^c = 16 \%$

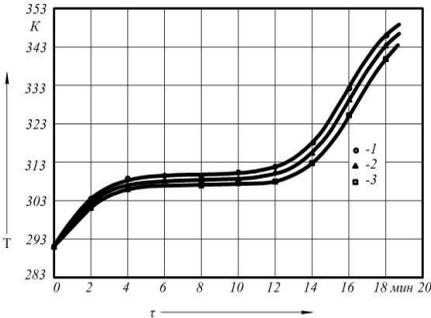


Рисунок 27 – Кривые нагрева семян рапсоропши при $T = 353 \text{ K}$, $P = 525 \text{ Вт/кг}$:
1 – $W^c = 28 \%$; 2 – $W^c = 22 \%$; 3 – $W^c = 16 \%$

Для исследования кинетики процесса сушки рапсоропши было выполнено центральное композиционное равномерноротатабельное планирование эксперимента и выбран полный факторный эксперимент 2^3 . В качестве основных факторов, влияющих на процесс сушки, для исследования были выбраны: начальная влажность семян рапсоропши W^c , температура теплоносителя T и подводимая СВЧ-мощность P .

Повышение начальной влажности семян увеличивает скорость сушки (рисунок 26, 27).. Кроме того, начальная влажность семян влияет на соотношения периодов постоянной и убывающей скорости сушки. Следует отметить, что повышение СВЧ-мощности позволяет в значительной степени интенсифицировать процесс, особенно в периоде убывающей скорости сушки. Несмотря на то что с понижением влажности коэффициента диэлектрических потерь, что, в свою очередь, приводит к снижению количества теплоты, генерируемой в продукте. Однако чрезмерное увеличение подводимой

рапсоропши происходит уменьшение количества теплоты, генерируемой в продукте. Однако чрезмерное увеличение подводимой

СВЧ-мощности может привести к возникновению большого градиента влагосодержания и, как следствие, образованию трещин и нарушению структуры семян.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающие процесс СВЧ-сушки семян расторопши в вихревой камере под влиянием исследуемых факторов. По регрессионным моделям построены инженерные номограммы, а также поставлена и решена задача оптимизации. Установлены рациональные параметры процесса: начальная влажность семян расторопши – 20,28...28,0 %; температура теплоносителя – 342,8...353 К; мощность подводимого СВЧ-излучения – 528...700 Вт. Проведен сравнительный анализ качественных показателей семян расторопши, высушенных на экспериментальной установке конвективным способом, а также в сочетании с СВЧ-энергоподводом. Установлено, что семена соответствуют установленным требованиям, а кислотное и перекисное числа масла расторопши улучшили свои показатели.

В седьмой главе «Исследование и разработка способа сушки семян гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя» приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса сушки семян гречихи.

Разработана математическая модель распределения полей скоростей теплоносителя и твердой частицы в цилиндроконической сушильной камере, тепло- и массообмена в процессе сушки с закрученным потоком теплоносителя. Влажные частицы подаются в сушильную камеру через верхний осевой патрубок (рисунок 28). Подогретый воздух подается в нижней части в виде осевого потока через завихритель с массовым расходом G_{oo} и угловой скоростью Ω_{oo} тангенциальным потоком с расходом G_{to} . Тангенциальный поток и завихритель осевого потока обеспечивают закручивание воздушного потока в сушильной камере:

$$G_{воз} = G_{oo} + G_{to}. \quad (43)$$

Высушенные частицы семян гречихи выводятся через верхний тангенциальный патрубок. Модуль вектора скорости воздуха в произвольной точке определяется через его проекции на оси цилиндрической системы координат:

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_z^2 + U_\theta^2}. \quad (44)$$

Дифференциальное уравнение динамики частицы:

$$m_c \cdot \frac{d\vec{u}}{d\tau} = \vec{G} + \vec{F}_v + \vec{F}_y. \quad (45)$$

В проекциях на координатные оси r , z , θ оно принимает вид:

$$m_c \frac{du_r}{d\tau} = \frac{1}{2} C_D \cdot (U_r - u_r) \cdot \rho_{воз} \cdot U_{омн} \cdot S_M + \frac{m_c \cdot u_\theta^2}{r_c}, \quad (46)$$

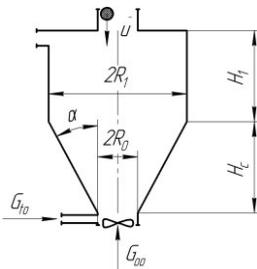


Рисунок 28 – Расчетная схема аппарата

$$m_v \frac{du_\theta}{d\tau} = \frac{1}{2} C_D \cdot (U_\theta - u_\theta) \cdot \rho_{\text{воз}} \cdot U_{\text{отн}} \cdot S_M, \quad (47)$$

$$m_v \frac{du_z}{d\tau} = \frac{1}{2} C_D \cdot (U_z - u_z) \cdot \rho_{\text{воз}} \cdot U_{\text{отн}} \cdot S_M - m_v g. \quad (48)$$

В результате численного решения уравнений (46)-(48) получены значения скорости и положения частицы гречихи в произвольный момент времени. На рисунке 29 показана координата частицы в сушильной камере в радиальном направлении от оси сушильной камеры и по ее высоте.

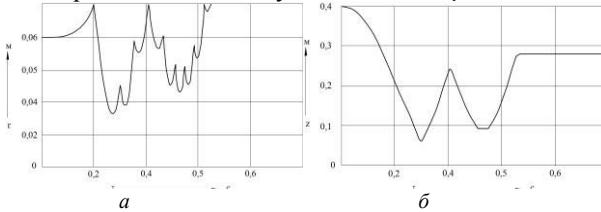


Рисунок 29 – График зависимости координат частицы от времени: а - $r_v = r_v(\tau)$, б - $z_v = z_v(\tau)$

Полученное значение средней относительной скорости теплоносителя позволяет вычислить коэффициенты тепло- и массоотдачи от поверхности частицы к воздуху:

$$Nu = 2 + 0,51 Re^{0,52} Pr^{0,33}, \quad (49)$$

$$Nu_M = 2 + 0,51 Re^{0,52} Sh^{0,33}, \quad (50)$$

где $Pr = \nu_{\text{воз}} / \alpha_{\text{воз}}$, $Sc = \nu_{\text{воз}} / D$, $Nu = \alpha d_c / \lambda_{\text{воз}}$, $Nu_M = \alpha_M d_c / D$.

Дифференциальные уравнения процессов тепло- и массообмена для частицы имеют вид:

$$\frac{dU_L}{d\tau} = A_{11} \left(\frac{d^2 U_L}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dU_L}{dr} \right) + A_{12} \left(\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dt}{dr} \right); \quad (51)$$

$$\frac{dt}{d\tau} = A_{21} \left(\frac{d^2 U_L}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dU_L}{dr} \right) + A_{22} \left(\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dt}{dr} \right), \quad (52)$$

где $A_{11} = a_M$; $A_{12} = a_M \cdot \delta$; $A_{21} = \frac{r_L \cdot \varepsilon}{c_u} a_M$; $A_{22} = a_q + A_{21} \cdot \delta$; $\varepsilon = a_{M1} / a_M$.

Уравнения (51)-(52) решены численно с применением ЭВМ. С полученной математической моделью проведены вычислительные эксперименты. Результаты эксперимента (рисунок 30) показывают распределение влагосодержания в частице гречихи в разные моменты времени. Разработанная математическая модель и программное обеспечение позволяют проанализировать влияние различных параметров на процесс сушки. В частности, радиальная координата, при которой частица вводится в камеру $r_{\text{ин}}$, влияет незначительно на среднюю относительную скорость теплоносителя $\bar{U}_{\text{отн}}$ и коэффициента теплоотдачи α . Выполнена оценка влияния радиуса нижнего патрубка для подачи воздуха R_0 на вышепересмотренные параметры.

В результате установлено, что коэффициент теплоотдачи имеет экстремум при $R_0 = 0,067 \text{ м}$ ($R_0/R_1 = 2/3$) (рисунок 31).

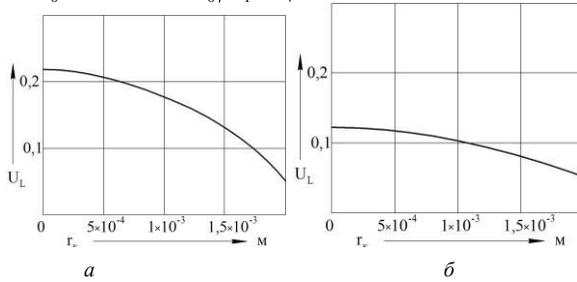


Рисунок 30 – Распределение влагосодержания в частице: *a* - $\tau=5 \text{ с}$, *б* - $\tau=90 \text{ с}$

Другим важным технологическим моментом, определяющим эффективность работы сушилки, является правильное распределение воздушного потока между осевым и тангенциальными вводами. Так, при общем расходе воздуха $G_{\text{воз}} = 0,21 \text{ кг/с}$ наблюдается экстремум при $G_{\text{ос}} = 0,165 \text{ кг/с}$ и $G_{\text{то}} = 0,045 \text{ кг/с}$ (рисунок 32).

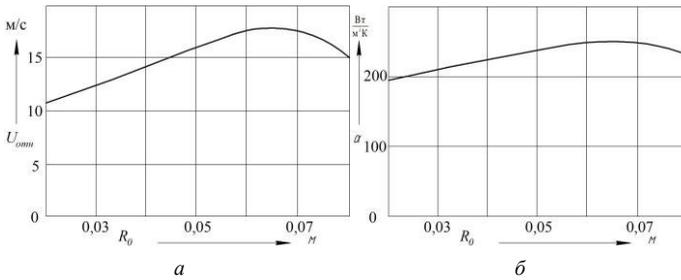


Рисунок 31 – Графики зависимости относительной скорости теплоносителя (*a*) и коэффициента теплоотдачи (*б*) от радиуса нижнего входного отверстия

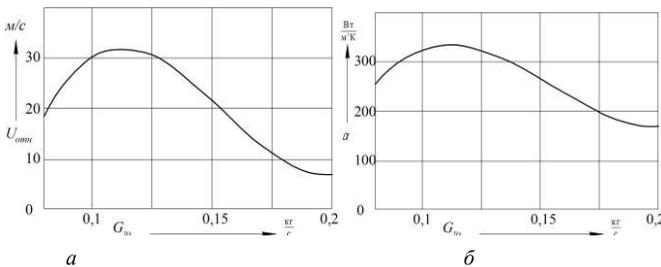


Рисунок 32 – Графики зависимости относительной скорости теплоносителя (*a*) и коэффициента теплоотдачи (*б*) от распределения воздушного потока между осевым и тангенциальными вводами теплоотдачи (*б*) от радиуса нижнего патрубка

Для кинетики сушки было применено центральное композиционное униформ-ротатабельное планирование с полным факторным экспериментом типа 2^3 .

Установлено, влияние температуры T_{ca} теплоносителя, расхода Q_τ тангенциально подводимого потока теплоносителя и соотношения диаметров конической части корпуса D/d на кинетику сушки семян гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя. Влияние отношения D/d сушильной камеры на кинетику сушки гречихи представлено на рисунке 33.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии. По ним построены инженерные номограммы определения режимных параметров процесса, а также поставлена и решена задача оптимизации. Получены рациональные режимы процесса: соотношение диаметров конической части $d/D = 0,2...0,34$; температура теплоносителя $T = 358...373$ К; количество подводимого теплоносителя через тангенциальный патрубок $Q_\tau = 25,5...57,0$ м³/ч.

В восьмой главе «Практическое применение результатов научных и проектно-технических решений» на основании комплекса данных проведенных теоретических и экспериментальных исследований, анализа и синтеза моделей проведено системное проектирование ресурсосберегающих машинных технологий комплексной переработки объектов исследования и разработаны: технологическая линия производства белково-витаминного кормопродукта из послеспиртовой зерновой барды (пат. РФ № 2307155) (рисунок 34), способ безотходной переработки семян амаранта и технологическая линия для его осуществления (пат. РФ № 2426773) (рисунок 35), технологическая линия переработки семян гречихи (рисунок 36), технологическая линия безотходной переработки семян рапса (пат. РФ № 2494141) (рисунок 37).

Разработаны высокоэффективные сушильные установки с закрученными потоками теплоносителя (пат. РФ № 2263262, 2272230, 2301386, 2338981, 2362102, 2480693, 2312280, 2544406, 2425311), способы их автоматического управления и программно-логические алгоритмы функционирования систем управления технологическими параметрами процесса сушки в аппаратах с закрученными потоками теплоносителя с использованием микропроцессорной техники (пат. РФ № 2480693, 2480693, 2350866, 2340853, 2547345) (рисунки 38–45), обеспечивающие максимальную реализацию неиспользованных резервов ресурсосбережения.

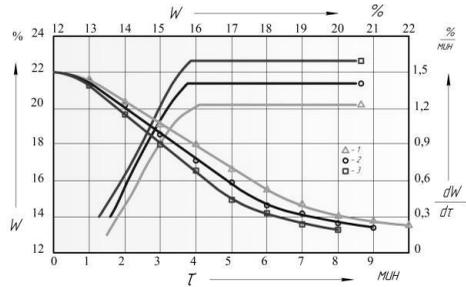


Рисунок 33 – Кривые сушки и скорости сушки гречихи: 1 – $D/d=0,5$, $T_{ca}=358$ К, $Q_\tau=31$ м³/ч; 2 – $D/d=0,33$, $T_{ca}=358$ К, $Q_\tau=31$ м³/ч; 3 – $D/d=0,17$, $T_{ca}=358$ К, $Q_\tau=31$ м³/ч

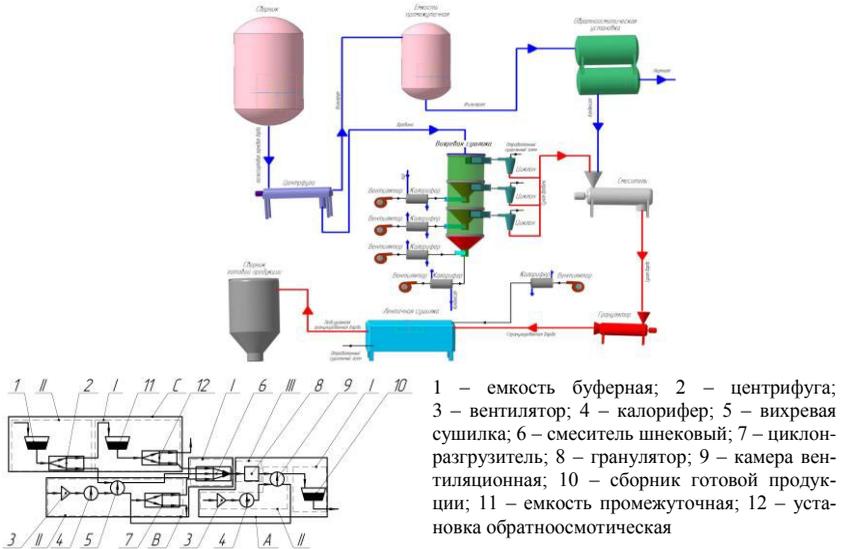
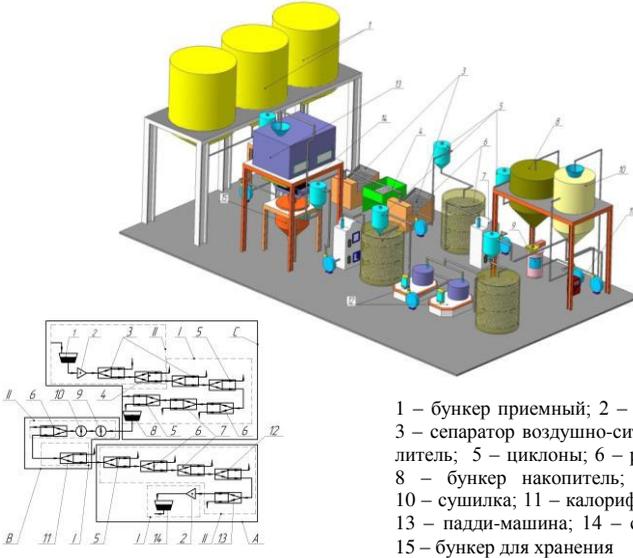


Рисунок 34 – Машинно-аппаратурная схема переработки послеспиртовой зерновой барды

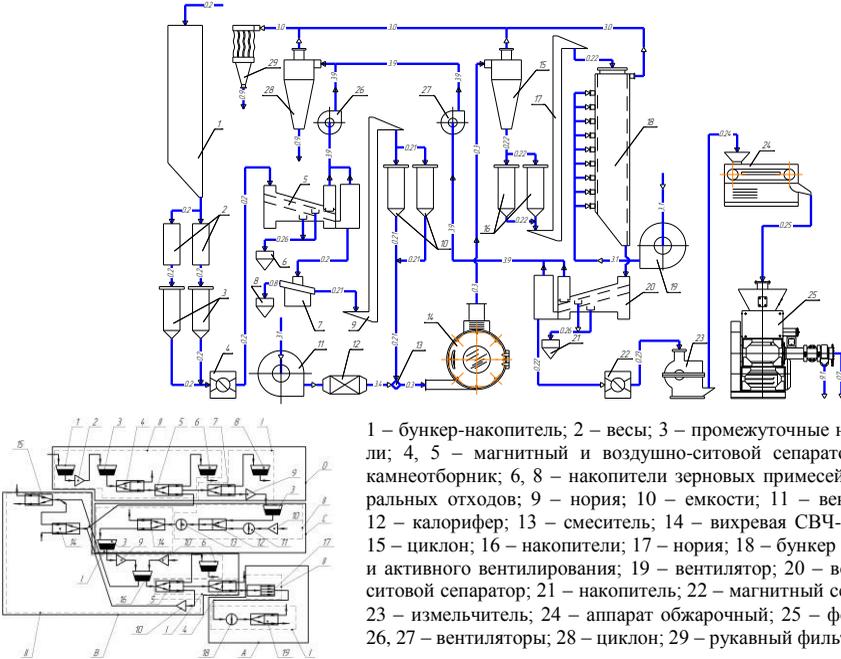


Рисунок 35 – Машинно-аппаратурная схема безотходной переработки семян амаранта



1 – бункер приемный; 2 – весы автоматические; 3 – сепаратор воздушно-ситовой; 4 – камнеотделитель; 5 – циклоны; 6 – рассев; 7 – аспиратор; 8 – бункер накопитель; 9 – пропариватель; 10 – сушилка; 11 – калорифер; 12 – шелушитель; 13 – падди-машина; 14 – сепаратор магнитный; 15 – бункер для хранения

Рисунок 36 – Машинно-аппаратурная схема переработки семян гречихи



1 – бункер-накопитель; 2 – весы; 3 – промежуточные накопители; 4, 5 – магнитный и воздушно-ситовой сепараторы; 7 – камнеотборник; 6, 8 – накопители зерновых примесей и минеральных отходов; 9 – нория; 10 – емкости; 11 – вентилятор; 12 – калорифер; 13 – смеситель; 14 – вихревая СВЧ-сушилка; 15 – циклон; 16 – накопители; 17 – нория; 18 – бункер хранения и активного вентилирования; 19 – вентилятор; 20 – воздушно-ситовой сепаратор; 21 – накопитель; 22 – магнитный сепаратор; 23 – измельчитель; 24 – аппарат обжарочный; 25 – форпресс; 26, 27 – вентиляторы; 28 – циклон; 29 – рукавный фильтр

Рисунок 37 – Машинно-аппаратурная схема безотходной переработки семян рапса

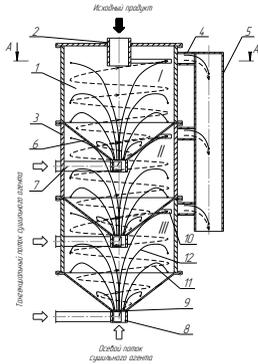


Рисунок 38 – Сушилка с активной гидродинамикой и пофракционной обработкой материала (ВСЖ-1000); 1 – камера; 2 – патрубок; 3 – секции; 4 – отводы продуктовые; 5 – коллектор; 6 – цилиндрические вставки; 7, 8 – патрубок; 9 – решетка; 10 – окна; 11 – траектории движения; 12 – траектории движения высушиваемого материала

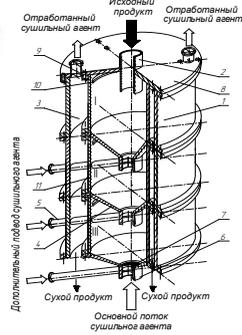
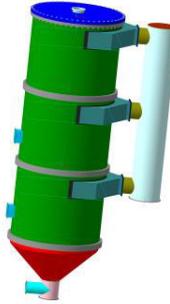


Рисунок 39 – Сушилка с активной гидродинамикой и пофракционной обработкой материала: 1 – сушильная камера; 2, 5, 6, 9 – патрубки; 3 – камера выгрузки; 4 – цилиндрические вставки; 7 – решетка; 8 – крышка; 10 – окна; 11 – секции

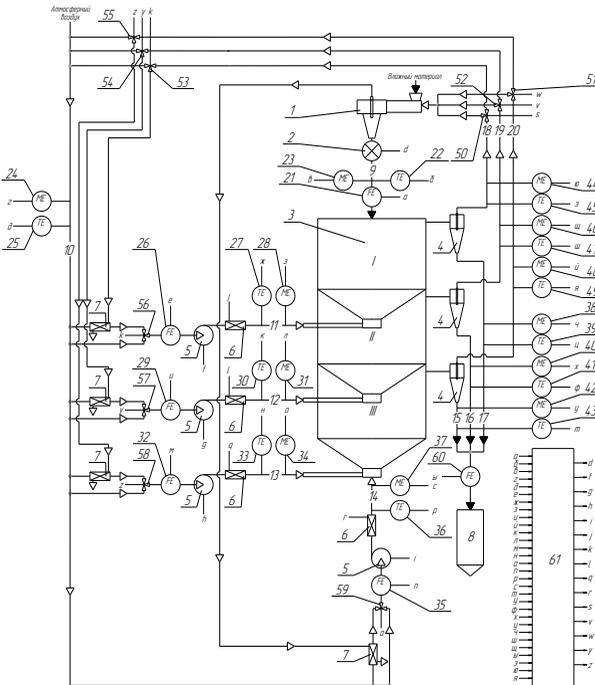
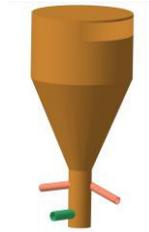
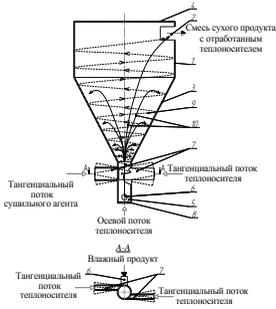
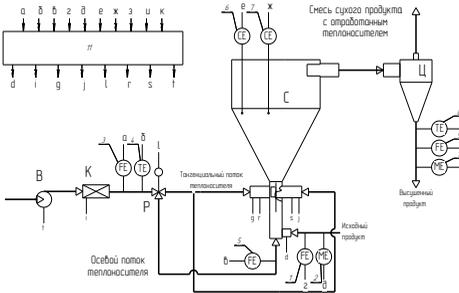


Рисунок 40 – Способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов с рециркуляцией теплоносителя в аппаратах с активной гидродинамикой: 1 – сушилка для подсушки исходного сырья; 2 – дозатор; 3 – сушилка со взвешенно-закрученным слоем; 4 – циклоны; 5 – вентиляторы; 6, 7 – калориферы; 8 – сборник; линии подвода: 9 – исходного материала; 10 – воздуха; 11, 12, 13 – теплоносителя к I, II, III секциям; 14 – осевого потока теплоносителя; линии отвода: 15, 16, 17 – высушенного материала из I, II, III секций; 18, 19, 20 – отработанного теплоносителя из I, II, III секций; датчики: расхода – 21, 26, 29, 32, 35; температуры – 22, 25, 27, 30, 33, 36, 39, 41, 43, 45, 47, 49; влажности – 23, 24, 28, 31, 34, 37, 38, 40, 42, 44, 46, 48; 50-59 – исполнительные механизмы; (а, б, в, г, д, е, ж, з, и, й, к, л, м, н, о, п, р, с, т, у, ф, х, ц, ч, ш, щ, э, ю, я – входные каналы управления, d, f, g, h, i, j, k, l, q, r, s, t, v, w, Y, z – выходные каналы управления), 60 – датчик расхода готового материала; 61 – микропроцессор

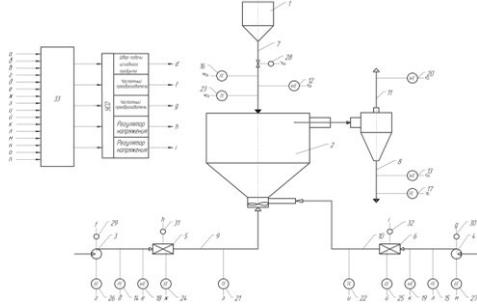
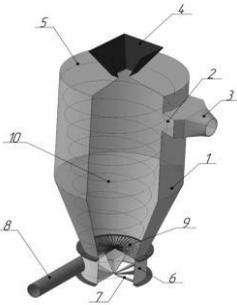


1 – цилиндрическая часть сушильной камеры; 2 – окно; 3 – коническая часть сушильной камеры; 4 – крышка; 5 – осевой воздухопровод; 6 – патрубков; 7 – патрубки закручивающих потоков; 8 – решетка; 9 – траектории движения теплоносителя; 10 – траектории движения материала



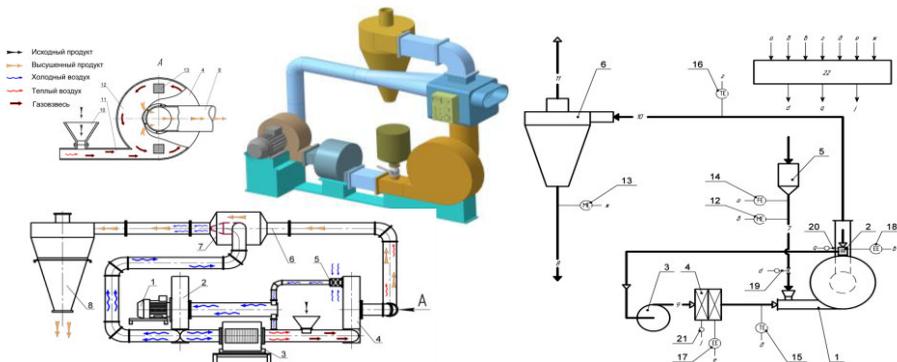
1 – датчик расхода исходного продукта; 2 – датчик влажности исходного продукта; 3 – датчик общего расхода теплоносителя; 4 – датчик температуры теплоносителя; 5 – датчик расхода осевого потока теплоносителя; 6 – датчик концентрации дисперсного материала в пристенной области сушильной камеры; 7 – датчик концентрации дисперсного материала вблизи оси сушильной камеры; 8 – датчик температуры готового продукта; 9 – датчик расхода готового продукта; 10 – датчик влажности готового продукта; 11 – микропроцессор; В – вентилятор; К – калорифер; С – сушильная установка; Ц – циклон-очиститель

Рисунок 41 – Сушилка со взвешенно-закрученным слоем и способ ее автоматического управления



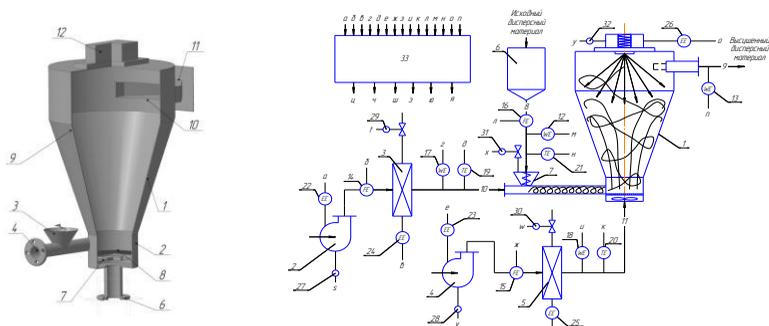
1 – бункер; 2 – сушилка; 3, 4 – вентиляторы; 5, 6 – калориферы; 7 – линии подачи исходного влажного материала; 8, 6 – линии отвода высушенного материала; 9 – линии подвода осевого потока теплоносителя; 10 – линии отвода высушенного материала; 9 – линии подвода тангенциального потока теплоносителя; 11 – линии отвода отработанного теплоносителя; 12, 13 – датчики влажности исходного и высушенного дисперсного материала; 14, 15 – датчики расхода теплоносителя осевого и тангенциального; 16, 17 – датчики расхода влажного и высушенного материала; 18, 19 – датчики влагосодержания исходного теплоносителя; 20 – датчик влагосодержания отработанного сушильного агента; 21, 22 – датчики температуры теплоносителя; 24, 25 – датчики потребляемой мощности калориферов; 26, 27 – датчики потребляемой мощности вентиляторов; 28-32 – исполнительные механизмы (а, б, в, г, д, е, ж, з, и, й, к, л, м, н, о, п – входные каналы управления, d, f, g, h, i – выходные каналы управления); 33 – микропроцессор

Рисунок 42 – Сушилка с регулируемым закрученным потоком теплоносителя и способ ее автоматического управления



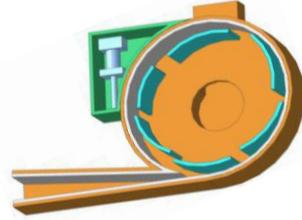
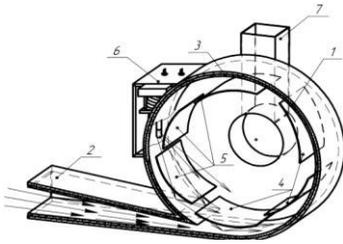
1 – сушильная камера; 2 – источник СВЧ-энергии (магнетрон); 3 – вентилятор; 4 – калорифер; 5 – бункер; 6 – циклон; линии: 7 – подачи исходного влажного материала; 8 – отвода высушенного материала; 9 – подвода потока сушильного агента в сушильную камеру; 10 – отвода газозвеси; 11 – отвода отработанного теплоносителя; 12 – датчик влажности исходного материала; 13 – датчик влажности высушенного материала; 14 – датчик расхода исходного материала; 15 – датчик температуры теплоносителя после калорифера; 16 – датчик температуры отработанного теплоносителя; 17 – датчик потребляемой мощности калорифера; 18 – датчик потребляемой мощности магнетрона; 19...21 – исполнительные механизмы (а, б, в, г, д, е, ж – входные каналы управления; d, q, j – выходные каналы управления); 22 – микропроцессор

Рисунок 43 – Установка для сушки дисперсного материала в активном гидродинамическом режиме с СВЧ-энергоподводом, способ автоматического управления в сушильной установке вихревого типа с подводом СВЧ-энергии



1 – сушильный аппарат; 2, 4 – вентиляторы; 3, 5 – калориферы; 6 – бункер; 7 – питатель; линии: 8 – подачи исходного материала; 9 – отвода высушенного материала; 10 – подвода тангенциального потока теплоносителя; 11 – подвода осевого теплоносителя; 12, 13 – датчики влагосодержания исходного и высушенного материала; 14, 15 – датчики расхода тангенциального и осевого потоков теплоносителя; 16 – датчики расхода исходного материала; 17, 18 – датчики влагосодержания тангенциального и осевого потоков теплоносителя; 19, 20, 21 – датчики температуры тангенциального, осевого потоков теплоносителя, исходного дисперсного материала; 22, 23, 24, 25 – датчики потребляемой мощности вентиляторов подачи тангенциального, осевого потока теплоносителя, калориферов; 26 – датчик потребляемой мощности СВЧ-излучателя; 27-32 – исполнительные механизмы (а, б, в, г, д, е, ж, з, и, к, л, м, н, о, п – входные каналы управления; ц, ч, ш, э, ю, я – выходные каналы управления); 33 – микропроцессор

Рисунок 44 – Аппарат для сушки дисперсных материалов в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ-энергоподводом и способ для его автоматического управления



- 1 – цилиндрический корпус; 2 – патрубок для ввода газозвеси; 3 – покрытие фторопластовое; 4 – локальные ускорители потока теплоносителя; 5 – направляющие вставки; 6 – СВЧ-излучатель; 7 – патрубок

Рисунок 45 – Вихревая сушильная камера для сушки дисперсного материала с СВЧ-энергоподводом

Выполнены расчеты и разработана конструкторская документация на сушилки со взвешено-закрученным слоем ВСЖ-300, ВСЖ-1000.

Приведены результаты эксергетического анализа процесса сушки в вихревой камере с СВЧ-энергоподводом (рисунок 34). Термодинамический анализ энерготехнологической схемы процесса сушки семян расторопши в вихревой камере с СВЧ-энергоподводом выполнен на базе энергетического и эксергетического методов с графической интерпретацией результатов в виде диаграммы, позволившей наглядно определить тепловые потоки и потери в термодинамической системе установки для сушки семян расторопши и наметить наиболее эффективные пути уменьшения затрат при одновременном повышении технологических показателей.

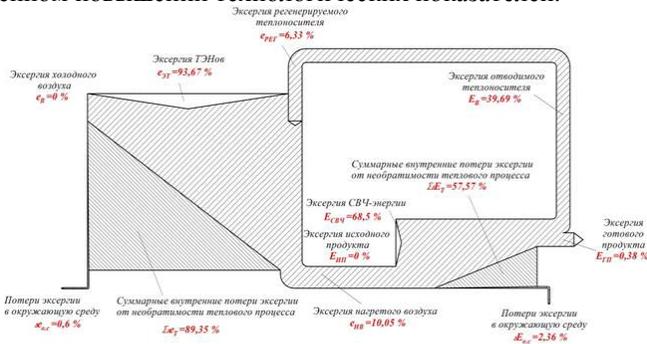


Рисунок 46 – Диаграмма эксергетического анализа процесса сушки в вихревой камере с СВЧ-энергоподводом

Представлен новый системный концептуальный подход к созданию ресурсосберегающих машинных технологий сушки дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя, направленных на интенсификацию, сбережение и рациональное использование материальных и энергетических ресурсов, что достигается проведением на единой методологической основе исследований в рамках реализации поставленной цели и задач работы.

В приложении представлены материалы, подтверждающие практическое внедрение результатов работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработан новый системный концептуальный подход к созданию ресурсосберегающих машинных технологий сушки дисперсных продуктов в закрученном потоке теплоносителя, направленных на интенсификацию, сбережение и рациональное использование материальных и энергетических ресурсов.

2. С использованием существующих экспериментальных методов проведена системная оценка объектов сушки; исследовано влияние влажности и температуры на физико-механические, структурно-сорбционные, теплофизические и электрофизические свойства семян рапса, гречихи, дробины послеспиртовой зерновой барды, а также предложены математические уравнения, адекватно описывающие полученные экспериментальные зависимости.

3. Разработаны и экспериментально апробированы: математическая модель динамического изменения полей температуры и влагосодержания в условиях сопряженного теплообмена в процессе сушки сферической частицы амаранта во взвешенно-закрученном слое, позволяющая проводить оценку скорости движения теплоносителя в цилиндрической области сушильного аппарата; математическая модель процесса сушки частицы рапса в аппарате с закрученным потоком теплоносителя и СВЧ-энергоподводом, позволяющая проводить вычислительные эксперименты по определению нестационарных полей влагосодержания, температуры и давления с целью установления их структуры и взаимовлияния; математическая модель распределения полей скоростей теплоносителя и частицы гречихи в цилиндроконической сушильной камере, позволяющая вычислить коэффициенты тепло-массообмена от поверхности частицы к теплоносителю; математическая модель процесса сушки дробины послеспиртовой зерновой барды в аппарате с закрученным потоком теплоносителя в безразмерном критериальном виде, позволяющая производить инженерные расчеты по прогнозированию кинетики сушки. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных моделей показал хорошую сходимость: отклонение расчетных от экспериментальных данных не превышало 13,8 %.

4. Разработано математическое описание процесса движения дисперсного материала в кольцевом канале вихревой камеры, устанавливающее связь между высотой кольцевого канала и минимальным расходом теплоносителя и определяющее момент уноса частицы из камеры после высушивания ее в электромагнитном поле СВЧ.

5. Установлены основные зависимости гидродинамики взвешенно-закрученного слоя. Изучены механизм и основные закономерности кинетики сушки семян рапса, гречихи, дробины послеспиртовой зерновой барды в закрученном потоке теплоносителя; изучена нестационарность полей температуры и влагосодержания частиц продукта; определены численные значения и диапазон изменения основных кинетических характеристик; по результатам планирования экспериментов и статистической обработки экспериментальных данных установлено влияние различных факторов на кинетику процесса сушки. На основе многофакторного статистического анализа проведена теоретическая многокритериальная оптимизация процессов сушки в закрученном потоке теплоносителя, выявлены рациональные интервалы изменения параметров процесса сушки: дробины послеспиртовой зерновой барды: температура теплоносителя – 346,91...393 К; скорость тангенциального потока теплоносителя – 7,15...13 м/с; угол при вершине конуса сушильной камеры – 24...27°;

семян амаранта: температура теплоносителя – 343...353 К; соотношение осевого и общего расходов теплоносителя – 0,42...0,45; угол отклонения закручивающего потока теплоносителя от тангенциального положения в вертикальной плоскости – 3,7...10,6°, в горизонтальной плоскости – 0,5...3,7°; семян гречихи: соотношение диаметров конической части $d/D = 0,2...0,34$; температура теплоносителя – 358...373 К; количество подводимого теплоносителя через тангенциальный патрубок – 25,5...57,0 м³/ч; семян рапса: влагосодержание – 23,3...31,6 %, температура теплоносителя – 333...355 К, подводимая СВЧ-мощность – 472...700 Вт; семян рапса: влагосодержание – 20,28...28,0 %, температура теплоносителя – 343...353 К и подводимая СВЧ-мощность – 528...700 Вт. Получены графические зависимости инженерных номограмм.

6. Разработаны научно-практические подходы к ресурсосбережению в процессах сушки в закрученном потоке теплоносителя, направленных на интенсификацию, сбережение и рациональное использование материальных и энергетических ресурсов, что достигается моделированием и оптимизацией перспективных конструкций сушильных установок. Произведен эксергетический анализ процесса сушки в закрученном потоке, свидетельствующий о термодинамическом совершенстве предлагаемых способов производства.

7. Разработаны ресурсосберегающие машинные технологии комплексной переработки объектов исследования: технологическая линия белково-витаминного кормопродукта из послеспиртовой зерновой барды (пат. РФ № 2307155), способ безотходной переработки семян амаранта и технологическая линия для его осуществления (пат. РФ № 2426773), технологическая линия безотходной переработки семян рапса (пат. РФ № 2494141); проведено их системное проектирование.

8. Разработаны оригинальные конструкции высокоинтенсивных сушильных установок с закрученными потоками теплоносителя (пат. РФ № 226362, 2272230, 2301386, 2338981, 2362102, 2480693), сушильные аппараты с закрученным потоком теплоносителя и СВЧ-энергоподводом (пат. РФ № 2312280, 2425311, 2544406).

9. Разработана программа для ЭВМ (свид. Роспатента о гос. регистрации № 2015615868) и программно-логические алгоритмы (пат. РФ № 2290583, 2547345, 2239138) функционирования систем, позволяющие обеспечить многоканальное многоуровневое управление и получать готовый продукт высокого качества за счет оптимизации технологических параметров процесса сушки дисперсного материала в закрученном потоке теплоносителя.

10. Проданы лицензии (договоры № РД 0065317 от 03.06.2010 г., № РД 0076125 от 04.02.2011 г., № РД 0068245 от 10.08.2010 г., № РД 0119399 от 21.02.2013 г., Л.Д. № 27/10 «НОУ-ХАУ») на право использования интеллектуальной собственности предприятиями ООО «Авангард», ООО «Тигровый орех», ООО «Кормопродукт», ООО «Энергия Природы», ООО «Техинмаш» по патентам на изобретения РФ № 2312280, 2327095, 2338981, 2425311.

11. Проведена промышленная апробация в условиях ООО «Спиртзавод «Пираква», ОАО «АгроЦентрЛиски», ОАО «ЭФКО», ООО «Русская олива», ООО «Тигровый орех», ООО «АгротехГарант Алексеевский», ООО «Зерноресурс», которая подтвердила высокую эффективность полученных результатов с их технико-экономической оценкой.

Условные обозначения

G – нагрузка, кг; расход m^3/c ; m – масса, кг; r – радиус, м; T, t – температура, К; °С; V – объем, m^3 , скорость, м/с; W – влажность, %, относительная скорость, м/с; β – коэффициент массообмена, $kg/(m^2 \cdot K)$; ε – порозность слоя, критерий фазового превращения; τ – время, с, мин; φ – угол, град; относительная влажность газа; c – удельная теплоемкость продукта, $kJ/(kg \cdot K)$; λ – коэффициент теплопроводности, $Вт/(м \cdot K)$; критерии и числа: Fo – Фурье, Ko – Косовича, Lu – Лыкова, Fe – Федорова, Pn – Пснова, Pt – число Прандтля для воздуха; Sc – число Шмидта; Nu – число Нуссельта; Nu_m – число Нуссельта массообменный; Bi_q – Био теплообменный, Bi_m – Био массообменный, U, U_n – влагосодержание продукта текущее, начальное, kg/kg ; ΔP – перепад давления, Па; P – давление влажного воздуха в капиллярно-пористом теле, Па; $P_{\text{уд}}$ – удельная мощность, $Вт/м^3$; ρ – плотность, kg/m^3 ; a – коэффициент температуропроводности, m^2/c ; r – удельная теплота парообразования, kJ/kg , координата, м; a_m – коэффициент диффузии влаги, m^2/c ; α – коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot K)$; β – коэффициент массоотдачи, м/с; ε'' – коэффициент диэлектрических потерь; Q – безразмерный равномерно распределённый источник энергии; T – безразмерная температура; U – безразмерное влагосодержание; R – безразмерная координата, безразмерный радиус, м, универсальная газовая постоянная, $Дж/(моль \cdot K)$, ψ – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы; w_x, w_y – проекции скорости частицы на оси x и y ; d_e – эквивалентный диаметр частиц, м; δ_1 – ширина кольцевого канала, м; $G_{\text{ос}}$ – расход осевого потока теплоносителя, kg/c ; $G_{\text{тс}}$ – расход тангенциального потока теплоносителя, kg/c ; $G_{\text{об}}$ – общий расход теплоносителя, kg/c ; $\Omega_{\text{ос}}$ – угловая скорость вращения осевого потока теплоносителя $рад/c$; $\Omega_{\text{тс}}$ – угловая скорость вращения тангенциального потока теплоносителя $рад/c$; F_x – сила аэродинамического сопротивления, Н; F_y – центробежная сила; C_D – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы; $U_{\text{ос}}$ – скорость воздуха относительно частицы, м/с; S_n – площадь миделева сечения частицы, m^2 ; X – соотношение массовых расходов осевого и общего потоков теплоносителя; $\alpha_{\text{откл}}$ – угол отклонения патрубка подачи закручивающего потока теплоносителя от тангенциального положения в горизонтальной плоскости, град; $\alpha_{\text{в.л.}}$ – угол отклонения патрубка подачи закручивающего потока теплоносителя от тангенциального положения в вертикальной плоскости, град; S – удельная нагрузка на газораспределительную решетку, kg/m^2 .

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Монографии:

1. **Антипов, С. Т.** Тепло- и массообмен при сушке послеспиртовой зерновой барды в аппарате с закрученным потоком теплоносителя / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, Воронеж. гос. технол. акад. - Воронеж: ВГТА, 2006. - 252 с.
2. **Антипов, С. Т.** Тепло- и массообмен при сушке семян рапса в СВЧ-аппарате с закрученным потоком теплоносителя / С. Т. Антипов, Е. С. Бунин, А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев; Воронеж. гос. технол. акад. - Воронеж: ВГТА, 2010. - 212 с.
3. **Антипов, С. Т.** Тепло- и массообмен при сушке семян амаранта в аппарате со взвешенно-закрученным слоем / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, И. М. Черноусов; Воронеж. гос. технол. акад. - Воронеж: ВГТА, 2011. - 222 с.
4. **Юрова, И. С.** Тепло- и массообмен при сушке семян расторопши в вихревой камере с СВЧ-энергоподводом / И. С. Юрова, И. Т. Кретов, А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев; Воронеж. гос. ун-т. инж. технол. - Воронеж: ВГУИТ, 2012. - 192 с.

Учебные пособия

5. Инновационное развитие техники пищевых технологий : учеб. Пособие под ред. акад. В.А. Панфилова / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев, В.Ю. Овсвинников, В.А. Панфилов, А. В. Прибытков [и др.]; СПб. Лань, 2016. – 660 с.
6. **Журавлев, А. В.** Технологическое оборудование молочной отрасли. Теория и практика : учеб. пособие / А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев, И. С. Юрова; Воронеж. гос. ун-т. инж. технол. – Воронеж, 2012. – 307 с.

Статья в журналах, рекомендованных ВАК РФ

7. **Антипов, С. Т.** Статистический анализ процесса сушки пивной дробины в аппарате с закрученным потоком фаз / С. Т. Антипов, А. В. Прибытков, А. В. Журавлев // Хранение и переработка сельхозсырья. - 2006. - № 2. – С.27–29.
8. **Антипов, С. Т.** Моделирование процесса сушки влажной частицы дисперсного материала в аппарате с закрученным потоком теплоносителя / С.Т. Антипов, А. В. Жучков, А. В. Прибытков, А. В. Журавлев // Вестник ВГУ. -2006.- № 6. – С. 18-24.
9. **Журавлев, А. В.** Инновационная ресурсосберегающая технология переработки послеспиртовой зерновой барды / А. В. Журавлев, Г. В. Агафонов, И.М. Черноусов // Вестник ВГТА. - 2008.- № 1. – С. 22-25.
10. **Журавлев, А. В.** Высокоэффективная сушилка для зерна амаранта / А. В. Журавлев, И.М. Черноусов, А. Ю. Баранов // Вестник ВГТА. - № 1. – С. 50-53.
11. **Антипов, С. Т.** Способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, И.М. Черноусов, А. Ю. Баранов // Вестник ВГТА. - 2008.- № 2. – С. 75-78.

12. **Антипов, С. Т.** Алгоритм управления процессом сушки дисперсных материалов в шахтной СВЧ-сушилке / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев, Э. В. Ряжских // *Хранение и переработка сельхозсырья*. - 2008. - № 5. - С. 76–77.
13. **Антипов, С. Т.** Статистический анализ процесса сушки послеспиртовой зерновой барды в аппарате со взвешенно-закрученным слоем / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, И. М. Черноусов // *Хранение и переработка сельхозсырья*. - 2008. - № 8. - С. 33–36.
14. **Антипов, С. Т.** Исследование и анализ гигроскопических свойств семян амаранта / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, И. М. Черноусов, Е. С. Бунин // *Вопросы современной науки и практики / Университет им. В.И. Вернадского*. - 2008. - № 4 (14). - С. 197–201.
15. Новые технические решения в технике сушки дисперсных материалов / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев, И. М. Черноусов, Е. С. Бунин // *Техника машиностроения*. - 2009. - № 1. - С. 55–58.
16. **Антипов, С. Т.** Проблема сушки зерна амаранта в России / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, А. В. Прибытков, И. М. Черноусов // *Вестник ВГТА*. - 2009. - № 1. - С. 27–30.
17. **Антипов, С. Т.** Исследование процесса сушки яблок в аппарате с конвективным и СВЧ-энергоподводом / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев, А. А. Селин // *Вестник ВГТА*. - 2009. - № 1. - С. 48–52.
18. Численный метод решения математической модели процесса сушки послеспиртовой зерновой барды в аппарате со взвешенно-закрученным потоком теплоносителя / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, В. И. Ряжских, Г. В. Агафонов, И. М. Черноусов // *Хранение и переработка сельхозсырья*. - 2009. - № 5. - С. 77–80.
19. Исследование сложных кинетических реакций в семенах рапса методом термического анализа теплоносителя / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, И. В. Кузнецова, Е. С. Бунин // *Хранение и переработка сельхозсырья*. - 2009. - № 8. - С. 40–41.
20. **Антипов, С. Т.** Исследование электрофизических свойств семян рапса как объекта сушки / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев, Е. С. Бунин // *Вестник ВГТА*. - 2010. - № 1. - С. 42–45.
21. **Антипов, С. Т.** Математическое планирование многофакторного эксперимента и оптимизация процесса сушки измельченной аромии черноплодной под вакуумом с комбинированным энергоподводом / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, А. А. Жашков // *Вестник ВГТА*. - 2010. - № 1. - С. 14–18.
22. **Журавлев, А. В.** Автоматическое управление процессом сушки дисперсных материалов в сушильной установке с закрученным потоком теплоносителя и СВЧ-энергоподводом / А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев, И. С. Юрова // *Вестник ВГТА*. - 2010. - № 2. - С. 76–80.
23. **Журавлев, А. В.** Проблема переработки семян рапса в России / А. В. Журавлев, И. Т. Кретов, И. С. Юрова, Д. А. Казарцев // *Финансы. Экономика. Стратегия*. - 2010. - № 6. - С. 43–46.
24. Исследование форм связи влаги в семенах амаранта сорта Ультра методом дифференциально-термического анализа / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, И. В. Кузнецова, И. М. Черноусов, А. Ю. Баранов // *Хранение и переработка сельхозсырья*. - 2010. - № 8. - С. 40–41.
25. **Антипов, С. Т.** Современные тенденции развития производства и способы повышения эффективности переработки семян рапса / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев, Е. С. Бунин // *Финансы. Экономика. Стратегия*. - 2011. - № 1. - С. 29–33.
26. **Антипов, С. Т.** Исследование теплофизических характеристик семян рапса / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев, Е. С. Бунин // *Вестник ВГТА*. - 2011. - № 1. - С. 106–109.
27. Статистический анализ процесса сушки семян рапса закрученным потоком теплоносителя и СВЧ-энергоподводом / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев, Е. С. Бунин, И. С. Юрова // *Хранение и переработка сельхозсырья*. - 2011. - № 12. - С. 63–65.
28. **Антипов, С. Т.** Исследование форм связи влаги семян гречихи методом термического анализа / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, А. В. Бородкина, А. Ю. Баранов // *Вестник ВГУИТ*. - 2013. - № 2. - С. 25–28.
29. **Антипов, С. Т.** Разработка высокоинтенсивной сушилки с регулируемым закрученным потоком теплоносителя / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, А. В. Бородкина, А. Ю. Баранов // *Вестник ВГУИТ*. - 2013. - № 4. - С. 47–49.
30. **Антипов, С. Т.** Исследование кинетики сушки плодов черной смородины в вакуум-аппарате с СВЧ-энергоподводом / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев, С. А. Виниченко // *Вестник ВГУИТ*. - 2013. - № 4. - С. 26–30.
31. **Антипов, С. Т.** Разработка математической модели процесса сушки плодов черной смородины в вакуум-аппарате с СВЧ-энергоподводом / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев, С. А. Виниченко // *Вестник ВГУИТ*. - 2014. - № 1. - С. 7–12.
32. **Антипов, С. Т.** Исследование кинетики сушки гречихи в сушилке с закрученными потоками теплоносителя / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, А. В. Бородкина, А. Ю. Баранов // *Вестник ВГУИТ*. - 2014. - № 1. - С. 26–30.
33. **Антипов, С. Т.** Решение математической модели процесса сушки плодов черной смородины в вакуум-аппарате с СВЧ-энергоподводом / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев, С. А. Виниченко // *Вестник ВГУИТ*. - 2014. - № 2. - С. 7–12.

34. **Антипов, С. Т.** Статистический анализ процесса сушки черной смородины в вакуум-аппарате с СВЧ-энергоподводом / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев, С. А. Винниченко // Хранение и переработка сельхозсырья. - 2014. - № 7. - С. 20-22.

35. **Журавлев, А. В.** Разработка математической модели сушки семян амаранта в аппарате со взвешенно-закрученным слоем. Ч. 1 / А. В. Журавлев, А. Б. Бородкина, И. М. Черноусов // Вестник ВГУИТ. - 2015. - № 1. - С. 58-62.

36. **Антипов, С. Т.** Алгоритм управления процессом сушки дисперсных материалов в аппарате с закрученными потоками теплоносителя и СВЧ-энергоподводом / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, Д. А. Нестеров, А. С. Марухин // Вестник ВГУИТ. - 2015. - № 1. - С. 86-89.

37. **Журавлев, А. В.** Разработка математической модели сушки семян амаранта в аппарате со взвешенно-закрученным слоем. Ч. 2 / А. В. Журавлев, А. Б. Бородкина, И. М. Черноусов // Вестник ВГУИТ. - 2015. - № 3. - С. 28-31.

38. **Казарцев, Д. А.** Исследование кинетики сушки семян расторопши в вихревой камере с СВЧ-энергоподводом / Д. А. Казарцев, А. В. Журавлев, И.С. Юрова, А. В. Бородкина // Вестник ВГУИТ. - 2015. - № 4. - С. 32-37.

39. **Журавлев, А. В.** Сушилка с регулируемым закрученно-фонтанирующим потоком дисперсного материала и алгоритм ее микропроцессорного управления / А. В. Журавлев, А. Б. Бородкина, И. М. Черноусов // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. - 2015. - № 4. - С. 166-171.

40. **Антипов, С. Т.** Математическое моделирование движения зерна потока в сушильном аппарате со взвешенно-закрученным слоем / С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, Д. А. Нестеров, В. В. Посметьев // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. - 2015. - № 4. - С. 46-53.

41. **Журавлев, А. В.** Системное проектирование ресурсосберегающей машинной технологии переработки семян рапса / А. В. Журавлев, С. А. Марухин // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. - 2016. - № 1. - С. 42-46.

Патенты на изобретения и свидетельства Роспатента

42. **Пат. №2263262 РФ, МПК7 F 26 В 17/10.** Вихревая сушилка / Антипов С. Т., Прибытков А. В., Журавлев А. В.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2004112142; заявл. 20.04.2004; опубл. 27.10.2005, Бюл. № 30.

43. **Пат. №2272230 РФ, МПК7 F 26 В 17/10.** Сушилка с активной гидродинамикой и пофракционной обработкой материала / Антипов С. Т., Прибытков А. В., Журавлев А. В.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2004130341; заявл. 15.10.2004; опубл. 20.03.2006, Бюл. № 8.

44. **Пат. № 2290583 РФ, МПК7 F 26 В 25/22.** Способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов активном гидродинамическом режиме / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Прибытков А. В.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2005112585; заявл. 26.04.2005; опубл. 27.12.2006, Бюл. № 36.

45. **Пат. № 2301386 РФ, МПК7 F 26 В 25/22.** Устройство для сушки полидисперсных материалов / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Прибытков А. В., Черноусов И.М. // Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2006110671; заявл. 03.04.2006; опубл. 20.06.2007, Бюл. 17.

46. **Пат. № 2312280 Россия, МПК7 F 26 В 17/00, F 26 В 3/34.** Установка для сушки дисперсного материала в активном гидродинамическом режиме с СВЧ-энергоподводом / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Казарцев Д.А., Бунин Е.С.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2006122129/06; заявл. 20.06.2006; опубл. 10.12.2007, Бюл. № 34.

47. **Пат. № 2307155 РФ, МПК7 С 12 F 3/10, С 12 P 7/06, А 23 К 1/06.** Технологическая линия производства белково-витаминного кормопродукта из послеспиртовой зерновой барды / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Прибытков А. В.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2005107199/13; заявл. 15.03.2005; опубл. 27.09.2007, Бюл. № 27.

48. **Пат. № 2327095 РФ, МПК7 F 26 В 25/22.** Способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов в шахтной сушилке с использованием СВЧ-энергии / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Казарцев Д. А., Черноусов И. М., Бунин Е. С.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2006135161/06; заявл. 04.10.2006; опубл. 20.06.2008 Бюл. № 17

49. **Пат. № 2335717 РФ, МПК7 F 26 В 25/22.** Способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов в вихревом режиме / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Черноусов И. М., Баранов А.Ю.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2007113076/06; заявл. 10.04.2007; опубл. 10.10.2008 Бюл. № 28.

50. **Пат. № 2340853 РФ, МПК7 F 26 В 25/22.** Способ автоматического управления процессом сушки полидисперсных материалов во взвешенно-закрученном слое / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Черноусов И. М., Баранов А.Ю.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2007113378/06; заявл. 10.04.2007; опубл. 10.12.2008 Бюл. № 34.

51. **Пат. № 2338981 РФ, МПК7 F 26 В 17/10.** Сушилка с активной гидродинамикой и пофракционной обработкой материала / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Черноусов И. М.; Заявитель и

патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2007113381/06; заявл. 10.04.2007; опубл. 20.11.2008 Бюл. № 32.

52. Пат. № 2350866 РФ, МПК7 F 26 B 25/22. Способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов с рециркуляцией теплоносителя в аппаратах с активной гидродинамикой / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Черноусов И. М., Баранов А. Ю., Журавлев В. В.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2007149211/06; заявл. 26.12.2007; опубл. 27.03.2009 Бюл. № 32.

53. Пат. № 2362102 РФ, МПК7 F 26 B 17/10. Сушилка с активным гидродинамическим режимом / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Черноусов И. М., Баранов А. Ю.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2008109396/06; заявл. 11.03.2008; опубл. 20.07.2009 Бюл. № 20.

54. Пат. № 2426773 РФ, МПК7 C 11B 1/10. Способ безотходной переработки семян амаранта и технологическая линия для его осуществления / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Черноусов И. М.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2010109695/13; заявл. 15.03.2010; опубл. 20.08.2011 Бюл. № 23.

55. Пат. № 2425311 РФ, МПК7 F 26 B 17/10. Вихревая сушильная камера для сушки дисперсного материала в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ-энергоподводом / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Казарцев Д. А., Бунин Е. С., Баранов А. Ю., Юрова И. С.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2010115946/06; заявл. 21.04.2010; опубл. 27.07.2011 Бюл. № 21.

56. Пат. 2444689 Россия, МПК7 F 26 B 25/22. Способ автоматического управления процессом сушки пищевых продуктов в ленточной сушилке с использованием конвективного и СВЧ-энергоподвода / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Казарцев Д. А., Калинин Т. В., Юрова И. С., Емельянов А. Б.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2010135851; заявл. 26.08.2010; опубл. 10.03.2012 Бюл. № 7.

57. Пат. № 2480693 РФ, МПК7 F 26 B 17/10. Сушилка с регулируемым закрученным потоком теплоносителя / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Казарцев Д. А., Баранов А. Ю.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2011113204; заявл. 05.04.2011; опубл. 27.04.2013 Бюл. № 12.

58. Пат. № 2494141 РФ, МПК7 C11B 1/00. Технологическая линия безотходной переработки семян рапса / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Бунин Е. С., Казарцев Д. А., Юрова И. С.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. универ. инж. технол. – № 2012118161; заявл. 03.05.2012; опубл. 27.09.2013. Бюл. № 27.

59. Пат. № 2503240 РФ, МПК7 A23B7/02. Технологическая линия для производства сушеных ягод и порошка из них / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Казарцев Д. А., Виниченко С. А.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. универ. инж. технол. – № 2012140921; заявл. 25.09.2012; опубл. 10.01.2014. Бюл. № 1.

60. Пат. № 2548209 РФ, МПК7 F26B15/12. Вакуумная сушилка непрерывного действия с СВЧ-энергоподводом / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Казарцев Д. А., Виниченко С. А.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. универ. инж. технол. – № 2012144740/06; заявл. 22.10.2012; опубл. 27.04.2014 Бюл. № 12.

61. Пат. № 2544406 РФ, МПК7 F26B17/10. Аппарат для сушки дисперсных материалов в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ-энергоподводом / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Казарцев Д. А., Нестеров Д. А., Бородкина А. В.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. универ. инж. технол. – № 2013150692/06; заявл. 14.11.2013; опубл. 20.03.2015 Бюл. № 8.

62. Пат. № 2547345 РФ, МПК7 F26B 25/22. Способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ-энергоподводом / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Казарцев Д. А., Нестеров Д. А., Бородкина А. В., Виниченко С. А.; Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. универ. инж. технол. – № 2013156470/06; заявл. 19.12.2013; опубл. 10.04.2015 Бюл. № 10.

63. Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015615868. Программа для моделирования СВЧ-сушки семян проса во взвешенно-закрученном слое / Антипов С. Т., Журавлев А. В., Нестеров Д. А., Посметьев В. В., Казарцев Д. А., Марухин С. А., Бородкина А. В.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. инж. технол. – № 2015612364; заявл. 30.03.2015; зарегистр. 26.05.2015.

Подписано в печать 22.03.2016. Формат 60×84^{1/16}.

Усл. печ. л. 2,0. Тираж 120 экз. Заказ № 23.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»
(ФГБОУ ВО «ВГУИТ»)

Отдел полиграфии ФГБОУ ВО «ВГУИТ»

Адрес университета и отдела полиграфии
394036 Воронеж, пр. Революции, 19