

Федеральное агентство по рыболовству
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Астраханский государственный технический университет»

На правах рукописи

ТЕЛИЧКИН РОМАН СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА
РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ ЭКСТРАКТА ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ**

05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, доцент
МАКСИМЕНКО ЮРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

Астрахань – 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ТЕНДЕНЦИИ В ПЕРЕРАБОТКЕ СЫРЬЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ: ХАРАКТЕРИСТИКА СЫРЬЯ И ПРОДУКТОВ, ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА	13
1.1 Общая характеристика сырья растительного происхождения и сухих дисперсных растительных материалов	13
1.2 Перспективы производства и области использования сухих дисперсных материалов из растительного сырья	15
1.3 Общая характеристика чая зеленого и экстракта зеленого чая	17
1.4 Анализ современных технологий переработки сырья растительного происхождения	21
1.5 Анализ перспективных способов и конструкторских решений для производства сухих дисперсных материалов из растительного сырья	24
1.6 Теоретические предпосылки моделирования процесса сушки растительных продуктов	36
1.7 Анализ литературного обзора	41
ГЛАВА 2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭКСТРАКТА ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ С ВОДОЙ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ, ГИГРОСКОПИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ	44
2.1 Теплофизические и структурно–механические характеристики экстракта зеленого чая	44
2.1.1 Исследование плотности экстракта зеленого чая	45

2.1.2	Исследование удельной теплоемкости экстракта зеленого чая	47
2.1.3	Исследование теплопроводности экстракта зеленого чая	49
2.1.4	Исследование температуропроводности экстракта зеленого чая	52
2.1.5	Анализ результатов исследования теплофизических и структурно–механических характеристик экстракта зеленого чая	53
2.2	Механизм взаимодействия экстракта зеленого чая с водой	56
2.3	Термодинамический анализ внутреннего массопереноса при взаимодействии экстракта зеленого чая с водой	63
2.4	Фазовые превращения при внутреннем тепло- и массопереносе в процессе сушки экстракта зеленого чая	68
2.5	Оценка удельных затрат тепловой энергии на сушку экстракта зеленого чая с учетом термодинамических потерь тепла в процессе обезвоживания	69

ГЛАВА 3. МЕХАНИЗМ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКЕ ЭКСТРАКТА ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ

3.1	Экспериментальное исследование процесса распылительной сушки экстракта зеленого чая	73
3.2	Исследование кинетики распылительной сушки экстракта зеленого чая	79
3.3	Анализ механизма внутреннего массопереноса при распылительной сушке экстракта зеленого чая	85

ГЛАВА 4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СУШКЕ ЭКСТРАКТА ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ

4.1	Производительность распылительной сушильной установки Для экстракта зеленого чая	92
4.2	Анализ влияния основных факторов на производительность и	

влагонапряженность при распылительной сушке экстракта зеленого чая	95
4.3 Разработка режимных параметров конвективной распылительной сушки экстракта зеленого чая	97
ГЛАВА 5. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И РАСЧЕТ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР В МАТЕРИАЛЕ ПРИ КОНВЕКТИВНОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКЕ ЭКСТРАКТА ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ	101
ГЛАВА 6. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОЕКТНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ	110
6.1 Тестирование и опытно-промышленная реализация режимных параметров конвективной распылительной сушки экстракта зеленого чая	110
6.2 Технические решения для совершенствования конструкции распылительной сушильной установки	114
6.3 Промышленное внедрение и практическое использование результатов исследований	119
6.4 Рекомендации по практическому использованию результатов исследований	120
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	124
ПРИЛОЖЕНИЯ	160

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Пищевая и перерабатывающая промышленность наряду с рядом других отраслей формирует продовольственную и экономическую безопасность Российской Федерации.

Пищевая промышленность – отрасль промышленности, которая занимается производством пищевой продукции и товаров народного потребления и является системообразующим элементом экономики страны.

Уровень конкурентоспособности отечественной пищевой промышленности и намеченные тренды ее дальнейшего формирования в условиях глобальной мировой конкуренции оказывают прямое влияние на уровень жизни населения, условия и качество воспроизводства рабочей силы в национальной экономике, стоимость потребительской корзины и так далее.

Экстракты растений – традиционная лекарственная форма официальной медицины. Экстракты имеют фармакопейный статус в Российской Федерации. Кроме фармацевтической отрасли, экстракты растений применяют в пищевых производствах и косметологической области. Обусловлено активное использование экстрактов тем, что помимо уникальных собственных характеристик, экстракты могут применяться как элемент, который усиливает и / или раскрывает действие того или иного компонента в составе продукции. Очевидно, что в пищевом производстве экстракты растений преимущественно используются в качестве функциональных добавок, основ для приготовления различных напитков и в виде специй.

Постоянный спрос на сырье растительного происхождения, интерес к фитохимическим пищевым компонентам, а также стремительное развитие рынка пищевых биологически активных добавок обуславливает необходимость рационального использования растительного сырья и налаживания производств, реализующих энергоэффективные технологии переработки.

Применение экстрактов на практике в качестве ингредиентов в виде сухой порошковой формы рационально и упрощает процессы хранения, транспортировки, дозирования и так далее на пищевых производствах. Использование сухих дисперсных форм перспективно для расширения ассортимента продукции, повышения ее пищевой, а, главное, и биологической ценности.

Актуальным направлением применения сухих экстрактов является производство различных тонизирующих напитков, чайных и кофейных смесей. Зеленый чай является популярным продуктом, а сухая порошковая форма экстракта зеленого чая перспективна для промышленного производства и использования в пищевой промышленности, фармацевтике и косметологии.

Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, посвящена разработке способа распылительной сушки экстракта зеленого чая за счет изучения и анализа физико-химических свойств экстракта, моделирования и анализа процессов теплообмена, разработки рационального режима обезвоживания и конструкции сушильной установки. Исследования выполнялись в соответствии с тематическим планом НИОКР в рамках государственного задания и согласно координационному плану научно-исследовательской работы кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет».

Степень разработанности темы. Значимый вклад в создание и дальнейшее развитие теории и техники сушки внесли ученые А.С. Гинзбург, А.В. Лыков, М.В. Лыков, В.И. Муштаев, П.А. Ребиндер, Б.С. Сажин, И.А. Рогов, Ю.М. Плаксин, С.П. Рудобашта, П.Г. Романков, В.И. Попов, А.Н. Остриков, И.Т. Кретов, С.Т. Антипов, И.Ю. Алексанян, К.Г. Филоненко, Б.И. Леончик, М.А. Гришин, О. Кришер и многие другие.

Применению в пищевой промышленности сухих растительных материалов посвящено большое число работ по созданию рецептур продукции [2, 32, 204, 208, 209, 210, 211, 216, 221, 222, 226], технологий [6, 43, 49, 66,

127, 152, 156, 70, 178, 180] и усовершенствованию технологического оборудования [9, 17, 38, 53, 54, 97, 124, 134].

Разработке новых и рационализации известных методов получения сухих дисперсных растительных материалов также уделяется внимание [4, 9, 17, 30, 53, 61-65, 91, 225]. Создание современного сушильного производства невозможно без разработки специальной техники и технологии, новых режимов для интенсификации тепломассообменных процессов сушки.

Реализации математических моделей тепломассопереноса посвящен ряд исследований [4, 9, 10, 182]. Требуется учет при проектировании сушильной техники комплекса (термодинамических, структурно-механических и теплофизических) характеристик объектов сушки [4, 9, 17, 30, 53, 61-65, 91, 225].

Таким образом, для разработки и практического внедрения способа распылительной сушки экстракта зеленого чая необходимо, с учетом сформулированных ранее положений, изучить физико-химические свойства экстракта, выполнить моделирование и анализ процессов тепломассообмена, разработать рациональные режимы обезвоживания и конструкцию сушильной установки.

Цель диссертационной работы – разработка способа распылительной сушки экстракта зеленого чая за счет изучения и анализа физико-химических свойств экстракта, моделирования и анализа процессов тепломассообмена, разработки рационального режима обезвоживания и конструкции сушильной установки.

Для достижения цели решались следующие основные задачи:

1) Систематизировать данные литературных источников, экспериментально установить и проанализировать функциональные зависимости для расчета теплофизических, структурно-механических и гигроскопических характеристик экстракта зеленого чая в реальных диапазонах изменения его влажности и температуры в процессе сушки.

- 2) Проанализировать влияние температуры и влажности материала на теплофизические, структурно–механические и гигроскопические характеристики концентратов экстракта зеленого чая.
- 3) Исследовать механизм взаимодействия концентратов экстракта зеленого чая с водой, дать характеристику экстракту как объекту сушки и оценить виды и энергию связи влаги с экстрактом в увязке с процессом обезвоживания.
- 4) Оценить эффективность использования тепловой энергии с учетом термодинамических потерь тепла в процессе обезвоживания и проанализировать фазовые превращения при внутреннем тепломассопереносе в процессе сушки экстракта зеленого чая.
- 5) Исследовать кинетические закономерности и механизм тепломассопереноса при распылительной сушке экстракта зеленого чая.
- 6) Реализовать математическую постановку и решить задачу рационализации сушильного процесса при распылительной сушке экстракта зеленого чая. Установить рациональный режим распылительной сушки экстракта зеленого чая.
- 7) Реализовать математическую модель внутреннего тепломассопереноса при распылительной сушке экстракта зеленого чая.
- 8) Разработать конструкторские решения для организации эффективной сушки при производстве экстракта зеленого чая.
- 9) Разработать рекомендации по практическому использованию результатов научных исследований и проектно-технических решений. Апробировать, протестировать и внедрить основные результаты на предприятиях отрасли.

Научная новизна. Установлены и проанализированы функциональные зависимости для расчета структурно–механических, теплофизических и гигроскопических характеристик концентратов экстракта зеленого чая. Установлено и проанализировано влияние влажности концентратов экстракта зеленого чая и их температуры на структурно–механические, теплофизические и гигроскопические характеристики концентратов экстракта зеленого чая. Исследованы сорбционные явления при контакте концентратов

экстракта зеленого чая с водой и установлены соответствующие математические зависимости для оценки видов и энергий связи влаги с сухими веществами экстракта. Исследованы кинетические закономерности тепломассопереноса при распылительной сушке экстракта зеленого чая. Проанализированы внутренний тепломассоперенос и фазовые превращения в процессе сушки экстракта зеленого чая. Реализована математическая модель внутреннего тепломассопереноса при распылительной сушке экстракта зеленого чая с учетом свойств материала, технологических, термодинамических параметров процесса и кинетических закономерностей влагоудаления.

Практическая значимость. Исследована эффективность расхода тепловой энергии, затрачиваемой на высушивание экстракта зеленого чая с учетом термодинамических потерь тепла. В ходе комплекса теоретических и экспериментальных исследований выявлено, что эффективное обезвоживание водного экстракта зеленого чая с начальной влажностью 0,9 кг/кг при котором достигается удельная производительность по сухому порошку экстракта 0,937..1,528 кг/(м³·ч) и удельная влагонапряженность рабочего объема сушильной камеры 7,962..12,985 кг/(м³·ч) надлежит реализовывать при распылительном способе и следующих условиях:

- Начальная (исходная) температура водного экстракта зеленого чая 293..318 К;
- Начальная (исходная) температура нагретого воздуха – сушильного агента 443..503 К;
- Конечная температура отработавшего сушильного агента 343..353 К;
- Способ подачи экстракта зеленого чая в сушильную камеру – распыление.
- Способ распыления – акустический, механический и др.
- Начальный (исходный) диаметр распыленных частиц экстракта зеленого чая 20..30 мкм;

- Средний характерный размер частиц сухого экстракта зеленого чая – порошка 1..6 мкм.
- Расход сушильного агента на 1 кг испаренной влаги 20кг/кг.
- Параметры воздуха рабочей зоны производственного помещения перед нагревом и подводом в сушильную камеру (ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны и СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений): температура 285..303К; влажность воздуха составляет 40..75%.

Разработана конструкция сушильной установки и получен патент на полезную модель 191126 РФ для практического внедрения.

Разработаны и апробированы в промышленности рекомендации по практическому использованию результатов проектно-технических решений и научных исследований.

ООО «БИОПОЛИМЕР-НЕО», АО «ОРЕЛПРОДУКТ», ООО «Инновационные технологии продуктов питания» ООО «ЭЛЕКТРОН» и Ассоциация Астраханских рестораторов и кулинаров внедрили и используют результаты и рекомендации диссертационной работы.

Методология и методы диссертационного исследования. Комплекс общенаучных и частнонаучных (абстрактно-логический метод, эмпирический метод, статистико-вероятностный метод, моделирование и др.) методов познания являлись методологической основой исследования.

Теоретико-методологической базой для исследований являлись основополагающие труды ученых в области теории и техники сушки, в частности, работы А.В. Лыкова, А.С. Гинзбурга, Б.С. Сажина, В.И. Попова, И.Т. Кретьева и др.

Цель исследования достигнута, благодаря анализу и обобщению, применению аналитических и эмпирических методов изучения тепломассопереноса, на баоснове известных достижений и работ в области обезвоживания материалов, положениям которых соответствуют выводы и рекомендации, представленные в работе.

Исследование процессов сушки и свойств концентратов зеленого чая выполнялось с использованием известных методик на экспериментальных установках. Тестирование и апробация результатов производились в опытно-промышленных условиях и на промышленных установках.

Полученные уравнения адекватны экспериментальным данным, что подтверждается статистической обработкой результатов измерений. Методическое обеспечение и предложенные в результате исследований конструкторские решения не противоречат известным апробированным методикам рационального проектирования и конструирования аппаратов. Комплекс экспериментов и реализация физико-математической модели процесса сушки проводилась с использованием современных компьютерных программ, приборов и оригинальных опытных установок.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты экспериментально-аналитических исследований теплофизических, структурно–механических и гигроскопических характеристик концентратов экстракта зеленого чая;
- результаты экспериментально-аналитических исследований механизма теплопереноса и кинетических закономерностей процесса распылительной сушки экстракта зеленого чая;
- результаты математического моделирования внутреннего теплопереноса при распылительной сушке экстракта зеленого чая;
- конструктивные особенности установки распылительной сушки.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, их достоверность. Содержащиеся в работе научные положения, выводы и рекомендации основываются на фундаментальных физических законах и не противоречат им. Они хорошо согласуются с теоретическими концепциями, общепринятыми в данной области исследований. Достоверность исследований и результатов проведенных исследований базируется на использовании апробированных математических методов. Полученные расчетные соотношения подвергнуты тщательной

экспериментальной проверке. Расчет средней относительной ошибки не превышает 12-15%. Все научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в диссертации, обоснованы и подтверждены экспериментальными исследованиями и материалами, которые полностью соответствуют данным опытов.

В работе использованы современные методики экспериментальных исследований, методы и средства проведения измерений. Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается глубокой проработкой литературных источников по теме диссертации, постановкой необходимого числа экспериментов, применением современных инструментальных методов анализа, публикацией основных положений диссертации. Для математической обработки результатов исследований использованы прикладные компьютерные программы.

Апробация результатов. Материалы и отдельные результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались 61-ой, 62-ой, 63-ей, 64-ой Международных научных конференциях научно-педагогических работников Астраханского государственного технического университета (Астрахань, 2017-2020гг.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 5 статей в журналах рекомендованных ВАК РФ, получен 1 патент РФ.

Автор искренне благодарен научному руководителю, доктору технических наук Максименко Юрию Александровичу за оказанную помощь, консультации и ценные замечания, сделанные при выполнении диссертационной работы, а также выражает признательность коллективу кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» за поддержку и эффективное сотрудничество.

ГЛАВА 1. ТЕНДЕНЦИИ В ПЕРЕРАБОТКЕ СЫРЬЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ: ХАРАКТЕРИСТИКА СЫРЬЯ И ПРОДУКТОВ, ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА

1.1 Общая характеристика сырья растительного происхождения и сухих дисперсных растительных материалов

Переработка растительного сырья имеет важное значение в биотехнологии, пищевой, кормовой и других отраслях промышленности. Химический состав сырья определяет способ его переработки и пути дальнейшего использования в различных областях жизнедеятельности и производствах.

Сырьевые материалы растительной природы применяются напрямую в качестве продуктов питания, а также как вкусоароматические премиксы при выработке пищевых продуктов. С целью выработки специфической продукции функционального назначения с лечебно-профилактическими свойствами или диетического характера, в частности, биологически активных веществ и премиксов (БАВ или БАД) целесообразно использование, кроме плодоовощного сырья, растений с лекарственными свойствами и экстрактов из них варьируемой функциональной ориентации.

Субстанции органической и минеральной природы в растительном сырье обуславливают его биологическую и питательную ценность. В основном в сырьевые материалы растительной природы включены углеводные комплексы, которые являются в пищевых продуктах основными энергетическими источниками. К тому же растения служат поставщиками пищевых волокон, являющихся композицией неперевариваемых углеводных, инулиновых комплексов, гемицеллюлозы и клетчатки.

Применение скоропортящихся, обуславливающих необходимость разработки особых условий транспортирования и хранения, материалов растительной природы с повышенным влагосодержанием в биотехнологиях

лимитировано по причине сложности организации технологического потока и, как следствие, повышения себестоимости готовой продукции и рисков при ее выработке и реализации.

Пищевые растительные продукты в процессе хранения претерпевают различные биохимические, микробиологические и ферментативные изменения, приводящие к порче. Эффективным средством подавления роста микроорганизмов и снижения ферментативной активности является обезвоживание продуктов. Сырьевые материалы растительной природы являются структурно сложным объектом влагоудаления. Основную долю в сухом остатке сырья растительной природы имеют углеводные комплексы, определяющие в первую очередь интенсивность и механизм обмена теплом и массой при удалении влаги, а также определяют консистенцию и вкусовые показатели. Белковые составляющие при обезвоживании могут денатурировать. Полифенольные компоненты обладают большой биоактивностью и обуславливают формирование цветовой гаммы, аромата и вкуса. Витамины термолабильны. Минеральные вещества устойчивы к термовоздействию и при сушке сохраняются.

Итак, индустриальное и экономически обоснованное влагоудаление из сырьевых материалов растительной природы без существенного снижения качественных параметров является сложной, но актуальной научно-технической задачей.

Значительное внимание уделяется производству сухих соков, специй, приправ, а также выпуску сухих экстрактов из трав, плодов, ягод, специй, частей деревьев и кустов и др. Применение сухих порошковых форм длительного хранения, экономически оправдано и технологически рационально и позволяет упростить процессы хранения, подготовки сырья и полуфабрикатов к производству. Обезвоженные экстракты растительной природы широко применяются при получении лекарственных препаратов. К тому же, материалы переработки сырья растительной природы используют в косметической, парфюмерной и медицинской отраслях промышленности.

В ходе выполнения диссертационной работы в качестве объекта обезвоживания/переработки рассматривался: экстракт зеленого чая. Показатели качества сухого экстракта зеленого чая соответствуют требованиям ГОСТ Р ИСО 6079-2012 «Чай растворимый. Технические условия», ГОСТ 32593 —2013 «Чай и чайная продукция», Требованиям ТР ТС 021/2011 (Технический регламент Таможенного союза о безопасности пищевой продукции) и нормативам к растительным экстрактам и сырью по СанПин 2.3.2.1078-01.

1.2 Перспективы производства и области использования сухих дисперсных материалов из растительного сырья

В настоящий момент развития АПК РФ существенное внимание обращают на нетрадиционные оригинальные технологии обработки сырьевых материалов растительной природы, получение концентрированных и высушенных пищевых материалов. Практическая реализация и эффективное функционирование подобных технологических потоков лимитируется недостатком комплексного системного изучения поставленных проблем, надежных методов и агрегатов для обезвоживания. Повышение интенсивности при снижении энергоемкости процедуры влагоудаления является важной задачей по причине того, что эта операция в основном обуславливает себестоимость готовой продукции и, к тому же, в значительной степени определяет ее качественные параметры.

Кроме производства традиционных концентратов и сухофруктов, в настоящий момент, перерабатывающая индустрия насыщает рынок широким спектром высушенных материалов растительной природы, в частности, порошковые специи, соковые и чайные изделия, травяные и плодово-ягодные экстракты, вытяжки из частей деревьев, кустов, листьев, цветов и т. п. Применение на пищевых производствах в виде сырьевых материалов и премиксов высушенных продуктов растительной природы дает возможность увеличить ассортимент вырабатываемых продуктов с повышенной

питательной и биологическую ценностью и повысить эффективность реализуемых технологий.

Продукты, получаемые в результате переработки растительного сырья традиционно используются при производстве продуктов быстрого приготовления, пюре, концентратов, джемов, соков и напитков, конфитюров, киселей, муссовсоусов, выпечки, , приправ, специй, диетических препаратов, десертов, молочных и кисломолочных продуктов, продуктов спортивного и специального питания, биологически-активных добавок и др., а также востребованы в фармацевтике, парфюмерии, косметике и других областях.

Кроме обеспечения функционального характера продукции, применение компонентов растительной природы дает возможность обеспечить замену химических премиксов, красителей, усилителей вкуса и ароматизаторов.

Популярным направлением использования сухих экстрактов является производство различных тонизирующих напитков, чайных и кофейных смесей. Обезвоженные экстракты растительного происхождения являются первостепенным ингредиентом в рецептурном составе ряда природных лекарственных и гомеопатических препаратов. Дополнительно следует отметить широкое применение экстрактов в пищевой промышленности, в частности, при производстве алкогольных и безалкогольных напитков для улучшения органолептических показателей товарной продукции.

Маркетинговый анализ внешнего и внутреннего рыночного оборота плодовой, ягодной и овощной консервной продукции, концентрированных изделий и др. приведен в ряде опубликованных результатов исследований, к примеру, интересны данные Компании Index Vox, которые показывают актуальность и перспективность расширения перерабатывающих предприятий.

Расширению ареала применения, изучению позитивных параметров и состава нетрадиционных видов сырьевых материалов растительной природы посвящено множество опубликованных результатов исследований [121, 122, 127, 156, 176, 177, 178, 180, 208, 209, 210, 211].

Обширное использование порошковых материалов, как компонентов и премиксов для повышения биологической ценности пищевых продуктов определяется их природным происхождением, а также тем, что они оказывают позитивное влияние на качественные показатели и сохранность продуктов [2, 22, 47, 66, 86, 176, 177, 178, 209, 210, 211, 221, 222]. Подтверждение актуальности и перспективности индустриального получения экстрактов растительной природы можно найти в множестве научных и опытно-конструкторских исследованиях по рецептурной компоновке материалов массового спроса [2, 32, 204, 208, 209, 210, 211, 216, 221, 222, 226], совершенствованию технологий [6, 43, 49, 66, 127, 152, 156, 70, 178, 180] и технологического оборудования [9, 17, 38, 53, 54, 97, 124, 134].

1.3 Общая характеристика чая зеленого и экстракта зеленого чая

Чай зеленый – род вечнозеленых кустарников или деревьев семейства чайных. Для употребления самой большой ценностью пользуются листья и почки куста, которые предварительно высушивают по специальной технологии для обеспечения максимальной сохранности уникального состава растительного сырья. Второй по популярности и объемам потребления людьми жидкостью, естественно, после воды, является чай и более чем для 2 миллиардов людей чай признается основным напитком [216].

Чайный лист выращивают больше чем в 40 странах, причем более половины всего объема производят в Китае и Индии. Кроме данных стран, Индонезия, Шри-Ланка и Япония относятся к основным экспортерам. [229].

Так как чай – субтропическая культура, то в РФ он получил преимущественное распространение в южных регионах [216].

Импорт чая в Россию осуществляют более 400 компаний, на долю ТОП-10 импортеров чая приходится свыше 70% всего объема поставок [229].

Рынок чая консолидируется последние 5 лет. В настоящее время в России продажи чая осуществляют около 100 производителей и поставщиков. Более 75% рынка контролируют 5 компаний: «Орими Трейд», «Компания

«Май», «Unilever», «Ахмад» и «Сапсан». В меньших объемах переработкой чая занимаются следующие предприятия: ОАО «Мацестинский чай», ОАО «Солохаульский чай», ЗАО «Дагомыс-чай», ЗАО «Хоста-чай» и др. Данные предприятия специализируются на выпуске байхового чая (черный и зеленый) всех торговых сортов [216].

На российском рынке чая отмечается высокая концентрация производства, лидируют транснациональные корпорации. Основными производителями, которые специализируются на переработке импортного сырья являются: ООО «ОРИМИ» (Ленинградская область), ООО «ЮНИЛЕВЕР РУСЬ» (г. Москва), КОМПАНИЯ «МАЙ» и ООО «ЯКОВЛЕВСКАЯ ЧАЕРАЗВЕСОЧНАЯ ФАБРИКА» (Московская область) [13].

Таблица 1.1 - Содержание групп веществ в свежем листе чая зеленого

Экстрактивные вещества, %	36,2
Сумма фенольных соединений, %	17,8
Кофеин, %	≈ 2,5
Хлорофилл, мг/г к сух. масс.	≈ 5,7
Пектиновые вещества, %	10,58
Сумма свободных аминокислот, мг/%	979

В свежем чае присутствует более 300 различных химических соединений, сочетание которых уникально. В таблице 1.1 представлено содержание групп веществ в свежем листе зеленого чая [215, 216].

В свежем зеленом чае до 52% присутствуют нерастворимые в воде вещества (протеины, хлорофилл пигменты, жиры, клетчатка, крахмал, пектины), так и водорастворимые (простые фенолы, полифенолы, сахара, витамины, минералы, аминокислоты) и кофеин. В чае содержится около 20 аминокислот: тирозин; аргинин; теанин; гистидин; треонин; аспарагиновая кислота; глютаминовая кислота; серин; глицин; пролин; аланин; метионин; изолейцин; валин; лейцин; лизин; фенилаланин и др. Кроме того, в составе

свыше 20 макро- и микроэлементов и около 100 вкусоароматических соединений (политерпены, эфирные масла, секвитерпены, монотерпены и др.), более 30 полифенолов (танины, катехины, галловая кислота и др.), пигменты (каротин, ксантофилл, теарубигин, тиофлавин, хлорофилл и др.), алкалоиды пуринового типа (кофеин, теофиллин, диуретин, теобромин), смолы, органические кислоты (яблочная, щавелевая, лимонная и др.), витамины и более 10 ферментов (каталаза, пероксидаза, полифенолоксидаза, инвертаза и др.) [195]. В таблице 1.2 представлен химический состав свежих листьев зеленого чая [18].

Таблица 1.2 – Данные по химическому составу зеленого чая, %

Доля фитохимических компонентов, %	%
Доля алкалоидов	1-4
Доля дубильных компонентов	15-30
Доля флавоноидов	Стеролы
Доля макро- и микроэлементов	4-7
Доля эфирных масел	0,08
Доля белков и аминокислот	25

Благодаря богатому и уникальному спектру биологически активных соединений чай является полезным напитком и оказывает благоприятное действие на пищеварительную и сердечнососудистую системы организма и при употреблении снижает риск развития онкологических заболеваний.

Применение экстракта чая в качестве витаминно-минеральной добавки позволяет оптимизировать химический состав мучных кондитерских изделий, хлебобулочных изделий, продуктов быстрого приготовления на основе зернового сырья и т.д. [195].

Чай и экстракт чая, в том числе сухие формы активно используются при создании функциональных напитков в качестве основы, что экономически целесообразно и оправдано, поскольку чай имеет наибольшее распространение в бытовой жизни современного человека. [229]. Для промышленного изготовления безалкогольных напитков используют чайный

порошок – экстракт чая, растворимый в воде, получаемый методом сушки. Многие компании, конкурируя, с целью придать напитку необычные неповторимые запах и вкус, разрабатывают смеси экстракта зеленого чая с экстрактами других растений, фруктов и ягод. В чай рекомендовано добавлять различные экстракты медицинских растений, в том числе для того, чтобы скрыть их послевкусие (например, мяту, ментол, эхинацею, эвкалипт, корицу). Экстракт зеленого чая применим как основа напитков с повышенным содержанием витаминов, минералов и других функциональных компонентов.

Всё большую популярность получают функциональные батончики и ряд других продуктов, в компонентный состав которых включают сухой чай в качестве биологически активной добавки и обогащающего физиологического компонента. Сухие экстракты из чайного листа используют также при обогащении молочных и кисломолочных продуктов, приготовлении алкогольных напитков, сокосодержащих напитков и нектаров.

Анализ международных маркетинговых исследований показывает, что в ближайшие несколько лет рост сектора функциональных напитков и продуктов для поддержания спортивной, физической и психической формы вырастет на 40% [229].

Так как сухой экстракт чая обладает антиоксидантным, дезодорирующим, консервирующим действием и способен связывать свободные радикалы и уменьшать интенсивность процессов перекисного окисления липидов, то его активно используют в фармацевтике в качестве тонизирующего, витаминного средства и при профилактике онкозаболеваний.

В косметологии чай применяют в средствах для улучшения кожи, экстракт способствуют омолаживающему эффекту, обладает регенерирующим действием. Популярным направлением использования экстракта чая является производство шампуней, бальзамов, масок и т.д.

Экстракты целесообразно производить из свежего листа, как сортового, так и некондиционного чая, а также из вторичных ресурсов чайной промышленности (волоски, черешки, пластинки чая) [186].

Таблица 1.3 - Химический состав экстракта зеленого чая

Фитохимические вещества	%
Кофеин	6,01
Белки и аминокислоты	25
Дубильные вещества	21,7
Эфирные масла	0,08
Макро- и микроэлементы	4-7
Минеральные вещества	12,3

В состав сухого экстракта зеленого чая входят разнообразные биологически активные вещества, в том числе фенольные соединения или танино-катехиновая смесь (ТКС), теобромин, кофеин, теofilлин, витамины (Р, С, В 1, В2, К, U, РР и др.), эфирные масла [187]. Химический состав сухого порошка экстракта зеленого чая представлен в таблице 1.3 [195].

Итак, можно заключить, что зеленый чай является популярным продуктом, а сухая порошковая форма экстракта зеленого чая перспективна для промышленного производства и использования в пищевой промышленности, фармацевтике и косметологии.

1.4 Анализ современных технологий переработки сырья растительного происхождения

Технологические подходы к производству высушенных экстрактов растительной природы посредством варьируемых способов влагоудаления достаточно подробно проработаны и широко применяются. Для проведения операции удаления влаги реализуют сушильные агрегаты с конвективным энергоподводом к плотному, аэрофонтанному, псевдооживленному слою материала. Перспективно также комбинирование способов подвода тепловой энергии посредством применения, в частности, микроволнового или инфракрасного излучения, что дает возможность повысить качественные параметры обезвоженных материалов при возможном росте энергетических и эксплуатационных затрат при сушке [4, 9, 13, 27, 38, 91, 206, 218]. Очевидно, что практическая реализация технологий обезвоживания предопределяет

комплексный технико-экономический анализ, как самого процесса, так и вспомогательных операций.

Экстракты растительного происхождения могут быть в жидком и концентрированном виде (сгущенные), в зависимости от типа экстрагента на водной, спиртовой, водоспиртовой или эфирной основе. Традиционно экстракты представляют собой вязкие жидкости или сухие массы. В зависимости от количества экстрагента оставшегося в готовом экстракте различают: жидкие, густые и сухие экстракты (до 5% влаги). Сухие экстракты – рациональный тип экстрактов [182, 207, 218]. Стандартизация сухих растительных экстрактов осуществляется по следующим показателям: содержание влаги; содержание действующих веществ; содержание тяжелых металлов. Сухие экстракты делят на экстракты: с не лимитированным и с лимитированным верхним пределом действующих веществ.

Типовой технологический процесс получения сухих экстрактов складывается из следующих стадий: подготовительные работы (измельчения сырья, просеивание сырья, дозировка, подготовка экстрагента и др.); основные технологические процессы (получение экстракта, очистка, выпаривание и сушка экстракта); стандартизация (доведение до стандарта, анализ); стадии фасовки, упаковки, маркировки; рекуперация экстрагента из отработанного сырья и др.

Извлечение из сырья может быть получено методами: перколяции; реперколяции; дробной мацерации; непрерывным противоточным экстрагированием и др. Для очистки извлечений используют кипячение, адсорбцию, спиртоочистку и др. Выпаривание на производствах проводят преимущественно в вакуум-выпарных установках для снижения температуры кипения сгущаемой жидкости и сохранения качественных показателей.

Технология сухих экстрактов включает те же стадии, что и технология густых экстрактов. Отличие составляет дополнительная стадия – сушка. С учетом заданных производительности и качественных параметров готовых экстрактов эффективное обезвоживание экстрактов на водной основе может

осуществляться как в распыленном состоянии, так и в кондуктивных вакуумных сушильных агрегатах. Такие способы дают возможность устранить перегрев сухого продукта и, минимизировать падение качественных показателей.

Таким образом, обобщая современные подходы к переработке сырья растительного происхождения, можно сделать вывод, что, несмотря на разнообразие сырья, конечных товарных форм, последовательности операций и специфики производств, для подавляющего большинства технологий характерно использование стадии сушки, которая является наиболее энергоемкой и определяет эффективность производства. Для всех технологий следует отметить высокие требования к получаемым конечным продуктам, что обуславливает деликатный подход к организации стадии сушки с учетом технологических ограничений и комплекса свойств объектов переработки.

Вопросам разработки и совершенствования технологий получения экстракта зеленого чая посвящено большое количество научно-исследовательских работ [13, 18, 186, 187, 195, 215, 216, 229]. Несмотря на различные технологические приемы при приготовлении настоя, для организации процесса сушки экстракта исследователи рекомендуют применять распылительную технологию сушки.

Обобщая результаты исследований ряда авторов [13, 18, 186, 187, 195, 215, 216, 229] и учитывая производственный опыт для получения сухого экстракта зеленого чая применялась технологическая цепочка, состоящая из таких этапов как, диспергирование сырьевых материалов, подготовительные процедуры для экстрагента (водоподготовка, очистка воды); выработка первой вытяжки (экстракция 1); выработка второй вытяжки (экстракция 2); гравитационное осаждение; фильтрование; вакуумное упаривание и сушка.

Технология была промышленно реализована в ООО «Инновационные технологии продуктов питания» (приложение 2). Образцы порошков распылительной сушки различного дисперсного состава получены в ходе экспериментальных работ на опытно-промышленных установках ФГУП

«Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», а также на экспериментальных установках кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет».

1.5 Анализ перспективных способов и конструкторских решений для производства сухих дисперсных материалов из растительного сырья

С целью практической организации операции влагоудаления для выработки высушенных диспергированных продуктов растительной природы используют распылительные агрегаты и установки для сушки в плотном, псевдокипящем, аэрофонтанном слое материала. Такие типы аппаратов сравнительно технически совершенны, что обусловлено наличием развитой научно-технической и машиностроительной базы.

Конструкторские особенности агрегатов для обезвоживания в распыленном состоянии определяются производительностью, технологическими параметрическими требованиями и ограничениями процедуры влагоудаления, увязанными с, физико-химическими характеристиками объекта сушки, требованиями к организации операции диспергирования, в частности к параметрам факела распыливания и др.

При операции обезвоживания в диспергированном состоянии частицы материала сохнут при контакте с потоком теплоносителя, при этом резко увеличивается и постоянно обновляется поверхность фазового взаимодействия, что обуславливает рост скорости тепло- и массопереноса внутри фаз и обмена энергией и веществом на границе их раздела. Сушка в распыленном состоянии имеет ряд позитивных сторон по отношению к другим способам удаления влаги. К ним можно причислить высокие качественные и потребительские показатели порошка (тонкодисперсность, большая степень растворимости и др.), к тому же, в таком варианте минимизируется перегревание продукта по причине малого времени процесса и интенсивного парообразования с отнятием тепла от капель.

В настоящий момент широко применяются следующие способы организации обезвоживания в диспергированном состоянии материала: противоток контактирующих фаз, форсуночное диспергирование, осевое завихренное при закручивании поступление теплоносителя и форсуночное диспергирование, тангенциальное поступление теплоносителя при варьировании способов диспергирования, противоток фаз при сопловом подведении теплоносителя, противоточные закрученные потоки теплоносителя и материала и др.

Методы диспергирования жидких сред обычно классифицируют по признаку: организации подведения тепловой энергии на распыление. Выделяют ряд методов, в частности, механический, гидравлический и электрогидравлический, пневматический, ультразвуковой, пульсирующий (при пульсациях напора и варьировании расхода материала) и др.

К негативным сторонам сушки в распыленном состоянии можно причислить:

- Большие удельные габаритные размеры агрегатов по причине того, что диаметр зоны сушки обусловлен параметрами факела распыливания и поточными расходами, а ее высота обусловлена аэродинамической обстановкой при фазовом контакте.

- Большая стоимость, обусловленная конструктивной сложностью распылительных узлов и оборудования для улавливания сухого материала, а также необходимость аспирации.

- Относительно большая общая энергоемкость всей установки.

Далее приведена обзорная информация по ряду перспективных конструкций агрегатов, разработанных для исключения или минимизации указанных выше негативных сторон распылительного обезвоживания.

Представляет интерес сушилка типа ВЗП (встречные закрученные потоки) с инертным носителем [144], позволяющая повысить производительность сушки (рисунок 1.1). Высушиваемый продукт подается форсунками на частицы инертного носителя, высушивается и отделяется от

поверхности носителя. Сухой продукт отводится из зоны сушки либо через затвор внизу камеры, либо с потоком отработанного сушильного агента. Часть частиц продукта поступает в установку акустической обработки пыли в циклон, рукавный фильтр и далее на транспортер.

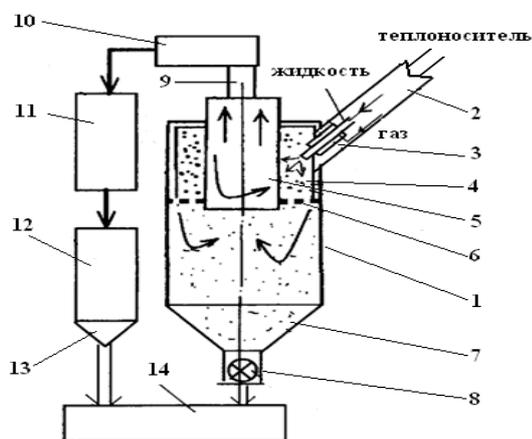


Рисунок 1.1 – Агрегат с инертным носителем распылительного типа ВЗП

1 – обечайка; 2- сопловые элементы; 3 – форсуночные узлы; 4 – инертная насадка; 5 – осевой газопровод; 6 – распределительная решетка с перфорациями; 7 – бункерный узел; 8 – затвор; 9 – труба; 10 – акустический узел; 11 – циклонная установка; 12 – фильтр рукавный; 13 – бункерный узел; 14 – конвейер

Распылительная сушилка с инертной насадкой [139], позволяет повысить удельную производительность сушки (рисунок 1.2). Установка содержит камеру с газораспределительной решеткой для размещения псевдооживленного слоя инертных тел, отбойник многоступенчатой конструкции для очистки инертных тел от материала. Отбойник выполнен в виде системы струн, расположенных по сечению камеры. Струны могут быть закреплены в камере с образованием геометрически правильных фигур или лучеобразно для обеспечения равномерной перфорации и линейности сопротивления отбойника.

Интенсифицировать процесс сушки жидких продуктов способна установка для вихревой распылительной сушки [142]. Установка (рисунок 1.3) содержит, по крайней мере, пару вихревых камер, сопряженных между собой с образованием при сопряжении переточного окна.

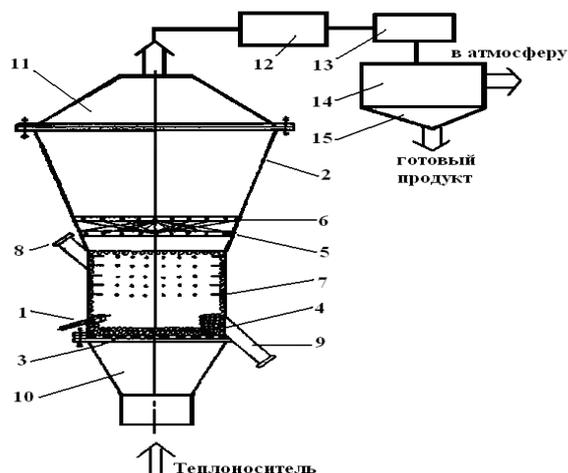


Рисунок 1.2 –Агрегат с инертными носителями:

1 –форсуночные элементы; 2 – обечайка; 3 –решетка для газораспределения; 4 – инертная насадка; 5, 6 – ободы; 7 – отбойный узел; 8, 9 – штуцеры; 10 – коробчатый узел; 11 – крышка; 12 – узел акустической обработки; 13 – циклонная установка; 14 –фильтр рукавного типа; 15- бункерный узел

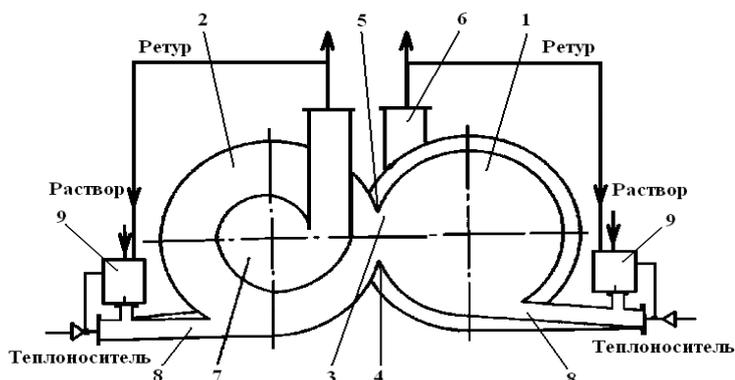


Рисунок 1.3 – Вихревой распылительный агрегат:

1, 2 – вихревые отсеки; 3 – сопряжение; 4,5 – гребневые элементы; 6,7 – улитки; 8 – штуцер; 9 – узел для подведения исходного материала

Сушилка (рисунок 1.4) кипящего слоя с инертной насадкой [149], содержит сушильную камеру с газораспределительной решеткой, форсунку и вибрирующие пластины вибрационного механизма, установленные в корпусе с возможностью поворота относительно осей. На пластинах в шахматном порядке жестко и под углом к пластинам закреплены дополнительные пластины разной длины для эффективной очистки инертных тел от обезвоживаемого материала.

Для повышения качества сушки и предотвращения налипания материала на стенки камеры разработана вихревая сушилка (рисунок 1.5) [140].

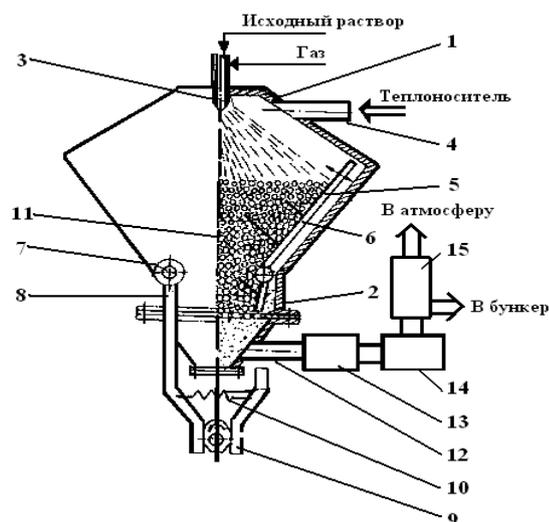


Рисунок 1.4 – Агрегат с псевдокипящим слоем инертных тел:

1 – обечайка; 2 – решетка для газораспределения; 3 – акустический форсуночный узел; 4 – штуцеры для подведения сушильного агента; 5 – инертные тела; 6 – вибрирующие пластинчатые элементы; 7 – вал; 8 – штанговые элементы; 9 – кулачок; 10 – пружина; 11 – добавочные пластинчатые элементы; 12 – штуцер для отведения сушильного агента; 13 – акустический узел; 14 – циклонная установка; 15 – фильтр рукавного типа

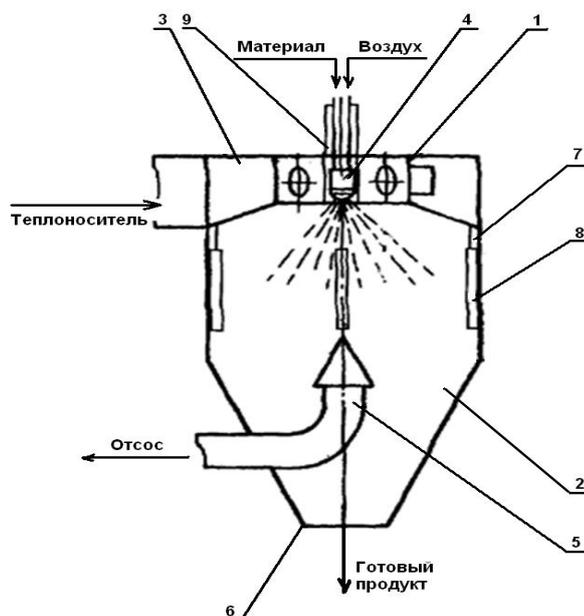


Рисунок 1.5 – Распылительный агрегат вихревого типа:

1 – цилиндрический элемент; 2 – обечайка; 3, 5, 6 – штуцеры; 4 – распылительный узел; 7 – сопловые элементы щелевого типа; 8 – лопатки; 9 – корпус распылительного узла

Интерес представляет камера сушки (рисунок 1.6), которая позволяет увеличить производительность, в том числе за счет снижения потерь высушенного материала [151].

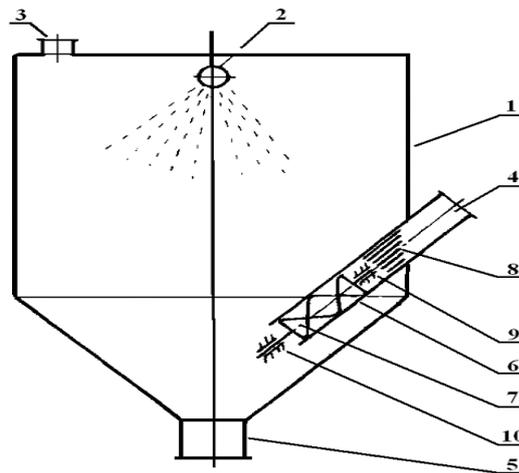


Рисунок 1.6 – Камера распылительной сушики:

1 – цилиндрический резервуар; 2 – форсуночный узел; 3 – входной штуцер; 4 – выходной штуцер для теплоносителя; 5 – выгрузочный штуцер для готового продукта; 6 – трубопровод; 7 – спиральная лента; 8 – щели продольные; 9 и 10 – подшипниковые узлы

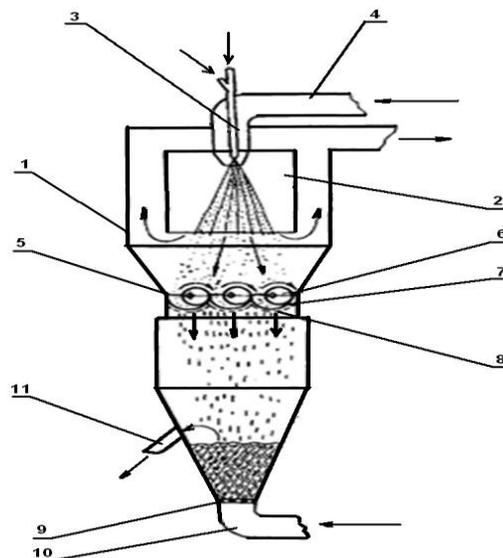


Рисунок 1.7 – Распылительный сушильный агрегат:

1 – обечайка; 2 – распылительный отсек; 3 – акустический форсуночный узел; 4 – верхний распределитель газовой среды; 5 – гранулирующий узел; 6 – валки эксцентриковые; 7 – лотки профильные; 8 – сетка; 9 – решетка для газораспределения; 10 – нижний распределитель газа; 11 – течка для отведения гранулированного материала

Практический интерес представляют многочисленные конструкторские решения в области техники сушики в диспергированном состоянии разработанные под руководством Кочетова А.С. [129, 130, 131, 132, 135, 137, 138, 140, 141, 142, 144, 149, 150, 173]. Разработанная Кочетовым А.С. и соавторами распылительная сушилка, изображенная на рисунке 1.7, позволяет повысить производительность процесса.

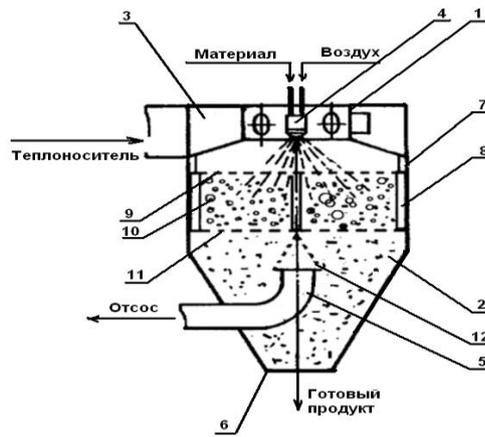


Рисунок 1.8 – Вихревая распылительная сушилка с инертной насадкой.

1 - цилиндр, 2 – сушильная камера, 3, 5, 6 – патрубки, 4 – распылитель, 7 – щелевые сопла, 8 – лопатки, 9, 11 – перфорированные решетки, 10 – насадка, 12 – козырек

Повысить экономичность и качество сушки путем предотвращения налипания материала на стенки камеры позволяет вихревая распылительная сушилка с инертной насадкой, разработанная Кочетовым А.С. и соавторами. В сушильной камере (рисунок 1.8) с хордально размещенными сопла для подачи нагретых газов, оси которых расположены по касательной к мнимой окружности, и распылитель, установленный по оси камеры.

Распылительная сушилка [162] позволяет получать разреженный поток диспергированного материала равномерной объемной плотности и осуществлять равномерное высушивание продукта по всему объему аппарата (рисунок 1.9).

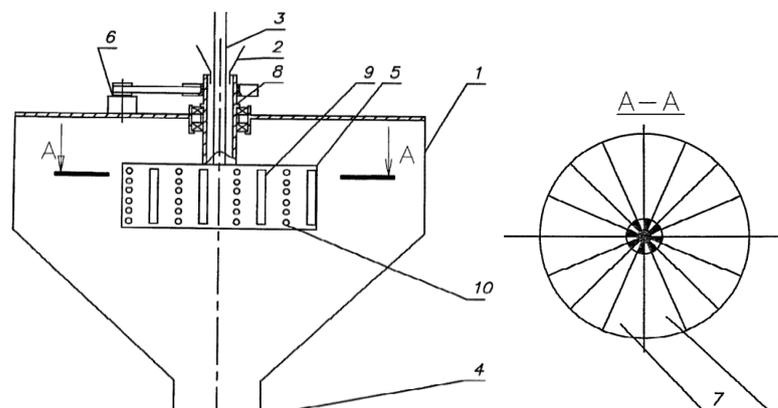


Рисунок 1.9 – Распылительная сушилка:

1 – сушильная камера; 2 – устройство загрузки продукта; 3 – устройство подачи сушильного агента; 4 – устройство выгрузки; 5 – цилиндр; 6 – привод; 7,8 – секторы; 9, 10 – окна

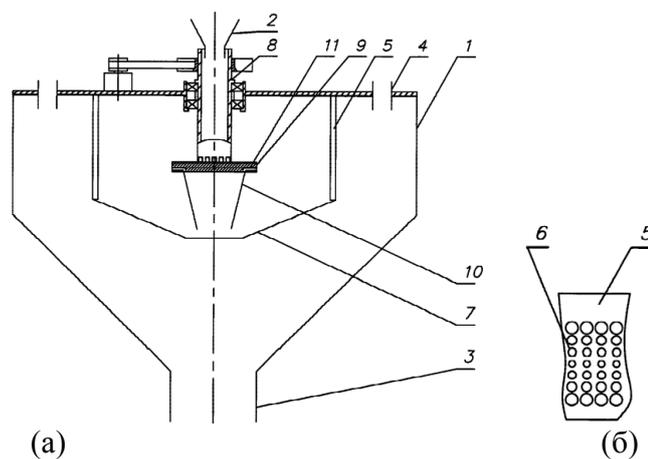


Рисунок 1.10 – Распылительный сушильный агрегат (а), часть развертки отражателя (б):
 1 – обечайка; 2 – загрузочный узел для материала; 3 – разгрузочный узел; 4 – штуцер для подвода сушильного агента; 5 – отражательный элемент с перфорацией; 6 – отверстия; 7 – конический приемный узел; 8 – приводной вал; 9 – дисковый элемент; 10 – насадка; 11 – радиальные каналы

Распылительная сушилка [160] также позволяет получать разреженный поток диспергированного материала равномерной объемной плотности (рисунок 1.10). Для получения равномерного распределения объемной плотности материала в сушилке, площади отверстий в рядах увеличиваются по нормальному закону от плоскости диска 9 вверх и вниз.

Проведен анализ рынка распылительной сушильной техники. Следует отметить, что имеется большое количество предложений по моделям сушилок и данный тип оборудования активно внедряется в пищевой, химической, фармацевтической и других отраслях промышленности. В зависимости от области применения и производительности, выпускаемые аппараты можно классифицировать на три группы:

1) Лабораторные и опытно-промышленные сушилки (в качестве примера, рисунок 1.11). Производительность по испаренной влаге до 5 кг/ч. Они изготавливаются как сериями, так и по индивидуальным проектам. Нагревание сушильного агента проводится, в основном, путем подвода электрической энергии. Лабораторные стенды снабжены программно-аппаратными комплексами для осуществления варьирования режимных параметров и управления протеканием операции. Возможно из применение

для обезвоживания варьируемых по составу и происхождению жидких сред в широком температурном интервале 90 .. 300 °С и пределах варьирования размеров дисперсных частиц от 10 до 150 мкм.

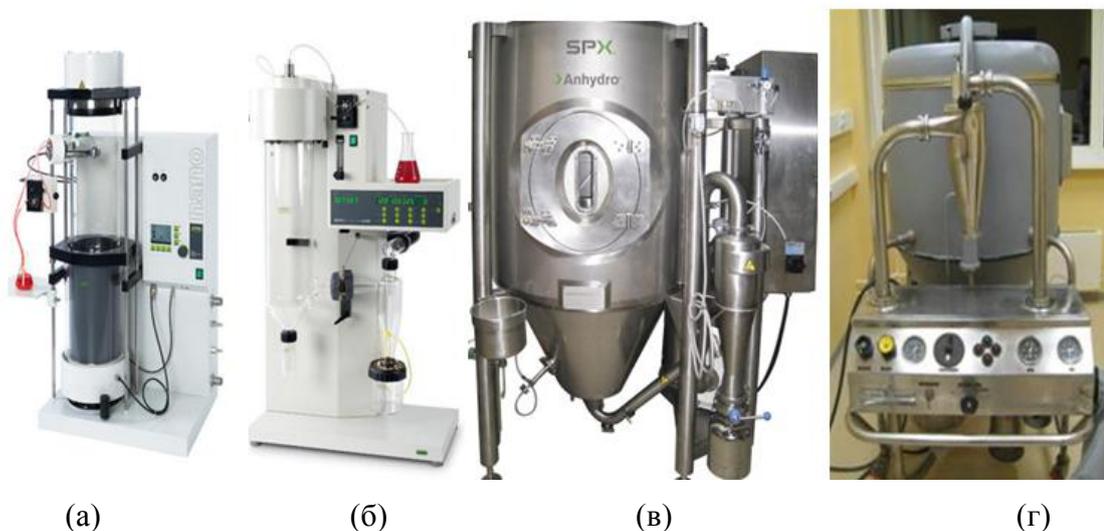


Рисунок 1.11 – Nano Spray Dryer B-90 (Buchi, Швейцария) (а); Mini Spray Dryer B-290 (Buchi, Швейцария) (б); Сушилка МикраСпрей (Ангидро, Дания) (в); Minor Spray Dryer (Niro, Дания) (г)

2) Распылительные сушилки (например, рисунок 1.12) для оснащения предприятий малой и средней мощности. Изготавливаются по техническому заданию, согласованному с заказчиком. При проектировании учитываются свойства высушиваемого материала, материал элементов конструкции, требования к конечному сухому порошку и т.д. Производительность по испаренной влаге 5 .. 100 кг/ч.



Рисунок 1.12 - Распылительные сушилки: (а) – YC-015A (HONGSEN, Китай) и (б) – сушилка Riera Nadeu SA (Испания)

3) Установки для крупнотоннажных производств, которые изготавливаются по индивидуальным проектам и входят в состав производственных технологических линий. Примеры: сушки послеспиртовой барды; обезвоживание дрожжевой суспензии с получением кормовых дрожжей на спиртзаводах; сушка молока и продуктов переработки молока на крупных молокозаводах и др. (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 – Сушилка А1-ОРЧ (Калиновский машиностроительный завод, Украина) (а); сушилка ICF (ICF & Welko Spa, Италия) (б)

Ниже представлен обзор некоторых конструкций представленных на рынке оборудования.

Сушилка LPG-500 (рисунок 1.14) рекомендуется для термочувствительных материалов. После процесса сушки отсутствует необходимость отбора и сортировки материала, что позволяет уменьшить дополнительные операционные процедуры на производстве.



Рисунок 1.14 - Сушилка LPG-500 (Промышленное оборудование и спецтехника из Китая, г. Благовещенск)



Рисунок 1.15 - Сушильная установка (сушилка) распылительного типа
(Группа компаний «Родник», Россия)

Стоит отметить установки распылительной сушки, выпускаемые Группой компаний «Родник» для предприятий средней и высокой мощности (рисунок 1.15). Производительность – до 625 кг/ч по испаренной влаге.

Крупной европейской компанией по производству оборудования пищевой отрасли является «GEA». Компания располагает большим ассортиментом оборудования, в частности, установки для сушки (рисунки 1.16 и 1.17) COMPACT DRYER.

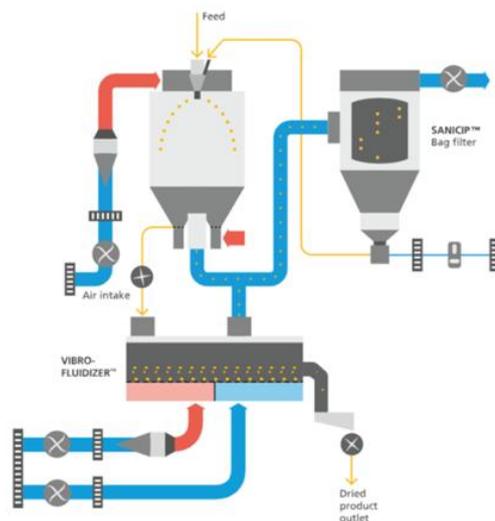


Рисунок 1.16 – Установка распылительной сушки COMPACT DRYER, модель VIBRO-FLUIDIZER (Компания «GEA»)

Интересной представляется распылительная сушилка (рисунок 1.16) со встроенным псевдоожиженным слоем. Продукт распыляется в верхнюю часть сушильной камеры при помощи комплекта форсунок или ротационной

форсунки. Сушильный агент поступает вертикально через воздушный распылитель на высокой скорости, обеспечивая смешивание с распыленными частицами. Высыхая, капли транспортируются во встроенный псевдооживленный слой на дне камеры для дополнительной сушки и далее порошок разгружается в псевдооживленный слой VIBRO-FLUIDIZER(tm) с целью окончательной подсушки и охлаждения.

Распылительная сушилка FILTERMAT (рисунок 1.17) позволяет высушивать липкие, гигроскопичные, термопластичные и медленно кристаллизующиеся молочные и пищевые продукты и получать сыпучий агломерированный порошок. В нижней части камеры FILTERMAT предусмотрен ленточный конвейер. Продукт поступает в камеру через ряд форсунок и специальный воздушный распылитель сформирует структуру воздушного потока в камере, направляя частицы вниз на ленточный конвейер. Далее порошок находится на ленте конвейера в течение нескольких минут для завершения сушки с поддержанием его необходимой температуры и охлаждения порошка.

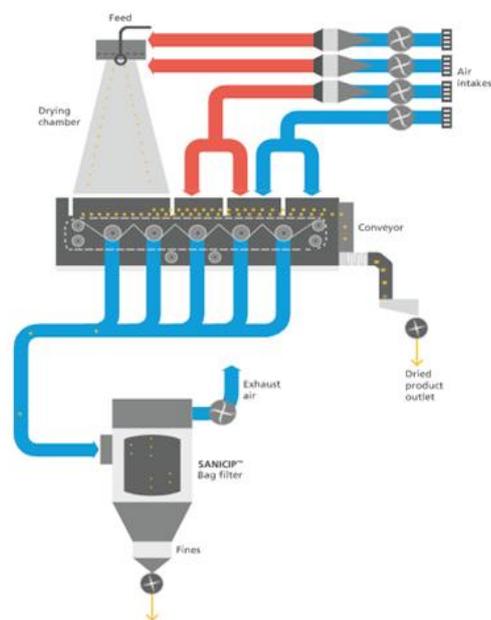


Рисунок 1.17 – Установка распылительной сушки COMPACT DRYER, модель FILTERMAT (Компания «GEA»)

Способность установки FILTERMAT поддерживать заданные температуры теплоносителя на разных этапах сушки обеспечивает точное

формирование свойств порошка и позволяет рекомендовать установку для применения при производстве различных категорий продукции и производить различные агломерированные структуры.

На кафедре «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» при участии автора предложен ряд распылительных сушилок [102,112, 113, 154].

Известно множество конструкторских разработок по проведению обезвоживания материалов в диспергированном состоянии [109, 111, 114, 115, 116, 117, 139, 154, 160, 162, 163, 168, 169, 174], которые в той или иной степени уменьшают негативное влияние известных «узких мест» технологии распыления и влагоудаления и позволяют повысить эффективность осуществления операции сушки.

Технологические и технические подходы к совершенствованию обезвоживания жидких и пастообразных продуктов в диспергированном виде для выработки порошковых материалов широко реализуются в пищевой, кормовой, химической, фармацевтической и иных индустриальных областях.

1.6 Теоретические предпосылки моделирования процесса сушки растительных продуктов

При построении модели переноса тепловой энергии и вещества в процессе сушки традиционно опираются на описывающую его [62] систему дифференциальных уравнений в частных производных, применение которой, ее анализ и адаптация к конкретному объекту обезвоживания, базируясь на развитие основных положений теории сушки дает возможность выявить и описать механизм процедуры удаления влаги и сущность явлений, наблюдающихся в продукте при нем.

Допуская, что поле давлений газовой среды, находящейся в порах материала является однородным, его температура $t_m < 100$ °С при малозначительном воздействии сил тяжести, которые можно исключить, система уравнений представляется в следующей форме [62]:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \nabla[k\nabla u + k\delta_t \nabla t], \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{\rho_0 c} \nabla[\lambda \nabla t + \varepsilon^* r^* \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau}], \quad (1.2)$$

где τ – время, с; u – влагосодержание частицы, кг/кг; k – коэффициент массопроводности, $\text{м}^2 \cdot \text{с}$; t – температура материала, $^{\circ}\text{C}$; δ_t – относительный коэффициент термодиффузии, $1/\text{K}$; ρ_0 – плотность абсолютно сухого материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; ε^* – коэффициент парообразования; c – удельная массовая теплоемкость продукта, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$; λ – его коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$; r^* – тепловая энергия парообразования связанной воды, $\text{Дж}/\text{кг}$.

Коэффициенты k , δ_t , c , ε^* , которые главным образом зависят от температуры и влагосодержания материала [62, 202] сложно адекватно оценить для правильного практического применения системы дифференциальных уравнений [202]. При расчете кинетики процесса обезвоживания с достаточной точностью определить локальный коэффициент фазового превращения ε^* , который изменяется в процессе и зависит от времени процесса возможно только при определенных модельных представлениях [202].

Как альтернатива физическому моделированию внутреннего тепломассопереноса А.В. Лыковым и Ю.А. Михайловым разработан другой принцип моделирования, который основан на положениях термодинамики необратимых процессов. В этом случае авторами предложено записывать уравнение внутреннего массопереноса в виде [62]:

$$i = -\lambda_m \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} + \delta_T^* \frac{\partial t}{\partial n} + \delta_P^* \frac{\partial P}{\partial n} \right), \quad (1.3)$$

где i – плотность потока влаги, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; λ_m – коэффициент массопроводности (термодинамический), $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{град})$; θ – потенциал массопереноса (термодинамический), $\text{Дж}/\text{кг}$; P – давление, Па; δ_T^* и δ_P^* – коэффициенты термодиффузионного и молярного массопереноса.

Для постоянных значений коэффициентов и термодинамических характеристик система дифференциальных уравнений имеет вид [62]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = K_{11} \nabla^2 T + K_{12} \nabla^2 \theta + K_{13} \nabla^2 P, \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = K_{21} \nabla^2 T + K_{22} \nabla^2 \theta + K_{23} \nabla^2 P, \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = K_{31} \nabla^2 T + K_{32} \nabla^2 \theta + K_{33} \nabla^2 P, \quad (1.6)$$

где $K_{i,j}$ – кинетические коэффициенты; T – температура, К.

При температуре материала $t_m < 100^\circ\text{C}$ система уравнений приводится к следующему виду:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = K_{11} \nabla^2 T + K_{12} \nabla^2 \theta, \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = K_{21} \nabla^2 T + K_{22} \nabla^2 \theta, \quad (1.8)$$

Системы уравнений (1.1), (1.2) и (1.7), (1.8) не противоречат друг другу, взаимосвязь между коэффициентами приведена в [62].

За потенциал массопереноса в гигроскопической области может быть принят химический потенциал [62]. Очевидным преимуществом моделирования внутреннего переноса вещества при удалении влаги с применением θ служит симметричность в математической аппроксимации закономерностей переноса тепловой энергии и массы [62, 202], причем аналогами T служит θ , теплоемкости c – изотермическая относительная влагоемкость $c_m = (\partial u / \partial \theta)_T$.

Методы моделирования с учетом термодинамики процесса развиты в трудах Л.М. Никитиной [88], где приведены термодинамические показатели переноса массы: c_m , $(\partial \mu / \partial T)_u$ температурный и термоградиентный коэффициенты $\delta^* = c_m (\partial \mu / \partial T)_u$ для множества продуктов с применением сорбционных или десорбционных изотермических равновесных кривых.

А.С. Гинзбургом [30] предложена основополагающая математическая закономерность переноса тепла и массы в плотном слое дисперсного продукта:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \nabla^2 \theta + \frac{r}{c_{np}} \varepsilon \frac{\partial u}{\partial \tau} - \frac{c_{жс} \rho_{жс}}{c_{np} \rho_c} g_{жс} \nabla \theta - \frac{c_n \rho_n}{c_{np} \rho_c} g_n \nabla \theta, \quad (1.9)$$

где ε – критерий фазового превращения; u – влагосодержание (удельное), кг/кг; r – теплота фазового перехода, кДж/кг; ∇ – оператор Лапласа; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; c_{np} , $c_{жс}$, c_n – объемная теплоемкость материала, воды и пара, кДж/(м³·К); ρ_{np} , $\rho_{жс}$, ρ_n – плотность материала, воды и пара, кг/м³.

Перераспределение вещества и тепловой энергии в фазовых взаимодействующих потоках, которые перемещаются в зоне сушки при распылительном обезвоживании является в основном вероятностным. К тому же, имеются значительные трудности при корректной оценке варьируемых размеров, структурной организации дисперсных частиц. Перемещение фазовых потоков и обмен теплом и веществом между ними проходят в нестационарных условиях, поэтому возможность использования детерминированных выражений, таких как закономерности перемещения, переноса тепловой энергии и вещества и др. для математического описания лимитированы корректностью оценки при квазистационарных допущениях при построении модели [59].

Основными задачами при построении модели распылительного обезвоживания являются:

- разработка технологии и метода обезвоживания материала в распыленном виде в зоне сушки традиционных агрегатов в варианте отсутствия или недостаточности информации об характеристиках объекта влагоудаления;
- разработка или модернизация агрегатов для обезвоживания с целью выбора рациональных режимов процесса и повышения совершенства конструктивных особенностей установок для сушки изученных объектов. Причем приоритетными задачами являются, в частности, рост производительности, снижение энергоемкости, повышение качественных показателей готовой продукции и др.;

- выбор или разработка обоснованных технических и технологических подходов для роста эффективности функционирования технологических потоков.

Для совершенствования сушильных агрегатов для обезвоживания в диспергированном состоянии необходимо владеть: информативными данными об динамических и кинетических закономерностях влагоудаления из дисперсных/частичек материала, а также информацию об их равновесных состояниях, точках перегиба в гигроскопической области при десорбции, пороговой температуре, продолжительности витания дисперсных частиц в зоне сушки.

В качестве экспериментального метода анализа распылительной технологии сушки интересной представляется методика прогнозирования качества сухого продукта и изучения кинетики сушки капель, которая разработана и активно применялась в Институте технической теплофизики (ИТТФ) НАН Украины. Проводились исследования испарения единичных капель разнообразных жидких продуктов (экстрактов, медицинских препаратов, молока и др.). Анализ разработанных математических моделей, термо- и массограмм сушки единичных капель в сравнении с результатами кино- и фотосъемки позволил получить значительный объем информации о кинетике и механизме сушки, аргументировать ряд способов сушки и др.

Группой исследователей под руководством Б.И. Леончика [59] предложено осуществлять в лабораторных условиях распылительную сушку совокупности моно- или полидисперсных «незакрепленных» капель,двигающихся по вертикальным каналам в потоке теплоносителя – сушильного агента. Таким образом, условия эксперимента были максимально приближены к реальным условиям производственного процесса. Б.И. Леончик и др. [59] обосновали перспективы использования для моделирования сушки уравнений, описывающих одно- или двухмерное движение испаряющихся капель.

Для всесторонней оценки аэродинамической обстановки в зоне сушки распылением в публикациях [23, 24] рекомендовано опираться на теоретические положения струйно-турбулентных течений. Получены уравнения, которые дают возможность определения скорости и струй и газового расхода в определенных сечениях и продолжительность нахождения капель в потоке теплоносителя.

На основе сочетания аналитических и экспериментальных методов моделирования успешно реализован комплексный подход для создания высокоэффективных режимов и аппаратов распылительной сушки в ИТТФ НАН Украины (например, испарительно-сушильных агрегатов); ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси (например, аппаратов, работающих при активных гидродинамических режимах); МЭИ (сушка распылением перегретых растворов, в среде перегретого пара и др.) [59] и др.

Развитие научно-технических положений термообработки и обезвоживания продуктов растительной природы, в частности, с использованием перегретого пара, отражено в трудах А.Н. Острикова [91-94].

Интересны с практической точки зрения кинетические модели, дающие возможность описать операцию обезвоживания пищевых материалов при варьировании способов подвода энергии [3, 21, 25, 44, 60, 175, 185, 200, 203].

1.7 Анализ литературного обзора

Для реализации процесса сушки при производстве сухих дисперсных пищевых растительных материалов применяют распылительные сушильные установки, которые имеют высокий технический уровень. Конструктивные особенности аппаратного оформления установок распылительной сушки обусловлены технологическими требованиями, физико-химическими свойствами обезвоживаемого материала, требованиями к процессу распыления и параметрам факела распыла, производительностью и т.п. Важным преимуществом распылительной сушки является эффективное обезвоживание жидких систем различной природы.

Среди недостатков распылительной технологии следует отметить:

- Большие удельные габаритные размеры агрегатов по причине того, что диаметр зоны сушки обусловлен параметрами факела распыливания и поточными расходами, а ее высота обусловлена аэродинамической обстановкой при фазовом контакте и продолжительностью влагоудаления.
- Большая стоимость, обусловленная энергозатратами и конструктивной сложностью распылительных узлов и оборудования для улавливания сухого материала, а также необходимость аспирации.
- Относительно большая общая энергоемкость всей установки.
- Ограничение, обусловленное аэродинамической обстановкой при фазовом контакте, продолжительности присутствия дисперсных витающих частиц материала в зоне сушки и др.

Практический интерес представляют результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке технологических приемов и конструкторских решений для налаживания производства порошков из растительного сырья, включающих стадию распылительной сушки. С учетом рассмотренных конструкций сушильных установок, реализующих современные технологии обезвоживания растительного сырья, можно сформулировать следующие выводы:

- С целью выработки сухих продуктов растительной природы при высоких качественных показателях перспективно внедрение распылительной сушильной техники.
- Необходимо учесть сравнительно большую энергоемкость установок для сушки материала, их сложное конструктивное оформление, присутствие в нем движущихся элементов, затруднения при монтаже, эксплуатации, и ремонтных работах для таких агрегатов.
- Обезвоживание материалов растительной природы в распыленном состоянии обуславливает применение больших величин температур поступающих сырьевых потоков и расходов теплоносителя.

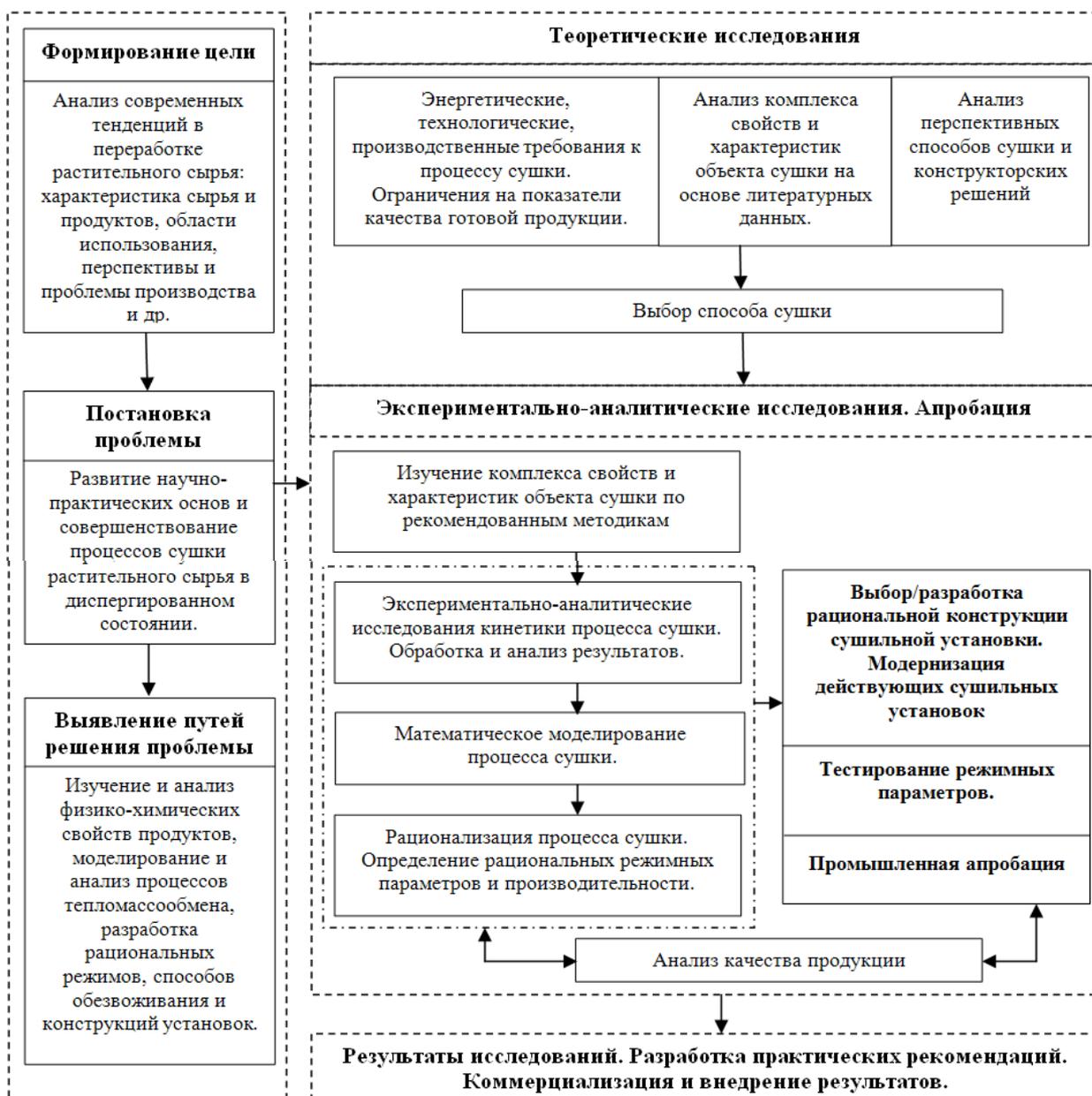


Рисунок 1.18 – Проблемно - концептуальная схема исследований

Для достижения цели диссертационного исследования предложена проблемно – концептуальная схема (рисунок 1.18).

Таким образом, систематизируя результаты изучения научно-технической и патентной информации, перспективным направлением является разработка способов и конструкторских решений для организации интенсивного процесса сушки растительного сырья в диспергированном состоянии при активном вихревом аэродинамическом контакте продукта и сушильного агента в рабочей камере.

ГЛАВА 2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭКСТРАКТА ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ С ВОДОЙ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ, ГИГРОСКОПИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

2.1 Теплофизические и структурно–механические характеристики экстракта зеленого чая

Величины теплофизических показателей (ТФХ) продуктов растительной природы обусловлены их структурной организацией и физико-химическими свойствами, которые, в свою очередь, обуславливают кинетику и механизм процедуры переноса тепловой энергии и вещества.

Теплопроводящие свойства влажных материалов растительной природы определяются коэффициентом теплопроводности λ , а теплоинерционные характеристики – коэффициентом температуропроводности a .

Не вызывает сомнений тот факт, что варьирование влагосодержания обуславливает варьирование ТФХ и набора иных физических и химических параметров.

Изучение, систематизация и обобщение ТФХ растительных экстрактов, в частности, экстракта зеленого чая, необходимы для дальнейшего научного анализа кинетики и динамики тепломассообменных процессов, их математического моделирования и решения задач рационализации сушильного процесса.

Получены зависимости плотности ρ , удельной теплоемкости c , коэффициента температуропроводности a и коэффициента теплопроводности λ от температуры и влажности растительных экстрактов.

При операции отвода влаги из термолабильных образцов с целью минимизации снижения качественных показателей сухих продуктов, величина T , как правило, не должна быть больше 55 – 60 °С, что и выбрано пороговым ее значением при определении ТФХ. За минимальную пороговую величину

принято значение $T = 293\text{K}$, что обусловлено T хранения водных экстрактов растительной природы, включая экстракт зеленого чая.

Таблица 2.1 - Диапазоны изменения влажности и температуры экстракта

Продукт	W , кг/кг	T , К
Водный экстракт зеленого чая	$0,9 \pm 0,05$	293 ± 333

Пределы изменения W обусловлены ее варьированием при промышленном обезвоживании (таблица 2.1) и требованиями к комплексу свойств чайного экстракта.

Конечная влажность $0,05$ кг/кг сухих экстрактов ограничена верхним пределом ее диапазона в мономолекулярном адсорбционном ареале, который определялся путем термодинамического анализа гигроскопических характеристик чайного экстракта с учетом технологических рекомендаций для продолжительной его сохранности.

Начальная влажность $0,9$ кг/кг жидких водных экстрактов соответствует максимально возможной W при предварительном перед высушиванием концентрировании, к примеру, вакуумном выпаривании.

2.1.1 Исследование плотности экстракта зеленого чая

Опытное изучение изменения ρ концентрированных чайных экстрактов в пределах варьирования их W при операции удаления влаги осуществлялось пикнометрическим способом.

Исследования плотности экстракта зеленого чая проведены при $T = 293\text{K}$ и при исходной максимальной влажности $W_n = 0,9$ кг/кг. Объемная доза экстракта определялась посредством мерной емкости при допускаемой относительной ошибке, не превышающей $0,1\%$. Массовая оценка проб проводилась посредством аналитических весов (Adventurer OHAUS AR3130) со вторым классом точности (ГОСТ 24104-88, приборная погрешность не превышала $0,1\%$).

Все опыты осуществлялись при 3-х кратном дублировании. Расчет относительной ошибки при нахождении ρ проводился по известному алгоритму, значение которой составляло $\varepsilon_\rho < 1\%$. Итак, для дальнейших расчетов принимается $\rho(W_H) = 1019,4 \text{ кг/м}^3$.

Расчетное соотношения для ρ абсолютно сухого образца ρ' , кг/м^3 выведено при известных величинах ρ для заданной W_H и ρ воды $\rho_в$ по аддитивному принципу:

$$\rho' = \frac{(1 - W_H) \cdot \rho_в \cdot \rho(W_H)}{(\rho_в - W_H \cdot \rho(W_H))} = \frac{(1 - W_H) \cdot \rho_в}{\left(\frac{\rho_в}{\rho(W_H)} - W_H\right)} \quad (2.1),$$

где $\rho_в = 998,2 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды при $T = 293\text{К}$.

Расчетные данные по плотности абсолютно сухого вещества экстракта зеленого чая ρ' сведены в таблице 2.2

Таблица 2.2 – Результаты определения плотности экстракта зеленого чая

Продукт	W_H , кг/кг	$\rho(W_H)$, кг/м^3	ρ' , кг/м^3
Водный экстракт зеленого чая	0,9	1019,4	1260,299

Впоследствии, зная величины ρ' , и вновь применив аддитивный принцип, найдено соотношение для определения ρ материала в заданном интервале (таблица 2.1) варьирования W при процедуре удаления влаги.

$$\rho(W) = \frac{1}{\left[\frac{W}{\rho_в} + \frac{(1 - W)}{\rho'}\right]} \quad (2.2).$$

Подставив численное значение плотности ρ' в формулу (2.2) и математически преобразовываем выражение, получим частную зависимость плотности от текущей влажности W :

$$\rho(W) = \frac{1}{(A_\rho \cdot W + B_\rho)} \quad (2.3),$$

где A_ρ, B_ρ – параметрические константы (эмпирические коэффициенты), $\text{м}^3/\text{кг}$ (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Значения эмпирических коэффициентов зависимостей плотности

Продукт	$A_{\rho} \cdot 10^4, \text{ м}^3/\text{кг}$	$B_{\rho} \cdot 10^4, \text{ м}^3/\text{кг}$
Водный экстракт зеленого чая	2,0834074	7,934625

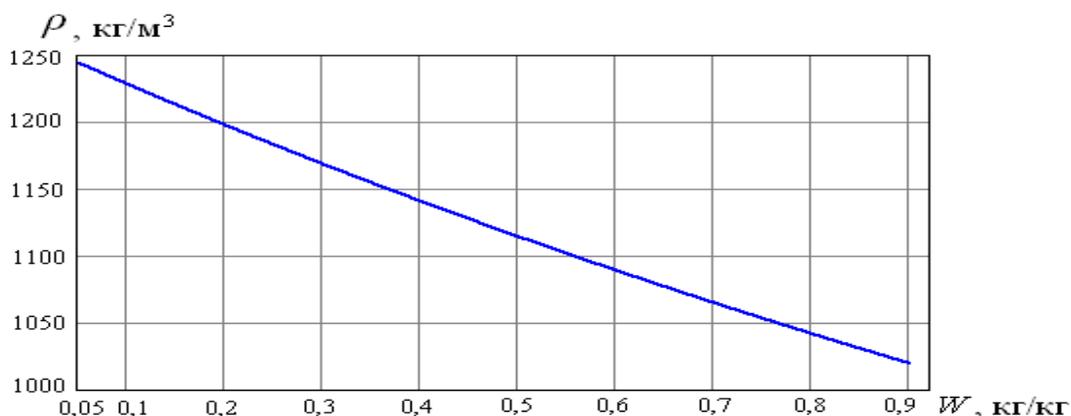


Рисунок 2.1 – Зависимость плотности экстракта зеленого чая в диапазоне изменения влажности в процессе сушки

Графическая интерпретация зависимости плотности экстракта от влажности (2.3) представлена на рисунке 2.1, из которой следует, что ρ значительно зависит от W , при росте W значение ρ снижается. Выводы из ряда публикаций [5, 6, 9, 183, 215] говорят в пользу того, что варьирование температуры 293К – 333К материалов растительной природы не ведет к значительному изменению их плотности.

2.1.2 Исследование удельной теплоемкости экстракта зеленого чая

Параметрическую зависимость c чайного экстракта от W возможно определить путем применения аддитивного принципа, опираясь на эмпирические данные (таблица 2.4), которые получены по методу, описанному в [91], где $c_{Wн}$, Дж/(кг·К) соответствует теплоемкости при $Wн$.

Таблица 2.4 – Удельная теплоемкость исследуемого материала

Продукт	$Wн, \text{ кг/кг}$	$c_{Wн}, \text{ Дж/(кг·К)}$
Водный экстракт зеленого чая	0,9	3972

Функционал $c(W)$, Дж/(кг·К) принимает вид:

$$c(W) = \left(\frac{c_{W_H} - c_g \cdot W_H}{1 - W_H} \right) \cdot (1 - W) + c_g \cdot W \quad (2.4),$$

где $c_g = 4182$ Дж/(кг·К) – для воды при $T = 293$ К.

После подстановки в выражение (2.4) c_{W_H} (таблица 2.4) и преобразовав выражение, получим:

$$c(W) = A_c \cdot W + B_c \quad (2.5),$$

где A_c, B_c – опытные параметрические коэффициенты, Дж/(кг·К) (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Величины опытных параметрических коэффициентов

Продукт	A_c , Дж/(кг·К)	B_c , Дж/(кг·К)
Водный экстракт зеленого чая	2100	2082

В случае роста W концентратов экстракта зеленого чая (рисунок 2.2) характерно увеличение c при последовательном приближении числовых значений к $c_g = 4182$ Дж/(кг·К). Коэффициент B_c – теплоемкость абсолютно сухого материала c^0 .

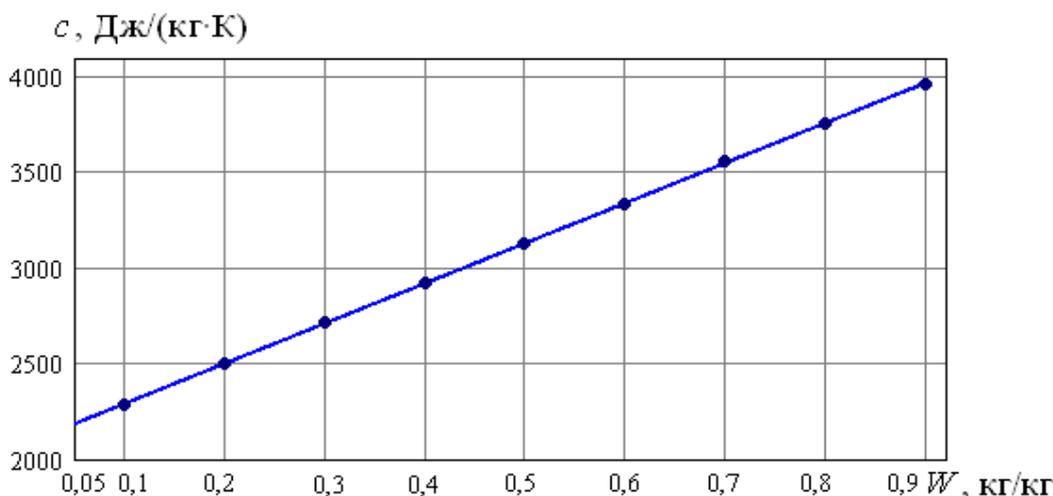


Рисунок 2.2 – Графическая интерпретация функциональной зависимости $c(W)$ для экстракта зеленого чая в диапазоне проведения операции удаления влаги

Выводы из ряда исследовательских работ [9, 32, 81] показывают, что варьирование для растительных материалов температуры в диапазоне 293К – 333К не приводит к заметному изменению их удельной теплоемкости.

Для проектирования и моделирования производственных процессов и аппаратов рекомендована для использования в инженерной практике полученная зависимость (2.5).

2.1.3 Исследование теплопроводности экстракта зеленого чая

Эмпирическое нахождение λ осуществляли посредством способа линейного термоисточника по аналогии с описанным в публикациях [52,101], который базируется на результатах решения соотношения:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (2.6),$$

где r – радиус зонда, м; t – температура зонда, °С; τ – продолжительность, с; a и λ – для образца, Вт/(м·К).

Краевые условия [52, 101]:

$$\begin{array}{lll} \tau = 0 & r \neq 0 & t = 0 \\ \tau > 0 & r = \infty & t = 0 \\ \tau > 0 & r \rightarrow 0 & -2 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial r} = q = const, \end{array}$$

где q – мощность, выделяемая единицей длины зонда, Вт/м.

Дифференциальное уравнение теплопроводности решается в виде [52]:

$$t = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(-0,5772 + \ln \frac{4a\tau}{r^2} + \frac{r^2}{4 \cdot a \cdot \tau \cdot 1 \cdot 1!} - \frac{r^4}{16 \cdot a^2 \cdot \tau^2 \cdot 2 \cdot 2!} + \dots \right) \quad (2.7),$$

где 0,5772 – константа Эйлера.

Принимая во внимание малозначительные продолжительность процедуры и зондовый радиус, получено упрощенное соотношение для λ [52]:

$$\lambda = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot t} \cdot \left(-0,5772 + \ln \frac{4 \cdot a \cdot \tau}{r^2} \right) \quad (2.8)$$

Ввиду отсутствия информации о величине a пробы вещества среднее λ_{cp} при варьировании зондовой T в пределах от t_1 до t_2 , для фиксированных τ_1 и τ_2 находим по соотношению [52]:

$$\lambda_{cp} = \frac{q}{4\pi} \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{\tau_2}{\tau_1} \quad (2.9)$$

Пренебрегаем отклонением истинного λ от λ_{cp} по причине того, что варьирование зондовой T не выходит за рамки нескольких градусов и, как следствие величины температурного λ несущественны.

Таблица 2.6 – Эмпирические величины λ и результаты их статистического анализа

W , кг/кг	λ_1 , Вт/(м·К)	λ_2 , Вт/(м·К)	λ_3 , Вт/(м·К)	λ , Вт/(м·К)	S_n , Вт/(м·К)	S_λ , Вт/(м·К)	$\Delta\lambda$, Вт/(м·К)	ε_λ %
$T = 293\text{K}$								
0,05	0,085	0,092	0,094	0,090	0,004726	0,002728	0,011732	13,036
0,20	0,124	0,126	0,120	0,123	0,003055	0,001764	0,007584	6,166
0,40	0,190	0,197	0,196	0,194	0,003786	0,002186	0,009399	4,845
0,60	0,289	0,290	0,283	0,287	0,003786	0,002186	0,009399	3,275
0,90	0,486	0,492	0,493	0,490	0,003786	0,002186	0,009399	1,918
$T = 313\text{K}$								
0,05	0,105	0,099	0,101	0,102	0,003055	0,001764	0,007584	7,436
0,20	0,133	0,126	0,134	0,131	0,004359	0,002517	0,010821	8,261
0,40	0,208	0,202	0,209	0,206	0,003786	0,002186	0,009399	4,563
0,60	0,308	0,301	0,302	0,304	0,003786	0,002186	0,009399	3,092
0,90	0,508	0,501	0,503	0,504	0,003606	0,002082	0,008951	1,776
$T = 333\text{K}$								
0,05	0,119	0,108	0,109	0,112	0,006083	0,003512	0,015101	13,483
0,20	0,151	0,155	0,154	0,153	0,002082	0,001202	0,005168	3,378
0,40	0,225	0,230	0,233	0,229	0,004041	0,002333	0,010033	4,381
0,60	0,332	0,328	0,334	0,331	0,003055	0,001764	0,007584	2,291
0,90	0,523	0,521	0,517	0,520	0,003055	0,001764	0,007584	1,459

Расчет относительной ошибки ε_λ при нахождении λ чайного экстракта осуществлялся по известному алгоритму и она не выходила за рамки $\varepsilon_\lambda = 13,04\%$. Опытные данные значения λ сведены в таблице 2.7, где λ_1 , λ_2 , и λ_3 найдены при 3-хратном дублировании эксперимента Вт/(м·К); λ – средняя величина, Вт/(м·К); S_n – отклонение среднеквадратичное, Вт/(м·К); S_λ – оно же среднего, Вт/(м·К); $\Delta\lambda$ – опытная погрешность, Вт/(м·К).

С целью математической аппроксимации результатов опытов (таблица 2.6) применена методика попадания точно в узловые точки, посредством которой найдены функционалы $\lambda = f(W, T)$, при уровне достоверности аппроксимации $R^2=0,99$:

$$\lambda(W, T) = (a_z \cdot T^2 + b_z \cdot T + c_z) \cdot W^2 + (d_z \cdot T^2 + e_z \cdot T + f_z) \cdot W + (g_z \cdot T^2 + k_z \cdot T + l_z), \quad (2.10)$$

где $a_z, b_z, c_z, d_z, e_z, f_z, g_z, k_z, l_z$ – параметрические константы (таблица 2.7), найденные путем статистической обработки результатов опытной серии.

Таблица 2.7 – Параметрические коэффициенты в зависимостях λ

Коэффициент	Размерность	Значение
a_z	Вт/(м·К ³)	-0,000082415
b_z	Вт/(м·К ²)	0,049693790
c_z	Вт/(м·К)	-7,125544135
d_z	Вт/(м·К ³)	0,000078124
e_z	Вт/(м·К ²)	-0,046802543
f_z	Вт/(м·К)	7,134190139
g_z	Вт/(м·К ³)	-0,000002223
k_z	Вт/(м·К ²)	0,001813035
l_z	Вт/(м·К)	-0,257293853

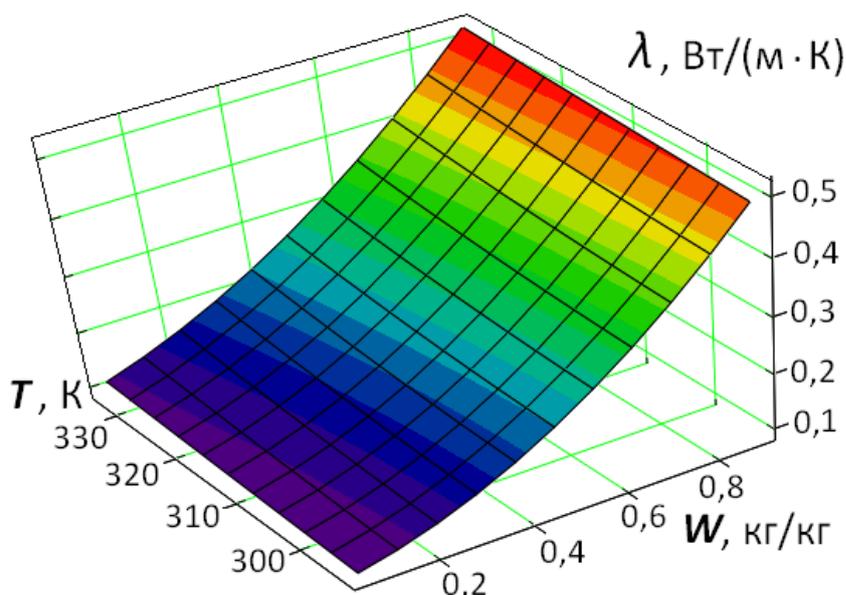


Рисунок 2.3 – Поле значений (графическая интерпретация функциональной зависимости) теплопроводности водного экстракта зеленого чая

Размерность параметрические констант: $a_z, d_z, g_z - \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}^3)$; $b_z, e_z, k_z - \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}^2)$; $c_z, f_z, l_z - \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Единицы измерения параметрических коэффициентов определяются по отношению единицы измерения функционала к единицам измерения аргументов или их произведения при учете вида соотношения.

Функционал (2.10) дает возможность найти с заданной точностью величины λ в пределах реального варьирования T и W образца в течении влагоудаления. Для анализа на рисунке 2.3 в графическом виде приведено поле значений теплопроводности концентратов экстракта из которого следует, что зависимость величины λ в пределах реального варьирования T и W образца является нелинейной, что не входит в конфликт с результатами, полученными другими исследователями [5, 6, 8, 9, 81, 183, 215].

2.1.4 Исследование температуропроводности экстракта зеленого чая

Принимая во внимание установленные функционалы $\rho(W)$, $c'(W)$ и $\lambda(W, T)$, зависимость коэффициента a от влияющих факторов T и W имеет вид:

$$a(W, T) = \frac{\lambda(W, T)}{c'(W) \cdot \rho(W)} \quad (2.11)$$

По соотношению (2.11) можно найти с заданной точностью величины a в пределах реального варьирования T и W материала в течении влагоудаления.

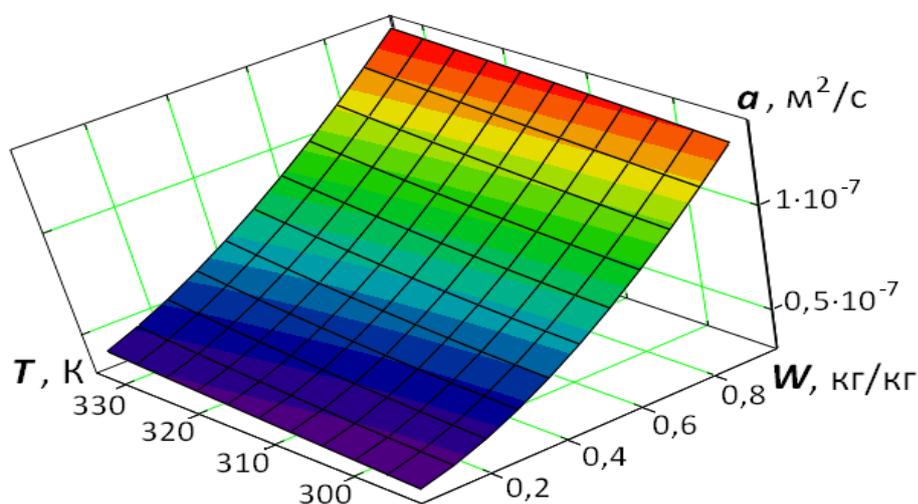


Рисунок 2.4 – Поле значений (графическая интерпретация функциональной зависимости) температуропроводности экстракта зеленого чая

Для визуального анализа проиллюстрирована на рисунке 2.4 графическая интерпретация зависимости a для концентрированных чайных экстрактов, из которой видно, что зависимость a в пределах реального варьирования T и W материала является нелинейной, что не входит в конфликт с результатами, полученными другими исследователями [5, 6, 8, 9, 81, 183, 215].

2.1.5 Анализ результатов исследования теплофизических и структурно-механических характеристик экстракта зеленого чая

Установленные в ходе исследований зависимости и численные значения теплофизических и структурно-механических характеристик концентратов экстракта зеленого чая сопоставим с известными данными ряда растительных материалов [5, 6, 8, 9, 81, 183, 215].

В таблицах 2.7 и 2.8 обобщены данные исследований плотности и удельной теплоемкости растительных материалов [81], подвергаемых сушке распылением.

Очевидно, что большое количество воды в исходном объекте распылительной сушки обуславливает тот факт, что значения плотности растительных материалов при влажности 0,85..0,9 кг/кг отличаются между собой незначительно.

Таблица 2.7 – Значения плотности ρ , кг/м³ растительных материалов

Продукт	W_n , кг/кг	ρ , кг/м ³
Пектиновый экстракт из арбуза	0,9	1014,321
Пектиновый экстракт из цитрусовых	0,9	1018,652
Пектиновый экстракт из тыквы	0,9	1016,662
Пектиновый экстракт из кабачка	0,9	1021,125
Водный экстракт Алтея	0,9	1012,478
Водный экстракт Имбиря	0,9	1014,581
Сок из моркови (сорт «Витаминная»)	0,85	1063,369
Сок из тыквы (сорт «Волжская серая	0,85	1052,625
Сок из яблок (сорт «Антоновка»)	0,85	1049,857
Водный экстракт зеленого чая	0,9	1019,4

Таблица 2.8 – Удельная теплоемкость растительных материалов

№ п/п	Продукт	W_H , кг/кг	c_{W_H} , Дж/(кг·К)
1	Пектиновые экстракты	0,9	3984
2	Водный экстракт алтея	0,9	3960
3	Водный экстракт имбиря	0,9	3985
4	Водный экстракт зеленого чая	0,9	3972

В графическом виде представлены зависимости теплоемкости ряда материалов (рисунок 2.5) от влажности в процессе сушки, полученные при обобщении результатов работы [81].

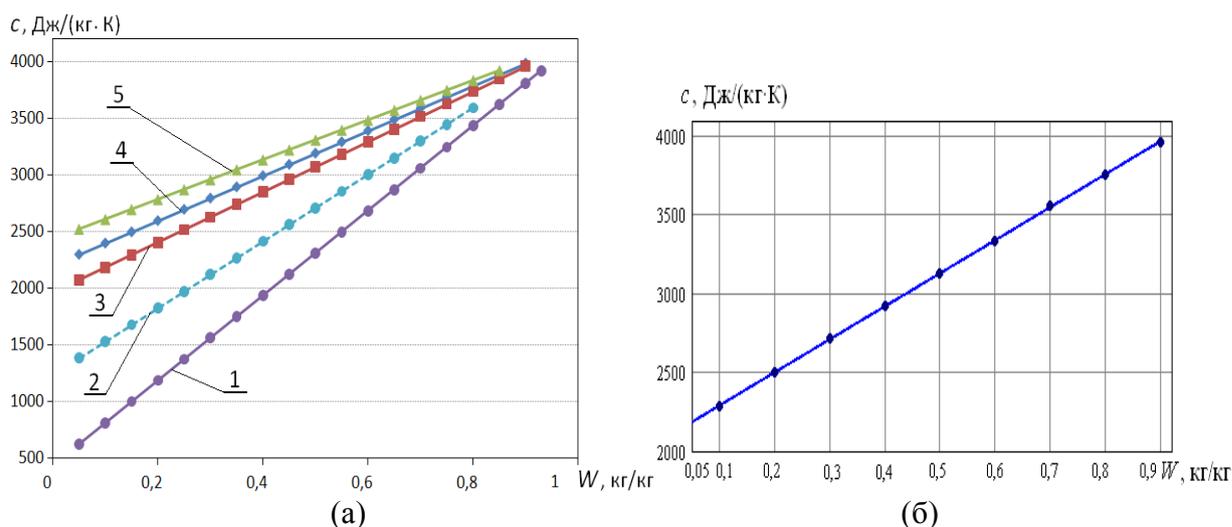


Рисунок 2.5 – (а) – Зависимость теплоемкости материалов от влажности в процессе сушки: кабачок, пюре с размером частиц 1 – 30мкм (1); морковь, пюре с размером частиц 1 – 30мкм (2); водный экстракт алтея (3); пектиновые экстракты (4); сок из моркови (5); (б) – Зависимость удельной теплоемкости экстракта зеленого чая

При увеличении влажности для всех растительных материалов характерно увеличение удельной теплоемкости с постепенным приближением значений, в области высокой влажности, к теплоемкости воды.

На рисунках 2.6 и 2.7 представлены данные собственных исследований и результаты исследований теплопроводности и температуропроводности растительных материалов [81], подвергаемых сушке распылением. Характер зависимостей нелинейный, что свойственно большинству биополимерных материалов.

Анализ многочисленных данных по теплофизическим характеристикам продуктов растительной природы, которые получены в результате исследований большого числа авторов, приведен в работе А.С. Гинзбурга и др. [29].

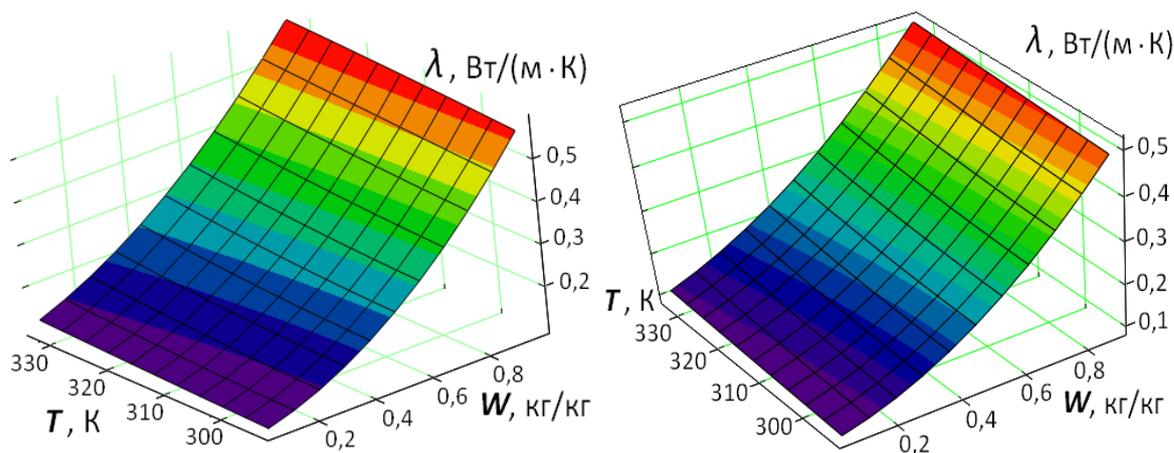


Рисунок 2.6 – Поля значений теплопроводности (графическая интерпретация функциональной зависимости): (а) – водный экстракт корня алтея (б) – водный экстракт зеленого чая

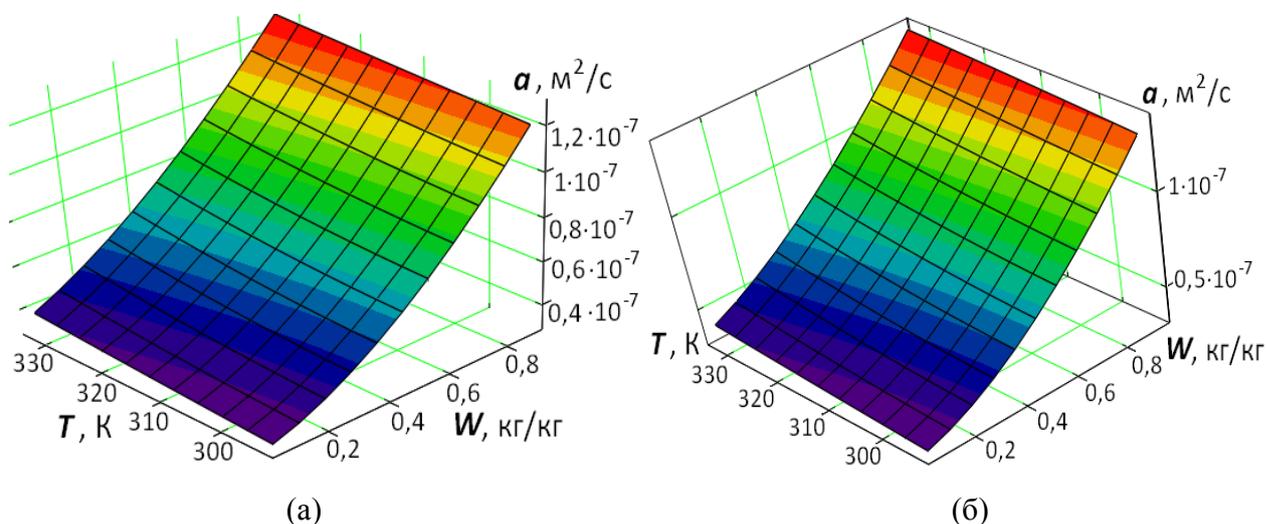


Рисунок 2.7 – Поля значений температуропроводности (графическая интерпретация функциональной зависимости): а – пектиновый экстракт из кабачка; б – водный экстракт зеленого чая

В работе [45] проведено обобщение сведений [29] и других известных данных по теплофизическим характеристикам и получены расчетные зависимости $\lambda(W) = 0,13+0,47 \cdot W$; $\rho(W) = 1300+2883 \cdot W$; $c(W) = 1300+2883 \cdot W$ для $T = 293$ К и $W = 0..0,95$ кг/кг. Расчетные данные по теплофизическим характеристикам концентратов экстракта зеленого чая, которые получены по установленным зависимостям при фиксированных значениях влажности и/или температуры согласуются при допустимых отклонениях с данными литературных источников.

Результаты необходимы для проектирования промышленных процессов и агрегатов при рациональной модификации технологий экстрактов растительной природы, а также при выявлении кинетических и динамических закономерностей трансфера тепловой энергии и массы, их математическом описании, модельной оптимизации для сохранения материальных и энергетических ресурсов при осуществлении операции удаления влаги из растительного сырья.

2.2 Механизм взаимодействия экстракта зеленого чая с водой

Операция удаления воды из материалов растительной природы осуществляется в основном в гигроскопическом ареале изменения влажности W . В теоретическом и практическом ракурсе изучение удаления воды из объектов растительной природы базируется на положениях статики операции обезвоживания, суть которой состоит в качественной и энергетической оценке воздействия влаги на объект сушки, которое с течением времени приводит к гигротермическому равновесию. При анализе кинетических закономерностей высушивания и определении движущей силы операции обычно опираются на равновесные сорбционные или десорбционные зависимости, в графическом виде представляемые изотермическими кривыми, интерпретация которых дает возможность провести классификацию влаги по виду и энергетике ее взаимосвязи с объектом сушки.

Изучению подвергались гигроскопические параметры водного экстракта зеленого чая посредством тензометрической методики [81, 183, 214]. Навески экстракта с заданной $W_{образца} = 0,05$ кг/кг помещались в эксикаторные емкости над водным серноокислым раствором, концентрации которого обуславливают при заданной T однозначную величину относительной влажности воздушной среды φ , % и, как следствие, величину активности воды A_w , которая в статических условиях замкнутого объема эксикатора равняется величине φ .

Для исследования использовались навески из порошка, полученного путем распылительного обезвоживания при тестировании режимных

параметров в серии опытов по сушке чайного экстракта на опытно-производственном сушильном аппарате Ohkawara Kakohki OL/OC-L8 и лабораторных установках кафедры «Технологические машины и оборудование» АГТУ.

W_p в равновесном состоянии находилась по соотношению:

$$W_p = \frac{G_2 - G_1 \cdot (1 - W_{образца})}{G_2} \quad (2.12),$$

где G_1 – масса исходной навески, кг; G_2 – масса навески в равновесном состоянии, кг; $W_{образца} = 0,05$ – сходная влажность для навески, кг/кг.

Опытные данные сведены в таблице 2.10, где: W_{p1} , W_{p2} , и W_{p3} – в равновесном состоянии при 3-кратном повторении условий эксперимента, кг/кг; W_p – средняя равновесная влажность, кг/кг; S_n – среднее квадратичное отклонение при определении W_p , кг/кг; S_{W_p} – отклонение среднеквадратичное средней величины при нахождении W_p , кг/кг; ΔW_p – отклонение результатов, кг/кг; ε_{W_p} – ошибка относительная $\varepsilon_{W_p} \leq 7,2\%$.

Таблица 2.10 – Результаты экспериментального определения равновесной влажности

A_w	W_{p1} , кг/кг	W_{p2} , кг/кг	W_{p3} , кг/кг	W_p , кг/кг	S_n , кг/кг	S_{W_p} , кг/кг	ΔW_p , кг/кг	ε_{W_p} , %
$T = 293\text{K}$								
0,2	0,097	0,095	0,092	0,0947	0,00252	0,00145	0,00625	6,600
0,4	0,172	0,173	0,164	0,1697	0,00493	0,00285	0,01225	7,218
0,8	0,288	0,281	0,272	0,2803	0,00802	0,00463	0,01991	7,103
1	0,394	0,403	0,404	0,4003	0,00551	0,00318	0,01367	3,415
$T = 333\text{K}$								
0,2	0,091	0,096	0,092	0,0930	0,00265	0,00153	0,00657	7,063
0,4	0,163	0,165	0,171	0,1663	0,00416	0,00240	0,01034	6,214
0,8	0,275	0,268	0,273	0,2720	0,00361	0,00208	0,00895	3,291
1	0,364	0,372	0,368	0,3680	0,00400	0,00231	0,00993	2,698

Опираясь на опытные данные получены графические равновесные зависимости (рисунок 2.8), вид которых приводит к выводу о сложности

сорбционного механизма, причем присутствие точек перегиба свидетельствует о его смене и в них, характеризующейся превалированием того или иного вида и энергетики связи отводимой влаги [29, 88].

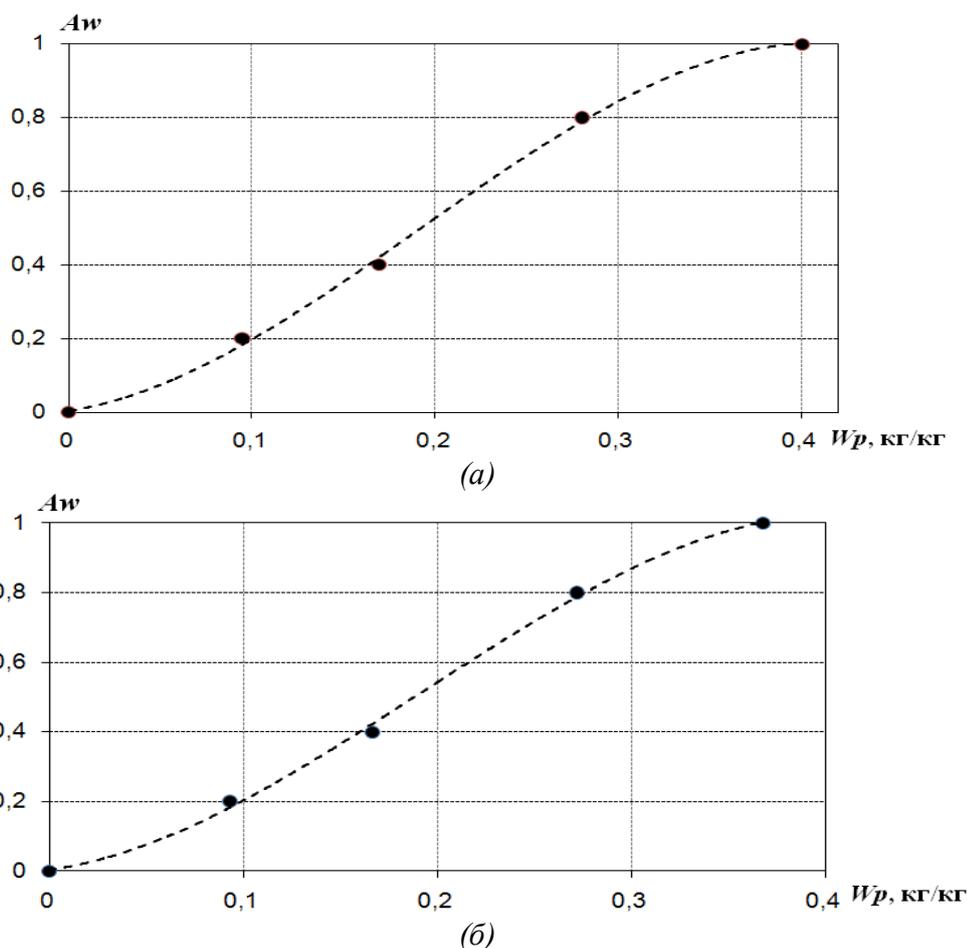


Рисунок 2.8 – Изотерма сорбции водяного пара экстрактом зеленого чая:

а – при температуре $T = 293$ К; б – при температуре $T = 333$ К

Исследуемый материал с учетом физколлоидных показателей можно причислить к капиллярно-пористым коллоидным субстанциям, где жидкая среда может быть связана с сухим остатком в разной форме, что характерно и для коллоидных, а также капиллярно-пористых веществ, что также отмечается в многочисленных исследованиях [9, 29, 81, 89].

Изотермические сорбционные кривые обладают для капиллярно-пористых коллоидных веществ S-образный характером (рисунок 2.8), при этом на них наблюдается 3-и зоны, соответствующих воде моно- и полимолекулярной адсорбции, а также структурной, макро и микро капиллярной влаги.

Наибольшую W , которой может обладать вещество путем сорбционного процесса поглощения водных паров из внешней среды при $A_w = 1$, определяют как гигроскопическую W_g , кг/кг, которая служит пороговой для гигроскопического ареала. Эта величина чрезвычайно важна для рационализации и моделирования явлений трансфера тепловой энергии и массы при сушке.

Продолжительность и трудоемкость нахождения W_g по тензометрической методике отмечается в работах [29, 88], Эмпирические результаты определения W_g при $A_w = 1$ подверглись корреляции по рекомендациям [81] и W_g была найдена в точке, где пересекается продленный прямолинейный отрезок изотермической кривой в ареале $A_w \geq 0,8$ с прямой при $A_w = 1$. В таблице 2.11 показаны величины W_g^1 при $T = 293$ К и W_g при $T = 333$ К для объекта исследования.

Посредством изотермических сорбционных кривых по методу Г.К. Филоненко [29] установлено количество влаги, связанной адсорбционными силами, мономолекулярного слоя по значению W_k в точке, где ось абсцисс пересекается с продолжением прямолинейного отрезка изотермической графической зависимости. Для экстракта $W_k = 0,05$ кг/кг (таблица 2.11), что не выходит за рамки требований к сухим экстрактам.

В процессе опытно-аналитического исследования сорбционной процедуры с учетом данных, приведенных в ряде публикаций [9, 29, 81, 183, 214] выявлено, что при $A_w \approx 0,7..0,8$ на кривой присутствует точка перегиба при W_ε (таблица 2.11), которая является пороговой между ареалом, где влага адсорбционно связана и капиллярной, а также структурной (поровой, осмотической, иммобилизационной) жидкой средой, которая связана энтропийно.

Таблица 2.11 – Гигроскопические характеристики экстракта

W_k , кг/кг	W_g^1 , кг/кг	W_g^2 , кг/кг	W_ε^1 , кг/кг	W_ε^2 , кг/кг
0,05	0,4003	0,3680	0,2803	0,272

В таблице 2.11 значение $W\varepsilon^1$ соответствует $T = 293$ К и $W\varepsilon^2 - T = 333$ К.

Итак, определены гигроскопические параметры чайного экстракта, дающие возможность найти суммарное содержание влаги, отводимой при высушивании, и подразделить ее по превалярованию удаления в характерных зонах процесса сушки.

На кривых (рисунок 2.8) явно наблюдаются 3 зоны. При $Wp \leq Wk$ операция сорбции водяной паровой среды сопровождается образованием гидрокомплексов, прочно энергетически связанных (ориентированный или кулоновский вид гидратации) путем адсорбционного связывания сольватных молекул жидкой среды молекулами внутренней и наружной поверхностей мицелл сухого вещества. Итак, изначально формируется мономолекулярная адсорбционная прослойка и при сорбции влаги наблюдается существенное выделение тепловой энергии гидратации (набухания) [9, 29, 62-65, 81].

Далее наблюдается поляризация предыдущими прослойками последующих, причем водные молекулы остаются ориентированными [9, 29, 62-65, 81]. В интервале $Wk < Wp < W\varepsilon$ кривая имеет выпуклость к оси ординат (рисунок 2.8), что характерно для явления полимолекулярной адсорбции и сорбции влаги сопутствует уменьшающееся по мере накопления слоев количество выделяемой тепловой энергии, что обусловлено ослаблением физико-химической связи водных молекул с сухим остатком и последовательным переходом их в свободное состояние. Высота полимолекулярной адсорбционной прослойки может равняться нескольким сотням диаметров водных молекул [9, 29, 62-65, 81].

В пределах $W\varepsilon \leq Wp \leq Wg$ (рисунок 2.8) наблюдается сорбция водной среды без тепловыделения и, как следствие, без варьирования величины внутренней энергии в материале, причем объемный рост при набухании, принимая во внимание термодинамические соотношения, наблюдается из-за возрастания энтропийной составляющей. Сорбируемая при набухании жидкая среда получила название осмотической (энтропийно связанной или структурной). В пределах $W\varepsilon \leq Wp \leq Wg$ превалярует поровая, макро- и

микрокапиллярная влага из-за эффекта смачивания без теплоотдачи. Капиллярная влага, связанная механически путем, удерживается посредством капиллярного давления и поверхностного натяжения [9, 29, 62-65, 81].

Для оперативного использования при проектировании и организации технологического потока производства чайного экстракта получена математическая зависимость A_w от T , K и W_p , кг/кг при уровне достоверности аппроксимации – $R^2 \geq 0,99$:

$$A_w(W_p, T) = (a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h) \quad (2.13),$$

где a , b , c , d , e , f , g , h – параметрические константы (эмпирические коэффициенты) (таблица 2.12).

Таблица 2.12 – Значения параметрических констант функционала (2.13)

a	-0,03270865
b	-15,01564355
c	0,01667245
d	9,27305315
e	0,0000074
f	0,7656988
g	-0,000002925
h	0,004748025

Результаты указывают на то, что сухие экстракты – высокогигроскопичные материалы и расчет времени стадий по переработке, фасовке и упаковке следует выполнять с учетом относительной влажности воздуха рабочих зон. Хранение высокогигроскопичных экстрактов необходимо осуществлять в герметичной упаковке.

Выполнены исследования по экспериментально-аналитической оценке кинетики влагопоглощения для последующего расчета продолжительности заключительных операций (упаковка, дозирование и т.д.). Процессы влагопоглощения зависят от условий (климатических и производственных).

Исследовались образцы экстракта зеленого чая, полученные в ходе тестирования режимных параметров (см. глава 6). За целевую функцию была принята текущая в процессе сорбции влажность материала W , которая

увеличивается от 0,04 кг/кг до 0,06 кг/кг (0,05 кг/кг рекомендована для длительного хранения) в течении процесса сорбции τ_v , мин. Влияющие факторы: температура воздуха $T_в$, и относительная влажность $\varphi_в$ воздуха в производственном помещении и температура продукта $T_{прод}$.

Принимая во внимание ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» и СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» в разные времена года факторы могут изменяться $T_в = 12 \dots 30^\circ\text{C}$ и $\varphi_в = 40 \dots 75\%$.

Эксперименты проведены эксикаторным методом при наиболее благоприятных для явлений сорбции условиях: $T_в = 12^\circ\text{C} = 275\text{K}$ и $\varphi_в = 75\% = 0,75$. В результате получена графическая кинетическая зависимость (рисунок 2.9), которая характерна для большинства биополимеров [81] и при этом относительная ошибка измерений не превышала 7%. В результате сорбции с учетом технологических ограничений $W^p = W^k \dots W_k$ в образце должна присутствовать только влага мономолекулярной адсорбции.

Кинетическая зависимость имеет вид:

$$W^(\tau_v) = 0,00002 \cdot \tau_v^3 - 0,00055 \cdot \tau_v^2 + 0,00526 \cdot \tau_v + 0,04016 \quad (2.14)$$

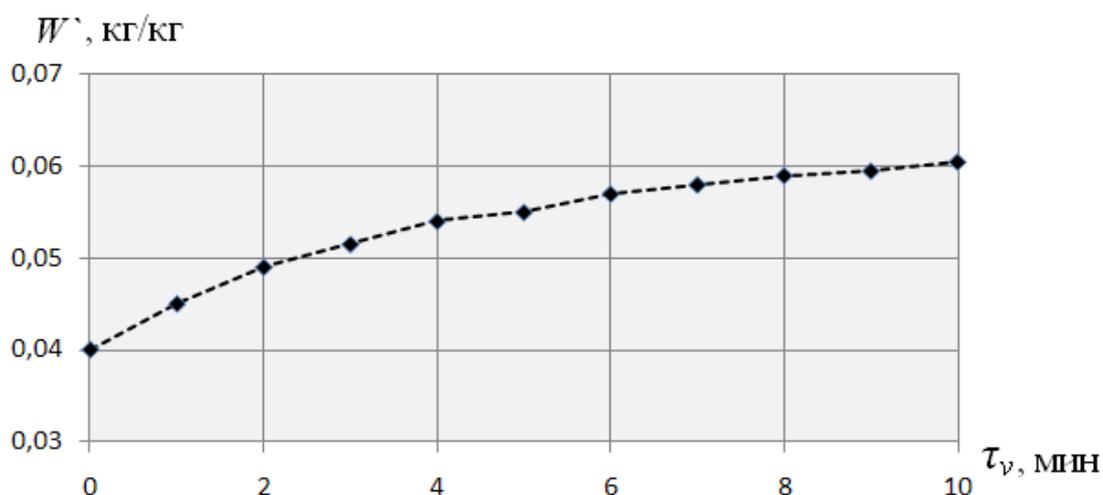


Рисунок 2.9 – Кинетика влагопоглощения сухим экстрактом зеленого чая

Визуальный анализ поведения образцов при сорбции влаги показал, что вследствие высокой степени гигроскопичности мелкодисперсные порошковые частички имеют склонность к аутогезиной агломерации ($\varphi_в = 75\%$) при

комковании материала, ввиду чего необходима герметизация накопительных резервуаров, транспортирующих, дозирующих и смесительных узлов, а также поддержание необходимого влажностного режима при хранении. Полученные соотношения дают возможность определить допустимую продолжительность завершающих технологических операций в негерметичных условиях.

2.3 Термодинамический анализ внутреннего массопереноса при взаимодействии экстракта зеленого чая с водой

В известных трудах [28, 61-63, 88] показана обоснованность использования при изучении и анализе рассматриваемых явлений переноса тепловой энергии и массы термодинамических закономерностей, опирающихся на классические термодинамические начала. Для решения задачи анализа явлений трансфера тепловой энергии и вещества используют потенциал переноса массы (влаги) Θ [28, 30, 61-63, 88]. Химическим потенциалом μ характеризуют потенциал переноса воды в парообразном состоянии в паровоздушной среде, принимая, что он для влажных образцов в гигроскопическом ареале приблизительно равняется по модулю потенциалу переноса влаги [4, 28, 30, 61-63, 88]:

$$|\Theta| = |\mu| = R \cdot T \cdot \ln A_w \quad (2.15),$$

где $R = 8,314$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

В области гигроскопического состояния химический потенциал μ можно представить функцией влажности W_p и температуры T продукта ($\mu = f(W_p, T)$). Разность химических потенциалов $\Delta\mu$ свободной μ_0 и связанной воды μ является движущей силой сорбции [4, 28, 30, 61-63].

В публикациях [28, 30, 61-63, 88] доказано, что в гигроскопическом ареале $\Delta\mu$ по модулю тождественна связанной энергии $E_{св}$ или варьированию свободной энергии Гельмгольца:

$$|\Delta\mu| = E_{св} = - \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right) = -RT \ln A_w \quad (2.16).$$

Таким образом, $E_{св}$ принять за потенциал влагопереноса.

Принимая во внимание соотношение (2.13), обуславливающее равновесное состояние при сорбционном процессе возможно найти $E_{св}$:

$$E_{св} = -\Delta\mu = -R \cdot T \cdot \ln((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h)) \quad (2.17).$$

где a, b, c, d, e, f, g, h – эмпирические коэффициенты (таблица 2.13).

Найдем варьирование свободной энергии, взяв производную уравнения Гиббса-Гельмгольца по Wp ($P, T = \text{const}$) [4]: $\Delta F = \Delta E - T \cdot \Delta S$, где ΔE – варьирование внутренней, а $T \cdot \Delta S$ – связанной энергии; ΔS – варьирование энтропии.

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial Wp} \right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial Wp} \right)_{T,P} - T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial Wp} \right)_{T,P} \quad (2.18).$$

Взяв производную от соотношения (2.18) по T имеем:

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial Wp} \right)_{T,P} = - \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial Wp} \right)_{T,P} \quad (2.19)$$

С учетом (2.16), получим:
$$\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial Wp} \right)_{T,P} = - \frac{\partial (R \cdot T \cdot \ln A_w(Wp, T))}{\partial T} \quad (2.20).$$

Итак, с учетом $A_w(Wp, T)$ возможно найти величины свободной, связанной и внутренней энергетических составляющих при сорбционной процедуре.

Зависимость дифференциального изменения свободной энергии:

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial Wp} \right)_{T,P} = T \cdot R \cdot \ln((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h)) \quad (2.21).$$

Зависимость дифференциального изменения связанной энергии:

$$T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial Wp} \right)_{T,P} = -T \cdot R \cdot \left[\frac{\ln((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h)) +}{+ T \cdot \frac{(a \cdot Wp^3 + c \cdot Wp^2 + e \cdot Wp + g)}{((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h))}} \right] \quad (2.22).$$

Зависимость дифференциального изменения теплового эффекта сорбции:

$$\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial Wp}\right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial Wp}\right)_{T,P} + T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial Wp}\right)_{T,P} =$$

$$= T \cdot R \cdot \ln((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h)) +$$

$$+ \left[-T \cdot R \cdot \left[\ln((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h)) + \right. \right.$$

$$\left. \left. + T \cdot \frac{(a \cdot Wp^3 + c \cdot Wp^2 + e \cdot Wp + g)}{((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h))} \right] \right] \quad (2.23).$$

Представлены зависимости дифференциального изменения свободной энергии, связанной энергии и теплового эффекта сорбции от равновесной влажности в процессе сорбции паров воды экстрактом чая (рисунок 2.10).

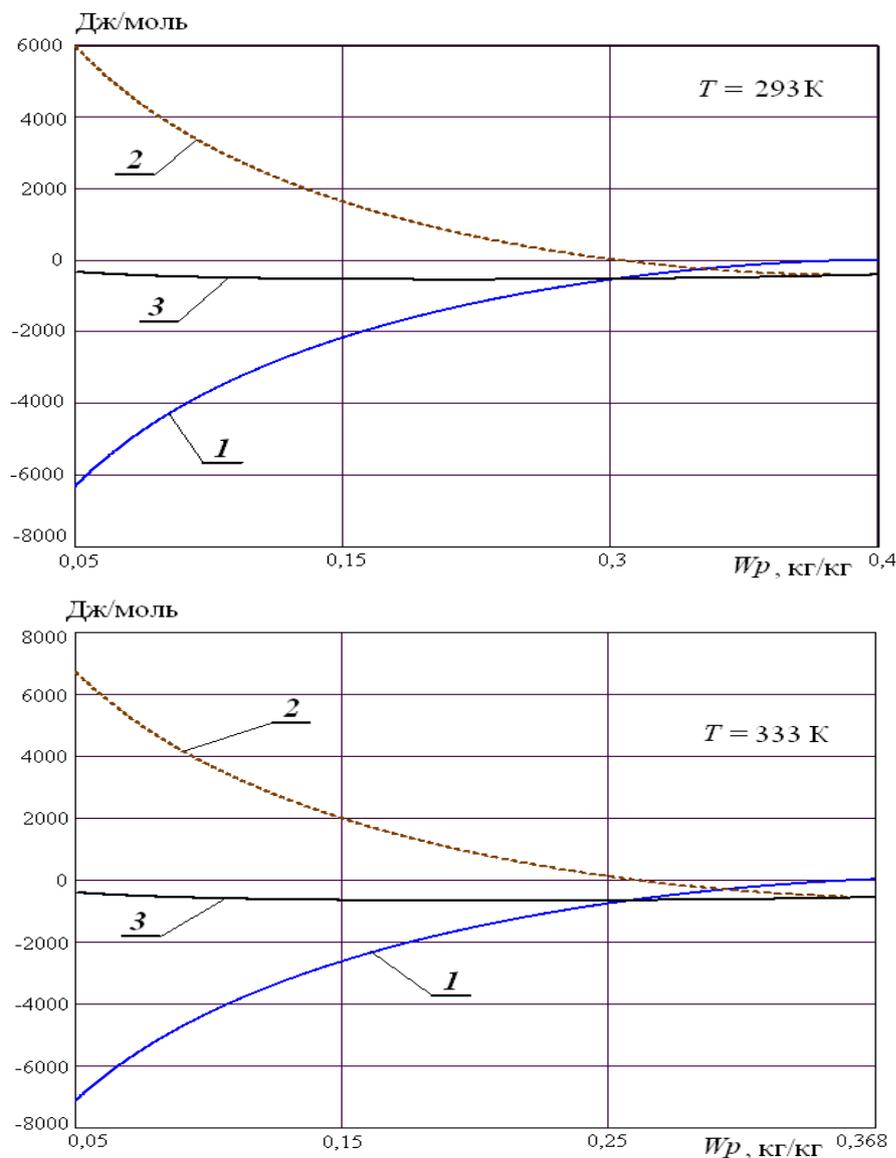


Рисунок 2.10 – Зависимости дифференциального изменения свободной энергии (1), связанной энергии (2) и теплового эффекта (3) сорбции от равновесной влажности в процессе сорбции паров воды экстрактом зеленого чая

Характер дифференциального изменения связанной энергии (энтропийной составляющей) (рисунок 2.10) во всем диапазоне изменения влажности обусловлен стремлением системы к термодинамическому равновесию.

Дифференциальное изменение внутренней энергии отрицательно практически во всем диапазоне влажности, т.е. присутствуют тепловые эффекты при сорбции паров воды материалом. Характер варьирования всех составляющих не противоречит известным опубликованным данным для множества биополимерных материалов [4, 81, 88, 182, 190, 214, 218].

При анализе сорбционной операции в термодинамическом аспекте для выявления рациональных вида и режимов подвода тепловой энергии при высушивании целесообразно найти связь термоградиентного коэффициента переноса вещества δ_p с Wp и T . δ_p , предложенный А.В. Лыковым [61-63] входит как составляющая в относительный термодиффузионный коэффициент δ . В состоянии гигротермического равновесия δ_p , служит термодинамическим параметром и тождествен δ . С учетом [61-63] имеем:

$$\delta_p = c_m \cdot \left(\frac{\partial \Delta \mu}{\partial T} \right)_{Wp=const} \quad (2.24),$$

где $c_m = \left(\frac{\partial Wp}{\partial \Delta \mu} \right)_{T=const}$ – удельная изотермическая влагоемкость материала.

Таким образом,

$$\delta_p = \left(\frac{\partial \Delta \mu}{\partial T} \right)_{Wp} \cdot \left(\frac{\partial Wp}{\partial \Delta \mu} \right)_T \quad (2.25).$$

Учитывая (2.16), получим:

$$\left(\frac{\partial \Delta \mu}{\partial T} \right)_{Wp} = \left(\frac{\partial (RT \ln Aw(Wp, T))}{\partial T} \right) \quad (2.26).$$

Отметим, что соотношение (2.26) – есть дифференциал варьирования сорбционной энтропии и является температурным параметром [61-63].

Принимая во внимание (2.16) имеем:

$$\left(\frac{\partial Wp}{\partial \Delta \mu} \right)_T = \frac{1}{(\partial \Delta \mu / \partial Wp)_T}, \quad (2.27)$$

Следовательно:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \Delta \mu}{\partial T}\right)_{Wp} &= \frac{\partial(T \cdot R \cdot \ln((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h)))}{\partial T} = \\ &= R \cdot \ln((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h)) + \\ &+ R \cdot T \cdot \frac{(a \cdot Wp^3 + c \cdot Wp^2 + e \cdot Wp + g)}{((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h))} \end{aligned} \quad (2.28).$$

С учетом (2.27) получим:

$$\left(\frac{\partial Wp}{\partial \Delta \mu}\right)_T = \frac{1}{\left(-T \cdot R \cdot \frac{(3 \cdot (a \cdot T + b) \cdot Wp^2 + 2 \cdot (c \cdot T + d) \cdot Wp + (e \cdot T + f))}{((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h))}\right)} \quad (2.29).$$

Итак, подставив в (2.25) соотношения (2.28) и (2.29) найдем варьирование δ_p в зависимости от влияющих факторов:

$$\begin{aligned} \delta_p(Wp, T) &= \left[\frac{R \cdot \ln(a \cdot T + b \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h)) +}{+ R \cdot T \cdot \frac{(a \cdot Wp^3 + c \cdot Wp^2 + e \cdot Wp + g)}{((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h))}} \right] \cdot \\ &\left[\frac{1}{\left(-T \cdot R \cdot \frac{(3 \cdot (a \cdot T + b) \cdot Wp^2 + 2 \cdot (c \cdot T + d) \cdot Wp + (e \cdot T + f))}{((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h))}\right)} \right] \end{aligned} \quad (2.30)$$

Характер варьирования δ_p при изменении Wp в сорбционной процедуре не противоречит известным данным для множества биополимеров [4, 182, 190, 192, 214, 215, 218].

Коэффициент δ_p , как показатель теплового трансфера влаги в веществе, находится в зависимости от Wp и определяется видом связи воды с сухим остатком. В зоне наличия адсорбированной влаги δ_p имеет отрицательную величину, что обусловлено относительной термодиффузии в газообразных средах [4]. Воздушная фаза с большей молекулярную массой по отношению к водяной парообразной фазе, перемещается в направлении трансфера теплового потока, что предопределяет трансфер пара в сторону, противоположную движению теплотокота. Эффект относительного термического диффузионного переноса может активизироваться по причине наличия термического скольжения при эффузионном движении паровой фазы,

суть которого состоит в том, что при перемещении паровых молекул по неравномерно нагретой капиллярной стенке при уменьшении ее T по длине наблюдается падение T , контактирующего с ней пара, причем около стенки наблюдается трансфер газовой фазы от менее к более нагретым точкам стенки, что обуславливает противоположное основному теплотокоту перемещение тепловой энергии в веществе.

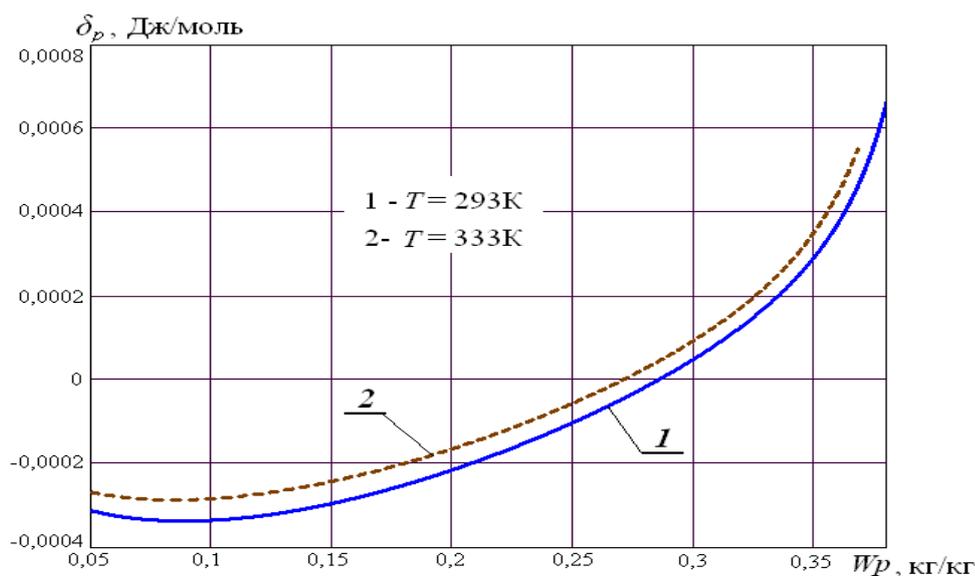


Рисунок 2.11 – Зависимости термоградиентного коэффициента от равновесной влажности в процессе сорбции паров воды экстрактом зеленого чая

Принимая в расчет рекомендаций [6,16,43,82-84] можно заключить, что для повышения интенсивности и рационализации операции сушки растительного экстракта целесообразно повышение поверхности фазового контакта путем дезинтеграции материала посредством, к примеру, его распыления или перевода в псевдооживленное состояние, при объемном конвективном способе подвода тепловой энергии.

2.4 Фазовые превращения при внутреннем тепло- и массопереносе в процессе сушки экстракта зеленого чая

Коэффициент фазовых превращений ε характеризует изменение потока влаги за счет фазового превращения (внутреннее испарение при сушке) по отношению к изменению общего потока влаги внутри материала и входит в дифференциальное уравнение переноса тепла [28, 30, 61-63].

В публикациях [28, 30, 61-63] обосновано, что ε различен для разных слоев тела и зависит от координат тела, то есть определяется координатой их расположения, ввиду чего при составлении и адаптации модели переноса тепловой энергии при обезвоживании с учетом структурной неізотропности, усадки частиц обезвоживаемого продукта и внешней обстановки, целесообразно в режиме реального времени определить адекватную закономерность варьирования ε при изменении W , что невозможно без введения определенных допущений.

В инженерных расчетах и при построении модели внутреннего трансфера тепловой энергии и вещества при $W = W\varepsilon \dots Wg$ используем соотношение:

$$\varepsilon = (W - Wg)/(W\varepsilon - Wg) \quad (2.31).$$

Одновременно с развитием процессов испарения влаги в пограничных слоях материала и на границе раздела фаз, интенсифицируется процесс испарения адсорбционно-связанной влаги в объеме материала между границей испарения и поверхностью, причем в завершающей стадии массоперенос обусловлен только движением пара. Следовательно, поток влаги обусловлен фазовыми превращениями и переносом пара при удалении преимущественно адсорбционно-связанной влаги: $\varepsilon = 1$. При достижении конечного равновесного влагосодержания температура продукта приближается по своим значениям к температуре отработавшего сушильного агента и процесс сушки прекращается.

2.5 Оценка удельных затрат тепловой энергии на сушку экстракта зеленого чая с учетом термодинамических потерь тепла в процессе обезвоживания

При удалении связанной с материалом влаги удельная теплота, затрачиваемая на испарение r и входящая в дифференциальное уравнение теплопереноса [28, 30, 61-63] определяется суммированием энергии парообразования воды r' в свободном состоянии, тепловой энергии

смачивания $r_{см}$ и энтропийной составляющей свободной энергии $r_{энт}$, обусловленной капиллярной и структурной связью [4, 9]. Теплота, нужная для удаления 1 кг воды из вещества с учетом [4, 9] находится по соотношению

$$r = r' + r_{см} + r_{энт} \quad (2.32).$$

С учетом данных [4, 9] функционал $r'(T)$, Дж/кг в заданных пределах варьирования T имеет линейную форму:

$$r'(T) = 3118,4581 \cdot 10^3 - 2286,66 \cdot T \quad (2.33).$$

Тепловая энергия смачивания $r_{см}$, Дж/моль обусловлена дифференциалом свободной энергии влагоудаления в изотермических условиях [4, 9, 28]:

$$r_{см}(Wp, T) = -\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial Wp}\right)_{T,P} = -T \cdot R \cdot \ln Aw(Wp, T) \quad (2.34).$$

Энтропийная составляющая $r_{энт}$, Дж/моль определяется дифференциальным изменением связанной энергии [4, 9]:

$$r_{энт}(Wp, T) = T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial Wp}\right)_{T,P} = -T \cdot \left(\frac{\partial(T \cdot R \cdot \ln Aw(Wp, T))}{\partial T}\right) \quad (2.35).$$

При величине молярной массы воды составляющей 0,018 кг имеем $r_{см}$, Дж/кг и $r_{энт}$, Дж/кг:

$$r_{см}(Wp, T) = -\frac{1}{0,018} \cdot \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial Wp}\right)_{T,P} = -55, (5) \cdot T \cdot R \cdot \ln Aw(Wp, T) \quad (2.36).$$

$$\begin{aligned} r_{энт}(Wp, T) &= \frac{1}{0,018} \cdot T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial Wp}\right)_{T,P} = 55, (5) \cdot T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial Wp}\right)_{T,P} = \\ &= -55, (5) \cdot T \cdot \left(\frac{\partial(T \cdot R \cdot \ln Aw(Wp, T))}{\partial T}\right) \end{aligned} \quad (2.37).$$

Итак, зависимость $r(Wp, T)$, Дж/кг [4, 9]:

$$\begin{aligned} r(Wp, T) &= 3118,4581 \cdot 10^3 - 2286,66 \cdot T - 55, (5) \cdot T \cdot R \cdot \ln Aw(Wp, T) + \\ &+ 55,5 \cdot T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial Wp}\right)_{T,P} \end{aligned} \quad (2.38).$$

Принимая во внимание (2.13), имеем $r(Wp, T)$, Дж/кг:

$$r(Wp, T) = 3118,4581 \cdot 10^3 - 2286,66 \cdot T - 55, (5) \cdot (R \cdot T \cdot \ln((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h))) + 55, (5) \cdot \left(-T \cdot R \cdot \left[\frac{\ln((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h))}{(a \cdot Wp^3 + c \cdot Wp^2 + e \cdot Wp + g)} + T \cdot \frac{(a \cdot Wp^3 + c \cdot Wp^2 + e \cdot Wp + g)}{((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h))} \right] \right) \quad (2.39).$$

где a, b, c, d, e, f, g, h – параметрические опытные коэффициенты (таблица 2.13).

Величина энергии связи 1 кг воды с сухим остатком Δr находится суммированием $r_{см}$ и $r_{энт}$:

$$\Delta r(Wp, T) = r_{см}(Wp, T) + r_{энт}(Wp, T) = -55, (5) \cdot T \cdot R \cdot \ln A_w(Wp, T) + 55, (5) \cdot T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial Wp} \right) \quad (2.40).$$

Имеем соотношение $\Delta r(Wp, T)$, Дж/кг:

$$\Delta r(Wp, T) = -55, (5) \cdot (R \cdot T \cdot \ln((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h))) + 55, (5) \cdot \left(-T \cdot R \cdot \left[\frac{\ln((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h))}{(a \cdot Wp^3 + c \cdot Wp^2 + e \cdot Wp + g)} + T \cdot \frac{(a \cdot Wp^3 + c \cdot Wp^2 + e \cdot Wp + g)}{((a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h))} \right] \right) \quad (2.41).$$

Таким образом, удельная тепловая энергия испарения $r(Wp, T)$ может быть определена для подстановки в дифференциальное уравнение теплопереноса [28, 30, 61-63] при моделировании тепломассообменных процессов сушки.

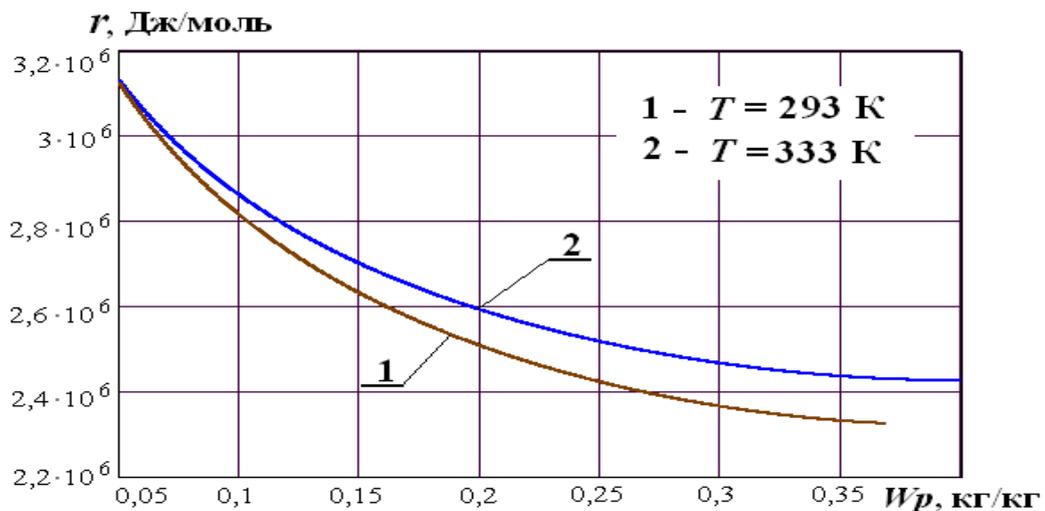


Рисунок 2.12 – Зависимость удельной тепловой энергии испарения от равновесной влажности в процессе сорбции паров экстрактом зеленого чая

Графическая интерпретация $r(W_p, T)$ показана на рисунке 2.12, причем ее вид не противоречит известным данным [4, 9, 190, 192, 214] и определяется варьированием вида и энергетики связи влаги с сухим веществом.

Из вышеизложенного следует, что

- в пределах варьирования $W_\varepsilon \leq W_p \leq W_g$, отвечающих структурной, поровой и капиллярной влаге наблюдается отклонение величин r от величины r^0 в пределах $\leq 5\%$.
- в пределах варьирования $W_k < W_p < W_\varepsilon$, отвечающих полимолекулярной адсорбционной влаге наблюдается интенсивное повышение r при снижении W_p до значения W_k , что определяется ростом энергии связи физико-химического характера.

ГЛАВА 3. МЕХАНИЗМ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКЕ ЭКСТРАКТА ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ

При моделировании, в частности, построении модели тепломассопереноса в объеме распыленных частиц экстракта зеленого чая при ее конвективном высушивании, анализа механизмов переноса тепла и влагоудаления при формировании структуры сухих частиц готового порошка возникает необходимость оценки экспериментально-аналитическими методами закономерностей изменения во всем периоде протекания процесса ключевых параметров, которые характеризуют высушиваемый материал.

В ходе исследований к анализу приняты температура и влажность экстракта зеленого чая, которые изменяются во времени процесса обезвоживания продукта и оказывают влияние на механизм, характер и скорость тепломассообменных процессов, а также расходные характеристики и гидродинамическую обстановку в системе «распыленные частицы экстракта – сушильный агент/нагретый воздух».

3.1 Экспериментальное исследование процесса распылительной сушки экстракта зеленого чая

В качестве объекта сушки применялся водный экстракт зеленого чая, полученный по традиционной технологии, включающей стадии механического измельчения (дезинтеграции) сырья, подготовку экстрагентной среды (очищенная вода); получение первичной вытяжки; отстаивание; фильтрация; концентрирование раствора вакуум-выпариванием.

Получение исходных экстрактов осуществлялось с использованием экспериментальных установок кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» (далее – АГТУ), в том числе на технологической установке УПЭС (установка приготовления эмульсий и суспензий) модели 0,15/3,0 и с

использованием производственных установок технологического партнера АГТУ ООО «Инновационные технологии продуктов питания» (г. Астрахань) (приложение 2).

Начальная влажность $W_n = 0,9$ кг/кг рекомендована из анализа постановочных опытов с учетом обеспечения стабильности параметров факела распыла (диапазон размеров распыленных частиц, корневой угол и дальнобойность факела), что предопределяет стабильную, надежную работу распылителей различного типа, в частности, механический и акустический.

Итоговая влажность $W_k = 0,05$ кг/кг принята из анализа результатов изучения гигроскопических характеристик (глава 2) и с учетом требований к показателям качества.

Значения $W_n = 0,9$ кг/кг и $W_k = 0,05$ кг/кг соответствуют рекомендациям по эффективной организации конвективной распылительной сушки растительных экстрактов [81].

Для изучения сушки экстракта зеленого чая применялась модернизированная экспериментальная установка кафедры «Технологические машины и оборудование» АГТУ (рисунки 3.1 и 3.2).

В ходе экспериментальных исследований осуществлялся отбор проб для определения их влажности. Способ отбора проб – улавливание капель экстракта из зоны сушки на поверхность гидрофобного материала заключенного в пробоотборник специальной конструкции.

С целью расширения пределов изменения температуры сушильного агента, лабораторный стенд (рисунок 3.1) модифицирован путем введения добавочных теплоэлектронагревателей в электрокалорифер СФО-20/10 УХЛЗ. Регулирование расходных параметров теплоносителя IV (максимально $Q_{с.а.} = 1200\text{м}^3/\text{ч}$) при варьируемых температурах $T_{с.а.}$ в сушильной камере 6 организована с помощью байпасного воздухопровода 2.



(а)



(б)



(в)



(г)



(д)

Рисунок 3.1 – Установка для экспериментального исследования процессов распылительной сушки: (а), (б) – сушильная камера; (в) – циклон; (г) – акустический распылитель; (д) – компрессор

Температура сушильного агента фиксировалась при его вводе в область влагоудаления б и выводе из нее посредством хромель-копелевых термопар З ХК(L) ТП-011, подключаемых к мультиметрам.

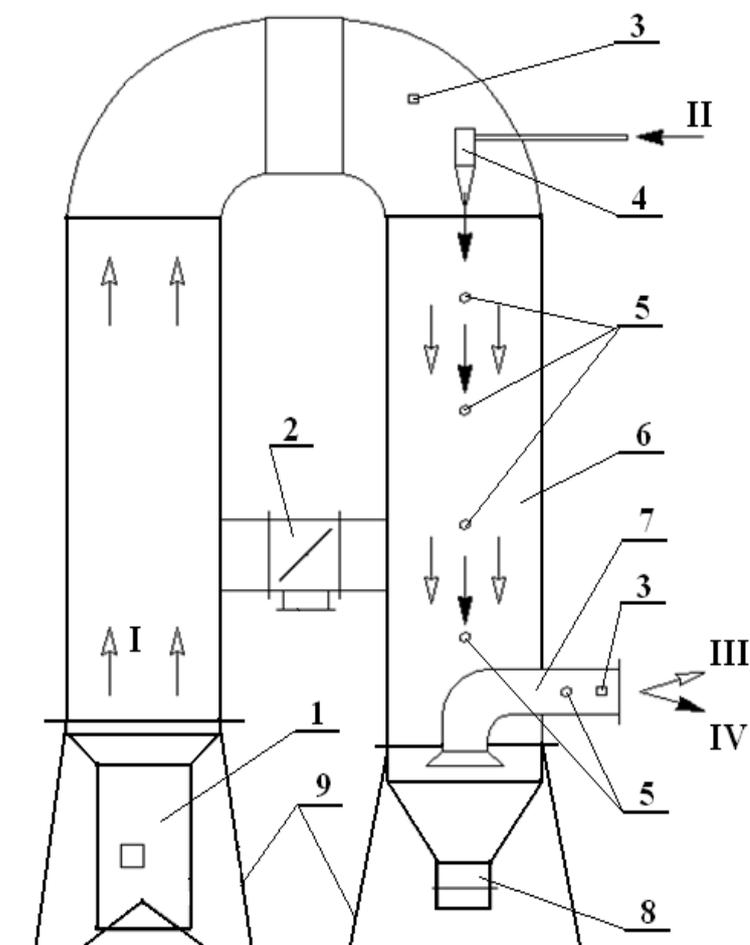


Рисунок 3.2 – Принципиальная схема установки для экспериментального исследования процессов распылительной сушки:

1 – электрокалорифер СФО-20/10 УХЛЗ; 2 – байпас с запорной/регулирующей дроссельной заслонкой; 3 – термопара; 4 – форсунка; 5 – штуцеры для отбора проб продукта; 6 – сушильная камера (рабочая зона); 7 – трубопровод/воздухопровод для отвода продукта и сушильного агента из зоны сушки; 8 – сборник продукта; 9 – опоры.

Потоки: I – сушильный агент; II – исходный экстракт; III – отработавший сушильный агент в циклон; IV – сухой экстракт – порошок.

При сушке исходный экстракт зеленого чая с начальной влажностью W_n (поток II) (рисунок 3.2) диспергировался со средним характерным размером распыленных частиц 20..30 мкм в рабочую камеру 6 диспергатора – акустического распылителя 4 (форсунка с газоструйным излучателем Гартмана). Регулировка расхода и давления распыливающего агента – воздуха для стабильной работы распылителя осуществлялась с помощью поршневого

компрессора Atmos Bobby 4/46 с однофазным электродвигателем и системой фильтрационной очистки воздуха.

Параметры режима распыления и характеристики факела распыла (таблица 3.1) установлены в ходе комплекса предварительных экспериментов, которые выполнялись для установления устойчивого режима подачи экстракта в зону обезвоживания.

Таблица 3.1 – Режим распыления и характеристики факела распыла экстракта зеленого чая

Режим распыления	
Давление воздуха, бар	3-6
Расход экстракта на распыление $G_{\text{вн}}$, кг/ч	4,5
Расстояние от сопловых отверстий форсунки до резонатора, мм	2 – 6
Характеристики факела распыла	
Корневой угол, град	120 – 135
Дальнобойность, м	0,3 – 0,65
Средний характерный размер распыленных частиц, мкм	20 – 30

Продолжительность витания частичек продукта в сушильном пространстве определена в постановочной опытной серии при варьировании расходных параметров воздушного теплоносителя. Из сушильной зоны поток подавался в циклонную установку, где проходило отделение материала IV от отработанного воздушного теплоносителя III.

В ходе анализа основополагающих работ в области исследования процессов конвективного обезвоживания различных материалов и ряда других исследований [81, 94, 183, 215] установлены основные влияющие на эффективность процесса факторы – температура сушильного агента $T_{c.a.}$, К и начальная температура продукта $T_{\text{прод}}$, К. Границы варьирования факторов (таблица 3.2) установлены из технологических ограничений и возможностей технической реализации экспериментального процесса сушки. Нижний предел $T_{\text{прод}} = 293$ К, соответствует температуре хранения жидких водных растительных экстрактов, а верхний предел $T_{\text{прод}} = 323$ К может достигаться предварительным нагревом экстракта, в том числе в процессе его

концентрирования, например, методом вакуум – выпаривания. Остальные факторы приняты постоянными и установлены в результате аналитических расчетов и серии постановочных экспериментов.

Таблица 3.2 – Факторы и уровни варьирования

Уровни \ Факторы	$T_{с.а.}, K$	$T_{прод}, K$
1	443	293
2	463	308
3	483	323

В основных исследовательских работах по анализу кинетики распылительной сушки [25, 26, 66, 81, 225] отмечено, что закономерности процесса устанавливаются при обезвоживании отдельных частиц при постоянном режиме, ввиду технической сложности получения адекватных результатов при реальной сушке большого числа диспергированных частиц в потоке теплоносителя, свойства которого меняются во времени процесса.

Опытная серия спланирована по полному многоуровневому многофакторному плану. Непрерывный процесс распылительной конвективной сушки экстракта производился при прямоточном контакте распыленных частиц материала с сушильным агентом – нагретым воздухом. В установившемся режиме сушки, то есть при постоянных параметрах процесса (температура и влажность сушильного агента и продукта) по высоте рабочей зоны сушильной камеры, осуществлялся отбор проб витающих частиц продукта по высоте камеры 6 через штуцеры 5 (рисунок 3.2).

Для исследований был использован традиционный лабораторный метод, связанный с отбором проб из зоны сушки на гидрофобное покрытие при дальнейшей досушке отобранных.

Пробоотборник – пруток из полимерного материала с пазом в котором установлен предварительно взвешенный гидрофобный материал (микрофибра). Использование гидрофобного материала позволяет исключить контакт материала с влагой, переданной сушильному агенту и, следовательно, организовать улавливание только влажных частиц продукта.

При разгрузке материал с пробой оперативно извлекался из пробоотборника и взвешивался на аналитических весах. Далее проба высушивалась при соответствующем значении $T_{с.а.}$ (таблица 3.2), устанавливаемого помощью электрического тепловентилятора при постоянном расходе и равномерном обдуве частиц исследуемого продукта.

Обезвоживание навесок осуществлялось до неизменной массы при W_k . Вычислялась W навесок в местах их отбора по высоте сушильной зоны, каждое из которых соответствовало определенному текущему времени операции сушки (таблицы П.1 – П.3, приложение 1). Величины текущей W , кг/кг находились по соотношению:

$$W = \frac{m_i - m_{W_k} \cdot W_k}{m_i} \quad (3.1),$$

где m_n – текущая масса пробы продукта, кг; m_{W_k} – масса высушенной пробы продукта, кг; W_k – конечная влажность продукта, кг/кг.

Относительная погрешность при нахождении W не превышала $\varepsilon_W \leq 13\%$.

3.2 Исследование кинетики распылительной сушки экстракта зеленого чая

Опираясь на полученные эмпирические данные (таблицы П.1 – П.3, приложение 1) построены кривые сушки продукта (рисунки 3.3 – 3.5).

При получении функциональных зависимостей скорости процесса сушки $dW/d\tau$ или $dc/d\tau$, кг/(кг·с) от текущей влажности W или содержания сухих веществ c , кг/кг ($c = 1 - W$), экспериментальные данные (таблицы П.1 – П.3, приложение 1) графически представлены в виде зависимости $\tau(W)$ (в качестве на рисунке 3.6) и математически описаны полиномиальной зависимостью вида:

$$\tau(W) = a_k \cdot W^4 + b_k \cdot W^3 + c_k \cdot W^2 + d_k \cdot W + e_k, \quad (3.2)$$

где $\tau(W)$ – текущее время сушки, с; a_k, b_k, c_k, d_k, e_k – эмпирические коэффициенты, с (таблица П.4, приложение 1). Величина достоверности

аппроксимации составляла не менее $R^2=0,99$. Размерность коэффициентов равна отношению размерности функции к размерности аргумента.

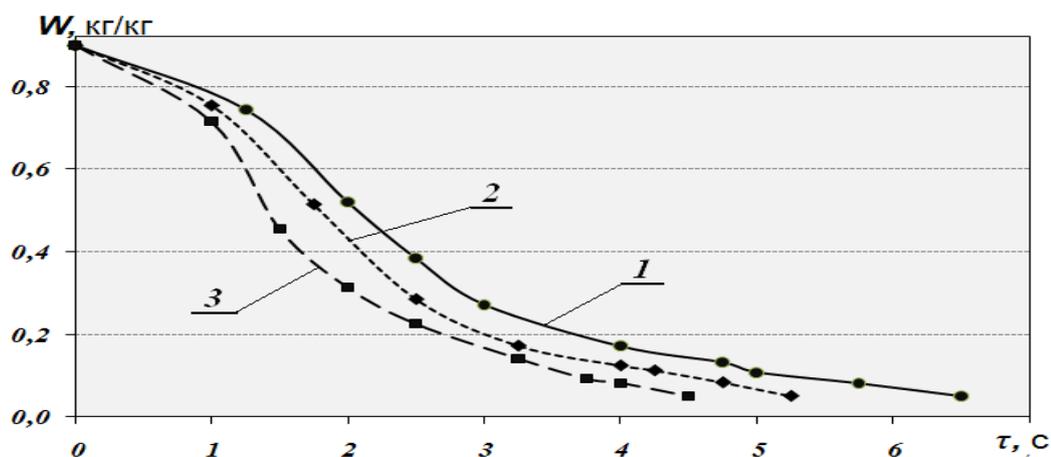


Рисунок 3.3 – Кинетика конвективной распылительной сушки экстракта зеленого чая при $T_{prod} = 293\text{K}$: 1 – при $T_{c.a.} = 443\text{K}$; 2 – при $T_{c.a.} = 463\text{K}$; 3 – при $T_{c.a.} = 483\text{K}$.

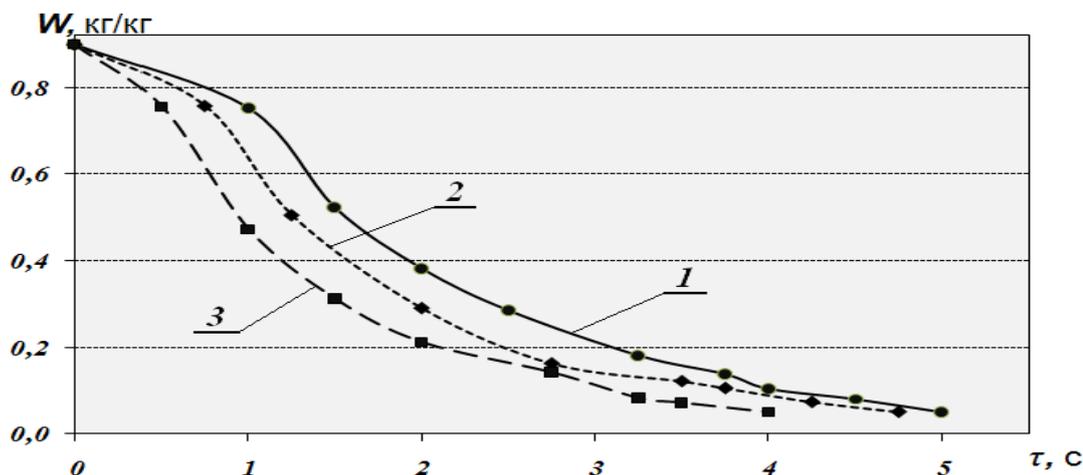


Рисунок 3.4 – Кинетика конвективной распылительной сушки экстракта зеленого чая при $T_{prod} = 308\text{K}$: 1 – при $T_{c.a.} = 443\text{K}$; 2 – при $T_{c.a.} = 463\text{K}$; 3 – при $T_{c.a.} = 483\text{K}$.

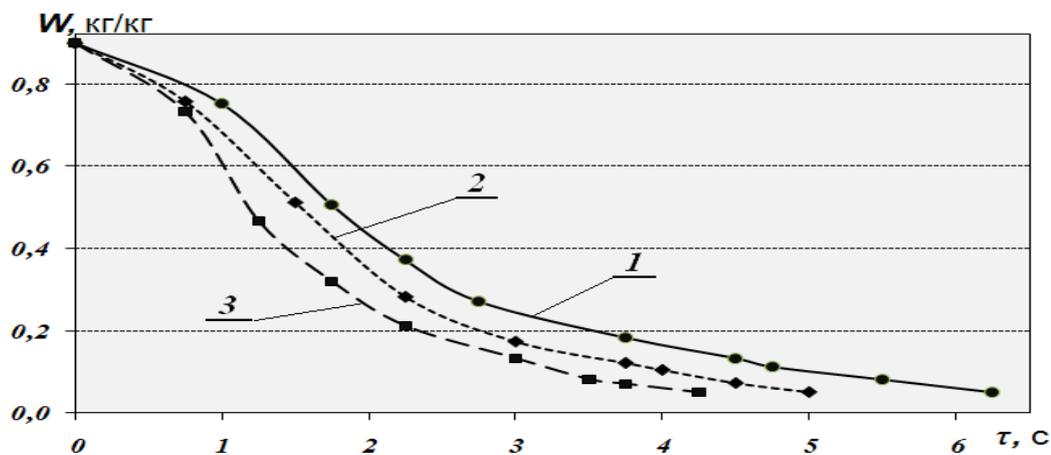


Рисунок 3.5 – Кинетика конвективной распылительной сушки экстракта зеленого чая при $T_{prod} = 323\text{K}$: 1 – при $T_{c.a.} = 443\text{K}$; 2 – при $T_{c.a.} = 463\text{K}$; 3 – при $T_{c.a.} = 483\text{K}$.

При дифференцировании зависимости (3.2) по влажности W :

$$\frac{d\tau}{dW} = 4 \cdot a_k \cdot W^3 + 3 \cdot b_k \cdot W^2 + 2 \cdot c_k \cdot W + d_k, \quad (3.3).$$

$$\frac{dW}{d\tau} = \frac{1}{4 \cdot a_k \cdot W^3 + 3 \cdot b_k \cdot W^2 + 2 \cdot c_k \cdot W + d_k}, \quad (3.4).$$

При замене $W = 1 - c$:

$$\frac{dc}{d\tau} = \frac{-1}{4 \cdot a_k \cdot (1-c)^3 + 3 \cdot b_k \cdot (1-c)^2 + 2 \cdot c_k \cdot (1-c) + d_k}, \quad (3.5).$$

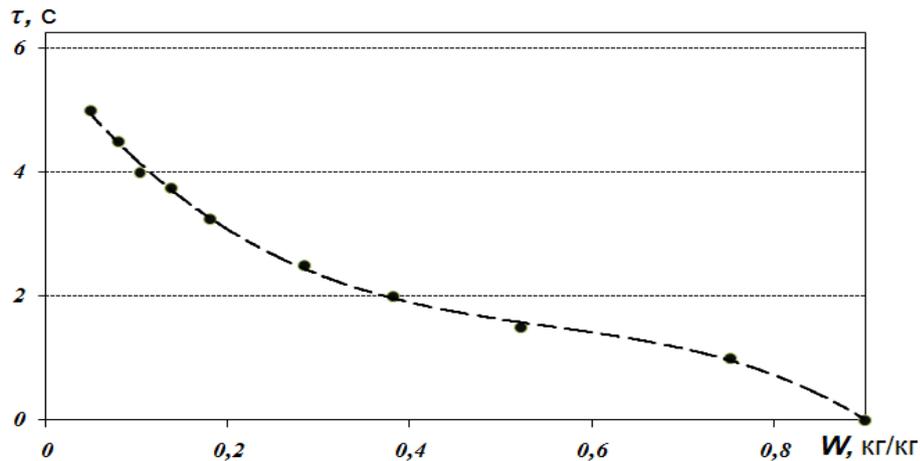


Рисунок 3.6 – Зависимость времени от влажности при конвективной распылительной сушке экстракта зеленого чая (при $T_{prod} = 308K$ и $T_{c.a.} = 443K$): (●) – экспериментальные данные; (- - -) – аппроксимирующая функциональная зависимость.

На рисунках 3.7 – 3.9 для анализа представлены кривые скорости сушки, построенные с использованием функциональной зависимости (3.5).

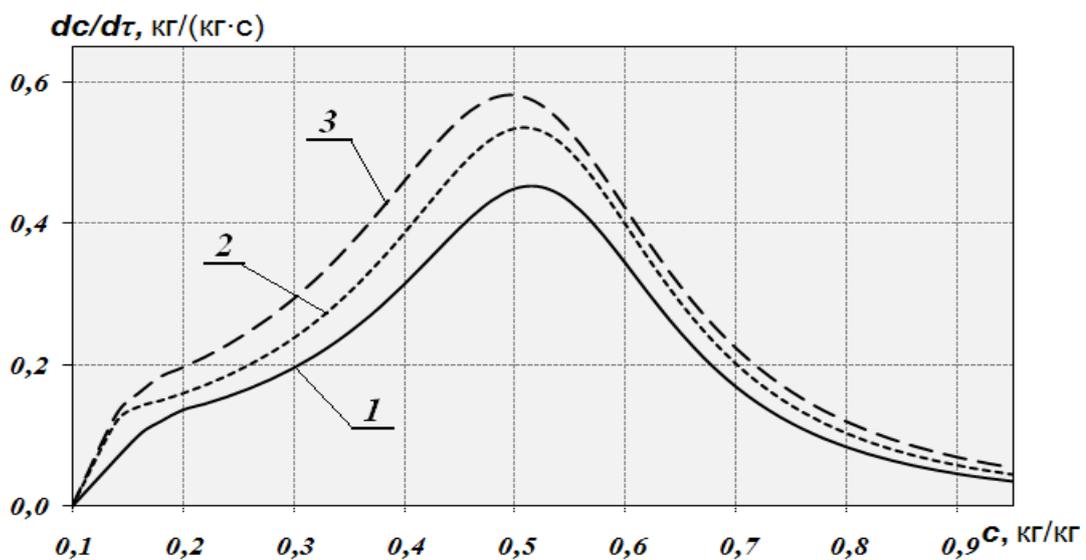


Рисунок 3.7 – Кривые скорости конвективной распылительной сушки экстракта зеленого чая при $T_{prod} = 293K$: 1 – при $T_{c.a.} = 443K$; 2 – при $T_{c.a.} = 463K$; 3 – при $T_{c.a.} = 483K$.

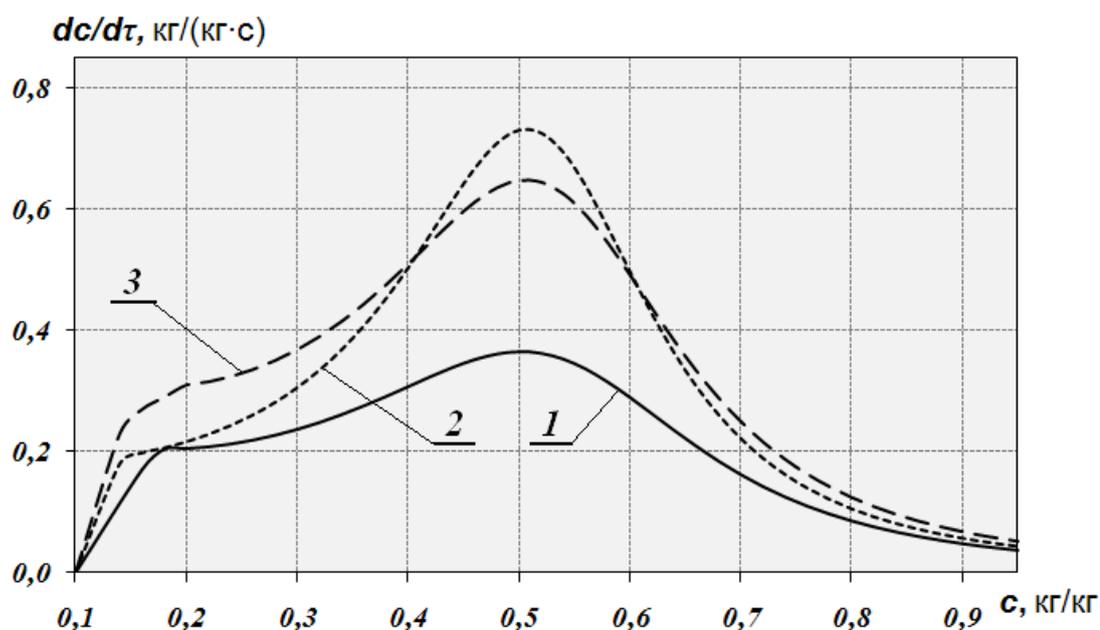


Рисунок 3.8 – Кривые скорости конвективной распылительной сушки экстракта зеленого чая при $T_{prod} = 308\text{K}$: 1 – при $T_{c.a.} = 443\text{K}$; 2 – при $T_{c.a.} = 463\text{K}$; 3 – при $T_{c.a.} = 483\text{K}$.

Систематизируя опытные данные в пределах изменения $T_{c.a.}$ для ускорения инженерных расчетных процедур и упрощения решения математической модели обезвоживания, по методике точного соответствия величинам в узловых точках найдены параметрические опытные кинетические коэффициенты.

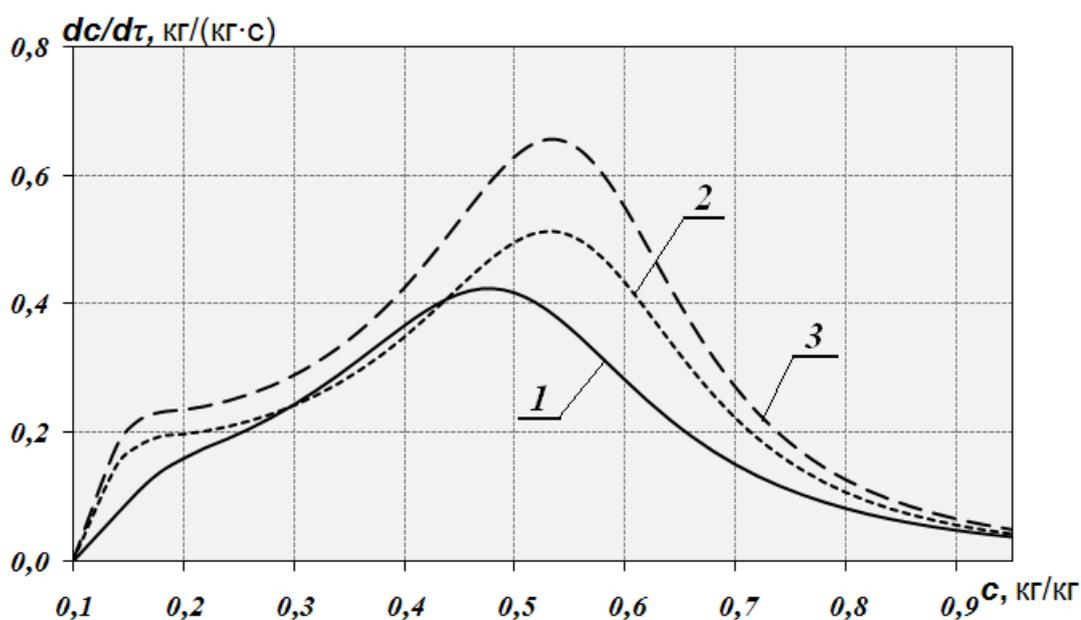


Рисунок 3.9 – Кривые скорости конвективной распылительной сушки экстракта зеленого чая при $T_{prod} = 323\text{K}$: 1 – при $T_{c.a.} = 443\text{K}$; 2 – при $T_{c.a.} = 463\text{K}$; 3 – при $T_{c.a.} = 483\text{K}$.

Зависимость (3.5) при обобщении принимает вид:

$$\frac{dc}{d\tau} = -1 \sqrt{[4 \cdot (A_k \cdot Tc.a.^2 + B_k \cdot Tc.a. + C_k) \cdot (1-c)^3 + 3 \cdot (D_k \cdot Tc.a.^2 + E_k \cdot Tc.a. + F_k) \cdot (1-c)^2 + 2 \cdot (G_k \cdot Tc.a.^2 + H_k \cdot Tc.a. + K_k) \cdot (1-c) + (L_k \cdot Tc.a.^2 + M_k \cdot Tc.a. + N_k)]} \quad (3.6)$$

где $A_k, B_k, C_k, D_k, E_k, F_k, G_k, H_k, K_k, L_k, M_k, N_k$ – кинетические коэффициенты (таблица 3.3). Величина достоверности аппроксимации составляла не менее $R^2=0,99$. Единицы измерения коэффициентов находят, как отношение единицы измерения функционала к единице измерения конкретных аргументов или их произведения. Размерность A_k, D_k, G_k, L_k – c/K^2 ; B_k, E_k, H_k, M_k – c/K ; C_k, F_k, K_k, N_k – c .

Для установления рациональных режимов используя зависимость (3.6) можно определять значения скорости процесса для различных сочетаний влияющих факторов.

Таблица 3.3 – Кинетические коэффициенты функциональных зависимостей скорости процесса сушки экстракта зеленого чая

Фактор \ Коэффициент	$T_{prod} = 293K$	$T_{prod} = 308K$	$T_{prod} = 323K$
A_k	0,004921875	0,00802275	-0,019838
B_k	-4,91723375	-7,6381865	18,584658
C_k	1240,679004375	1841,46565475	-4321,259832
D_k	-0,010862125	-0,007945875	0,035833125
E_k	10,99995025	7,91065275	-33,40492625
F_k	-2825,210591625	-2029,933745375	7704,3331806249
G_k	0,009066	0,000416875	-0,019228375
H_k	-9,231186	-0,90534875	17,73026275
K_k	2392,437264	398,129094375	-4014,383732875
L_k	-0,003641125	-0,0004025	0,00233525
M_k	3,69404425	0,612105	-2,0068315
N_k	-957,531962625	-226,2292925	398,86467725

В качестве примера, на рисунках 3.10 – 3.12 в графическом виде представлены кривые скорости сушки.

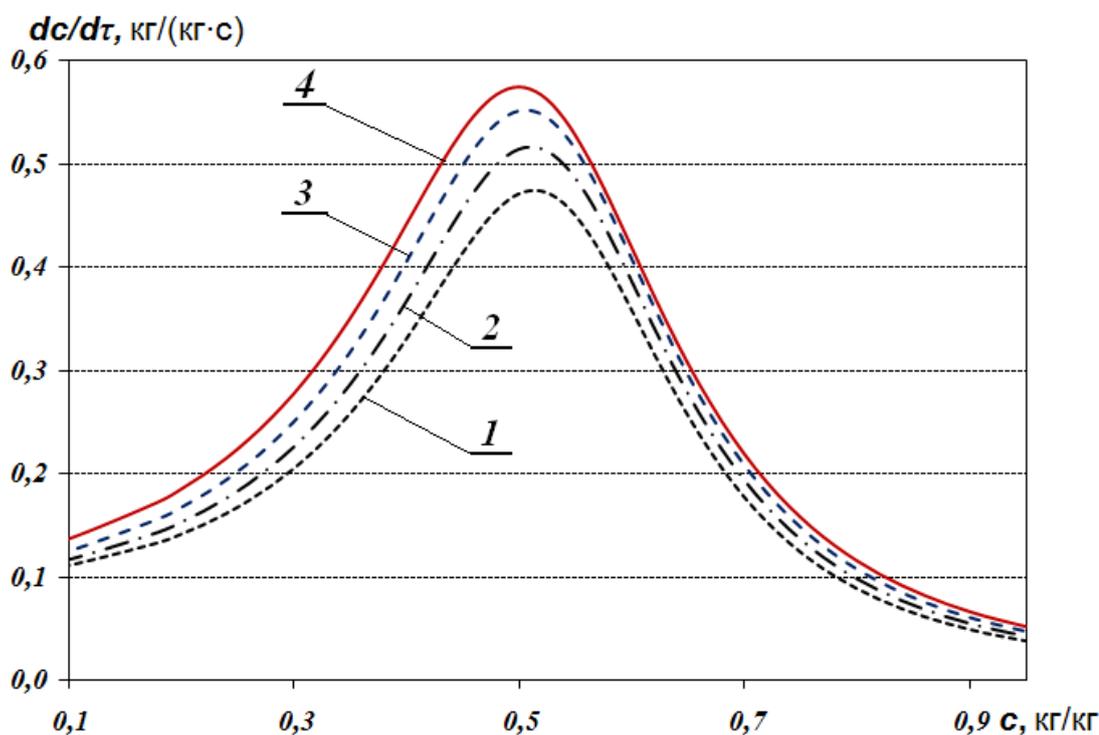


Рисунок 3.10 – Кривые скорости конвективной распылительной сушки экстракта зеленого чая при $T_{prod} = 293\text{K}$: 1 – при $T_{c.a.} = 448\text{K}$; 2 – при $T_{c.a.} = 458\text{K}$; 3 – при $T_{c.a.} = 468\text{K}$; 4 – при $T_{c.a.} = 478\text{K}$.

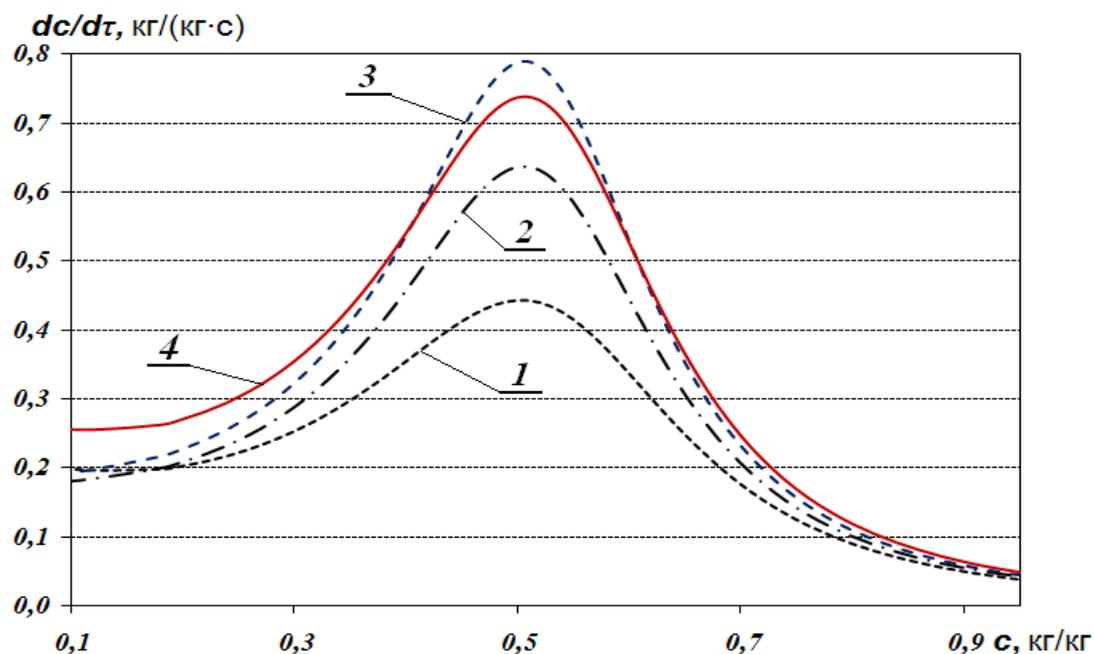


Рисунок 3.11 – Кривые скорости конвективной распылительной сушки экстракта зеленого чая при $T_{prod} = 308\text{K}$: 1 – при $T_{c.a.} = 448\text{K}$; 2 – при $T_{c.a.} = 458\text{K}$; 3 – при $T_{c.a.} = 468\text{K}$; 4 – при $T_{c.a.} = 478\text{K}$.

Анализ характера экспериментальных кривых скорости сушки экстракта зеленого чая (рисунки 3.7 – 3.12) и результатов исследований ряда авторов [9,

81, 183] позволяет сделать вывод о том, что при интенсивной распылительной сушке зависимость скорости носит экстремальный характер.

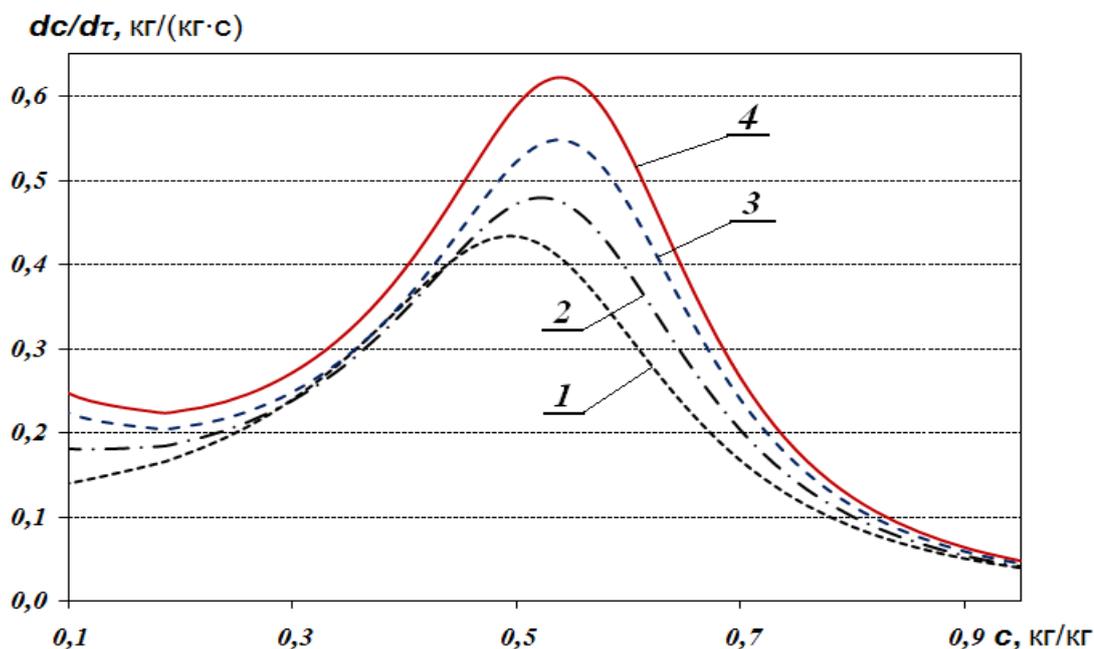


Рисунок 3.12 – Кривые скорости конвективной распылительной сушки экстракта зеленого чая при $T_{prod} = 323K$: 1 – при $T_{s.a.} = 448K$; 2 – при $T_{s.a.} = 458K$; 3 – при $T_{s.a.} = 468K$; 4 – при $T_{s.a.} = 478K$.

Отмечается быстрый рост функции $dc/d\tau$ до максимального значения с последующим резким падением, что обусловлено процессами формирования капиллярно-пористой структуры частиц продукта при их обезвоживании.

3.3 Анализ механизма внутреннего массопереноса при распылительной сушке экстракта зеленого чая

При построении и адаптации математической модели тепломассопереноса к объекту исследования пользуются терминами «толстый» и «тонкий слой» [9, 30, 31]. С целью разработки физико-математической модели процесса конвективной распылительной сушки тонкодиспергированных частиц экстракта зеленого чая (средний объемный диаметр частиц 20 .. 30мкм), логично витающую в потоке сушильного агента частицу материала рассматривать как «тонкий слой». Понятие «тонкий слой» определяет незначительные величины теплового и массообменного чисел Био

($Bi_T \ll 1, Bi_M \ll 1$), а, значит, можно считать, что температурное поле и поле влажности по сечению материала однородны.

Комплексный анализ выводов и результатов экспериментальных и аналитических исследований ряда авторов [9, 30, 31, 59, 60, 62-66, 81, 92, 202, 203] и собственных исследований кинетики конвективной распылительной сушки показал, что явно прослеживаются два характерных периода обезвоживания, что не противоречит основным положениям теории сушки [30, 31, 62-66].

На первом этапе влагоудаления интенсивность сушки возрастает до наибольшей величины (рисунки 3.7 – 3.12). Следует отметить, что при интенсивном протекании влагоудаления в этом периоде при обезвоживании экстракта на характер протекания тепломассообменных процессов влияние могут оказывать процессы формирования капиллярно-пористого коллоидного тела, в том числе за счет явлений коагуляции частиц дисперсной фазы экстракта, что объясняет непостоянство скорости, а, значит и температуры материала. Стремительное удаление преимущественно свободной влаги с поверхности частиц за счет интенсивного испарения исключает перегрев продукта на первоначальном этапе процесса. Происходит уменьшение объема распыленной частицы и в условиях влагоотдачи увеличивается концентрация сухих веществ в частице, соответственно, сокращается расстояние между мицеллами дисперсной фазы, что запускает механизм формирования внутренней структуры будущего сухого продукта.

В конце первого периода, влажность на поверхности частицы достигает гигроскопического значения. Актуализируются процессы удаления влаги полимолекулярной адсорбции, объем частиц практически не изменяется. Интенсифицируется прогрев материала, что подтверждается термограммами [30, 31] и характером полей распределения температур (глава 6) [9, 81].

Из публикаций [62-66] следует, что изначально парообразование наблюдается внутри частицы, а впоследствии при усадке наблюдается «переворот» частицы поверхностью испарения наружу, где формируется

паровая прослойка и пар диффундирует путем последовательных процедур парообразования и конденсации на жидких пленках [63].

На 2-ой стадии (рисунки 3.7 – 3.12), перейдя экстремум при стремлении к W_k , по причине нарастающего несоответствия между поверхностным парообразованием и внутренним трансфером влаги наблюдается углубление фронта парообразования [9, 30, 31, 62-66]. T капли растет, стремясь к T воздушного теплоносителя, что обуславливает растрескивание обезвоженных частиц и объемное порообразование.

Таким образом, на основании рассмотренных закономерностей, при математическом моделировании тепломассообменных процессов распылительной сушки экстракта в основном уравнении теплопереноса [63] коэффициент фазового превращения ε с достаточной точностью можно принять равным 1, что соответствует переносу влаги внутри частицы до границы испарения в виде пара.

Для анализа кинетики изменения влажности, размеров и структуры капель/частиц высушиваемого материала при их сушке применим традиционный лабораторный метод, связанный с нанесением капель продукта на гидрофобное покрытие и дальнейшей регистрацией убыли веса экспериментального образца – навески при сушке.

Опытная серия осуществлялась в следующей последовательности:

- На поверхность стеклянной подложки предварительно наносилось парафиновое гидрофобное покрытие (температура плавления $\geq 65^\circ\text{C}$) и она размещалась на аналитических весах.
- На поверхность подложки с покрытием инъекционными шприцами с внутренним диаметром иглы 0,4мм наносились капли экстракта при $W_n = 0,9$ кг/кг.
- Посредством тепловентилятора при поддержании постоянной $T_{c.a.} = 333\text{K}$ и неизменном расходе воздуха осуществлялся равномерный обдув капель исследуемого экстракта.
- Регистрировалось снижение массы капель (навески).

- Опираясь на опытные данные, формировалась таблица замеров для последующей обработки и анализа.

В результате получена обобщенная кривая сушки единичной капли экстракта зеленого чая (рисунок 3.13) и после соответствующих вычислений получена обобщенная кривая скорости сушки капли (рисунок 3.14).

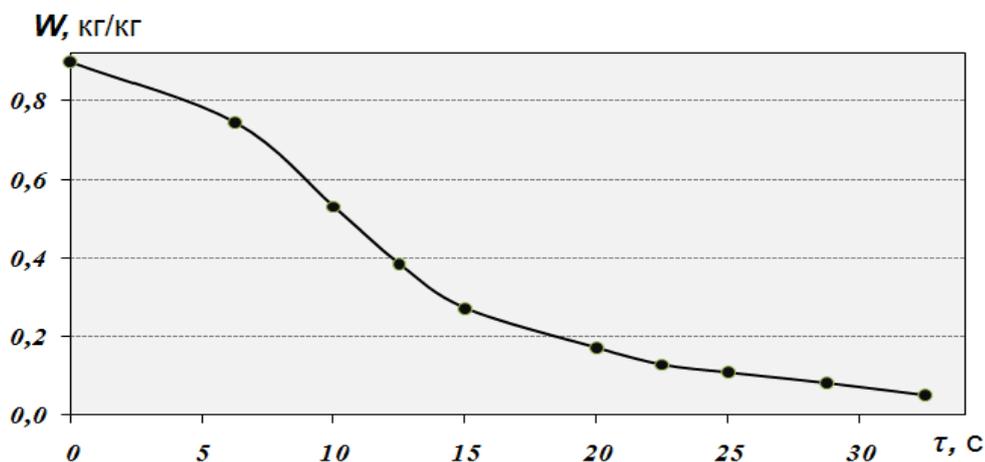


Рисунок 3.13 – Кинетика конвективной сушки экстракта зеленого чая

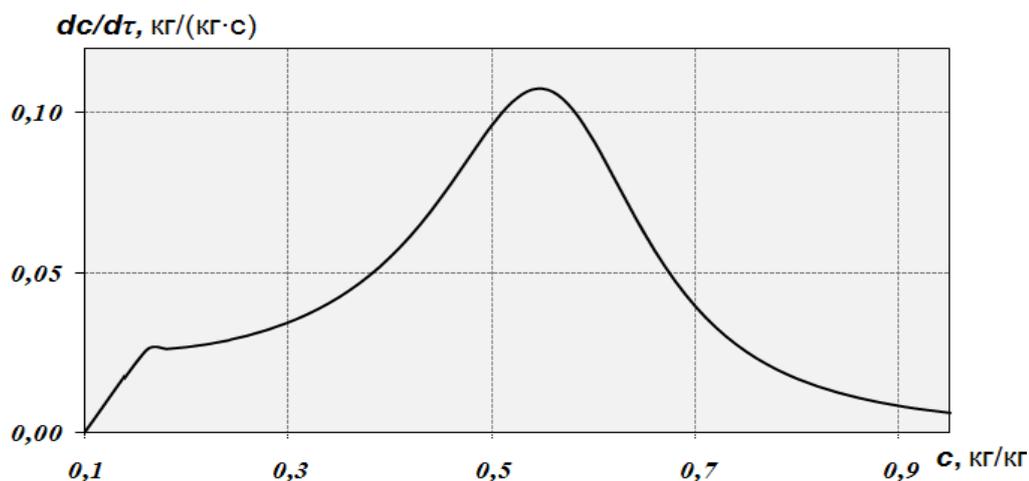


Рисунок 3.14 – Кривая скорости конвективной сушки экстракта зеленого чая

В опытной серии осуществлялось измерение температуры материала при испарении единичных капель экстракта согласно, разработанной в Институте технической теплофизики (ИТТФ) НАН Украины методики. В ходе экспериментов капли экстракта, закреплялись на спае термопары ХК(L) ТП-011, подключаемой к мультиметру и производилась подача нагретого воздуха при постоянном расходе и температуре (333К). Во времени процесса

осуществлялась регистрация температуры продукта для построения термограмм и их последующего анализа.

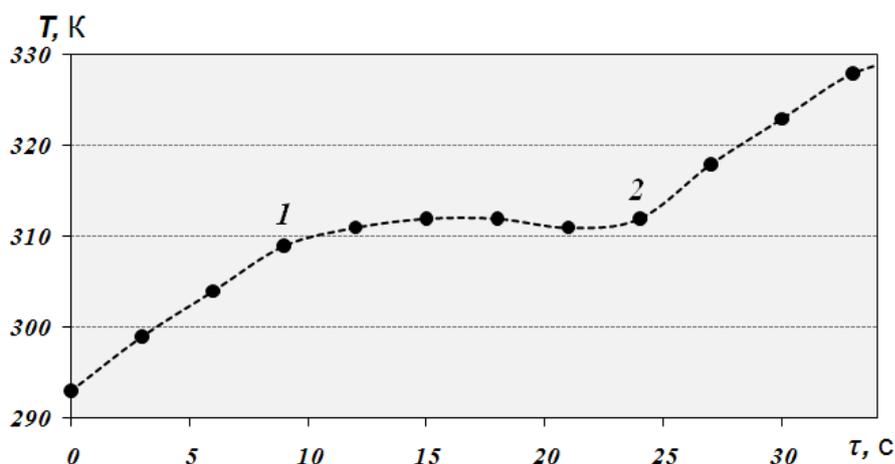


Рисунок 3.15 – Термограмма конвективной сушки экстракта зеленого чая

На температурной кривой (рисунок 3.15) прослеживаются три стадии: 1 – повышение T до сингулярного значения 1, что обусловлено прогревом материала при малом уменьшении W ; 2 – промежуток 1 – 2, обусловленный интенсивным парообразованием; 3 – после точки 2 наблюдается досушивание в зоне снижающейся интенсивности обезвоживания при формировании твердообразной структуры материала. Характер термограммы подтверждает сделанные выводы о механизме распылительной сушки.

Дополнительно были проведены экспериментальные исследования по оценке изменений структуры высушиваемых частиц (капель) на специально разработанной установке (рисунок 3.16) следующим образом:

- На поверхность стеклянной подложки предварительно наносилось парафиновое гидрофобное покрытие (температура плавления $\geq 65^\circ\text{C}$) и она размещалась на предметном столике биологического микроскопа.
- На поверхность подложки с покрытием инъекционными шприцами с внутренним диаметром иглы 0,4мм наносились капли экстракта при $W_n = 0,9$ кг/кг.
- Посредством тепловентилятора при поддержании постоянной $T_{с.а.} = 333\text{K}$ и неизменном расходе воздуха осуществлялся равномерный обдув капель исследуемого экстракта.

- При процедуре обезвоживания проводилась визуальная оценка структуризации капли посредством программного продукта для анализа изображений Altami Studio и биомикроскопа Altami БИ О2 (объектив 10x/0,25 – увеличение 10 кратное, численная апертура объектива 0,25), снабженного цифровой окулярной USB видеокамерой Altami USB 5000R5 1/2.5CMOS. В реальном временном режиме проводилась фотографическая съемка с ежесекундной кадровой частотой снимков высокого разрешения (до 2048x1536 пикселей).



Рисунок 3.16 – Общий вид экспериментальной установки для исследования процессов формирования капиллярно-пористой структуры частиц при распылительной сушке

На рисунке 3.17 показаны фотографии структуры частиц, корреляция которых с опытными данными по статическим и кинетическим закономерностям операции влагоудаления, дает возможность проанализировать специфические особенности распылительной сушки и дать комплексную оценку тепломассообмену и внутреннему тепломассопереносу.

На первом этапе влагоудаления интенсивность сушки возрастает до наибольшей величины (рисунок 3.17(а) и 3.17(б)) и сокращается расстояние между частицами дисперсной фазы. В конце этого периода, влажность на поверхности частицы достигает гигроскопического значения. Далее в процессе перехода к удалению влаги полимолекулярной адсорбции во втором периоде, объем частицы практически не изменяется, но значительно интенсифицируется прогрев материала, что подтверждается термограммой. Во втором периоде, в результате возрастающего несоответствия между расходом влаги, испаряющейся с поверхности частицы, и расходом влаги, поступающей из внутренних слоев, происходит углубление зоны испарения

вглубь частицы [30, 62] и при этом оформляется ее твердая структура. Температура частиц увеличивается, приближаясь к температуре сушильного агента.

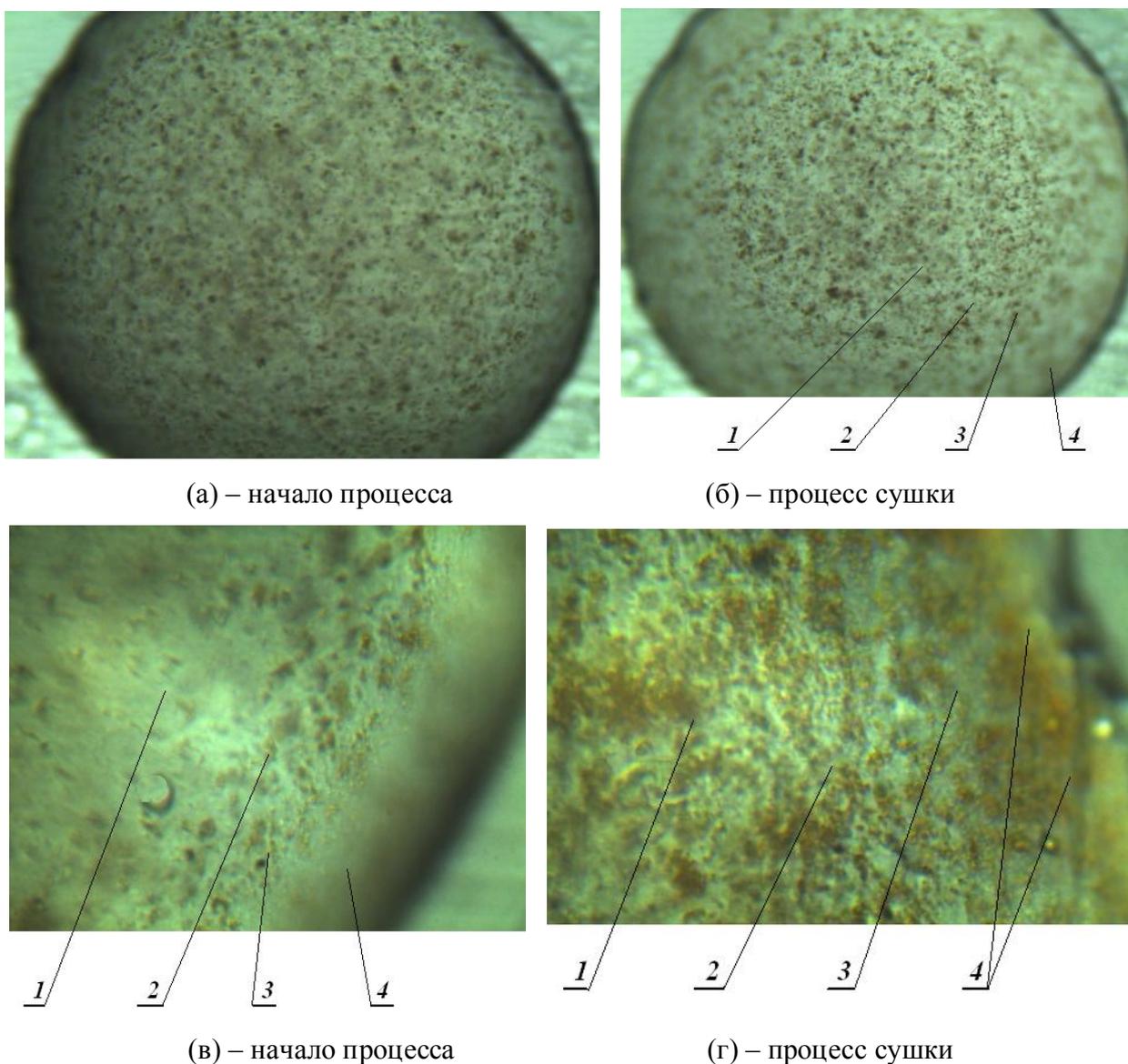


Рисунок 3.17 – Фотокадры капли экстракта зеленого чая в процессе сушки: (а) и (б) – увеличение 10х/0,25; (в) и (г) – увеличение 40х/0,65; 1 – внутренний слой капли, 2 – приграничный слой капли; 3 – граница испарения; 4 – поверхность капли

Механизм и характер тепломассообменных процессов при распылительной сушке экстракта зеленого чая отличается от механизма обезвоживания кусковых и нативных продуктов растительного происхождения с сохраненной структурой растительной ткани, так как сушка жидкого раствора происходит интенсивно в каплях малых размеров.

ГЛАВА 4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СУШКЕ ЭКСТРАКТА ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ

Для разработки или рациональной модернизации сушильных технологий и техники необходима информация об обоснованных с экономической точки режимных параметрах операции обезвоживания при максимизации удельного выхода и напряженности по влаге аппарата при сохранении качественных показателей сухого материала.

4.1 Производительность распылительной сушильной установки для экстракта зеленого чая

Изучение изменения удельного выхода, напряженности по влаге и продолжительности процесса сушки τ_c экстракта (таблица 4.1) до значения W_k опиралось на опытные результаты исследования кинетических закономерностей операции влагоудаления (п. 3.1) в зависимости от влияющих на ее интенсивность режимных параметров (таблица 3.3).

Принимая во внимание опубликованные данные [9, 81, 183, 214], за целевой функционал при определении рациональных режимных параметров обезвоживания экстракта взят массовый выход высушенного материала, отнесенный к τ_c и объему сушильной зоны аппарата Π , кг/(м³·ч):

$$\Pi = G_{W_k} / V, \quad (4.1)$$

где G_{W_k} – массовый выход высушенного материала, отнесенный к τ_c , кг/ч; V – объем сушильной зоны аппарата, м³.

$$G_{W_k} = G_{W_n} \cdot (1 - W_n) / (1 - W_k), \quad (4.2)$$

Очевидно, что при непрерывном обезвоживании экстракта в распыленном состоянии при конвективном подводе тепловой энергии в режиме прямотока, необходимая длина пробега частиц продукта определяет полезный объем сушильной зоны промышленного или опытного аппаратов.

Для заданного начального эквивалентного диаметра капель 20 – 30 мкм, производительности по исходному $G_{Wн} = 4,5$ кг/ч и при $T_{с.а.} = 443..503$ К, опытным путем найдена зависимость полезного объема аппарата от τ_c :

$$V = 0,0778 \cdot \tau_c, \quad (4.3)$$

Опираясь на связь удельного выхода сухого продукта и производительности аппарата по удаленной влаге выявлена зависимость удельной напряженности сушильной зоны по влаге B , кг/(м³·ч):

$$B = \frac{\Pi \cdot (W_H - W_K)}{(1 - W_H)} = \frac{G_{Wк} \cdot (W_H - W_K)}{V \cdot (1 - W_H)}, \quad (4.4)$$

Таблица 4.1 – Опытные данные по удельному выходу сухого продукта и напряженности сушильного объема аппарата по влаге

№	$T_{с.а.}$, К	$T_{прод.}$, К	$G_{Wн}$, кг/ч	$G_{Wк}$, кг/ч	τ_c , с	V , м ³	Π , кг/(м ³ ·ч)	B , кг/(м ³ ·ч)
1	443	293	4,5	0,5263	6,5	0,5057	0,937	7,962
2	463	293	4,5	0,5263	5,25	0,4085	1,160	9,858
3	483	293	4,5	0,5263	4,5	0,3501	1,353	11,500
4	443	308	4,5	0,5263	5	0,3890	1,218	10,350
5	463	308	4,5	0,5263	4,75	0,3696	1,282	10,895
6	483	308	4,5	0,5263	4	0,3112	1,522	12,938
7	443	323	4,5	0,5263	6,25	0,4863	0,974	8,280
8	463	323	4,5	0,5263	5	0,3890	1,218	10,350
9	483	323	4,5	0,5263	4,25	0,3307	1,433	12,177

На основе результатов (таблица 4.1.) получены линейно-степенные зависимости:

$$\begin{aligned} \Pi(T_{с.а.}, T_{прод.}) = & (a_w \cdot T_{прод.}^2 + b_w \cdot T_{прод.} + c_w) \cdot T_{с.а.}^2 + \\ & + (d_w \cdot T_{прод.}^2 + e_w \cdot T_{прод.} + f_w) \cdot T_{с.а.} + (g_w \cdot T_{прод.}^2 + h_w \cdot T_{прод.} + k_w) \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$B(T_{с.а.}, T_{прод.}) = \frac{(W_H - W_K)}{(1 - W_H)} \cdot \left[\begin{aligned} & (a_w \cdot T_{прод.}^2 + b_w \cdot T_{прод.} + c_w) \cdot T_{с.а.}^2 + \\ & + (d_w \cdot T_{прод.}^2 + e_w \cdot T_{прод.} + f_w) \cdot T_{с.а.} + \\ & + (g_w \cdot T_{прод.}^2 + h_w \cdot T_{прод.} + k_w) \end{aligned} \right] \quad (4.6),$$

где $a_w, b_w, c_w, d_w, e_w, f_w, g_w, h_w, k_w$, – параметрические опытные коэффициенты (таблица 4.2). Достоверность аппроксимации R^2 составляла не менее 0,95.

Единицы измерения определяются как отношение единицы измерения функционала и единиц измерения конкретных аргументов или их произведения: a_w – кг/(м³·ч·К⁴); b_w, d_w , – кг/(м³·ч·К³); c_w, e_w, g_w – кг/(м³·ч·К²); f_w, h_w – кг/(м³·ч·К); k_w , – кг/(м³·ч).

Таблица 4.2 – Величины параметрических опытных коэффициентов

a_w	-0,000001141331
b_w	0,000703105151
c_w	-0,108064844918
d_w	0,001071643986
e_w	-0,660139438633
f_w	101,466118260745
g_w	-0,251918861701
h_w	155,177386956568
k_w	-23851,619207026

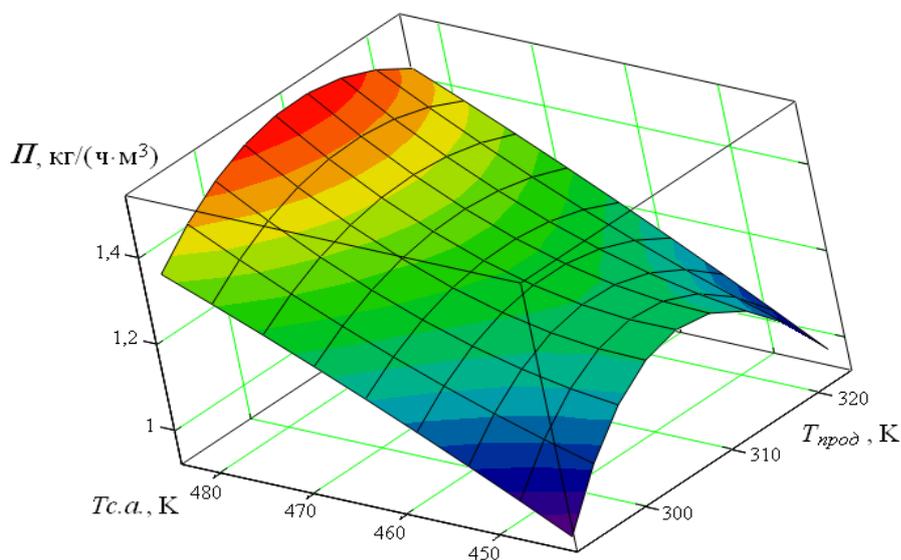


Рисунок 4.1 – Поле значений удельной производительности

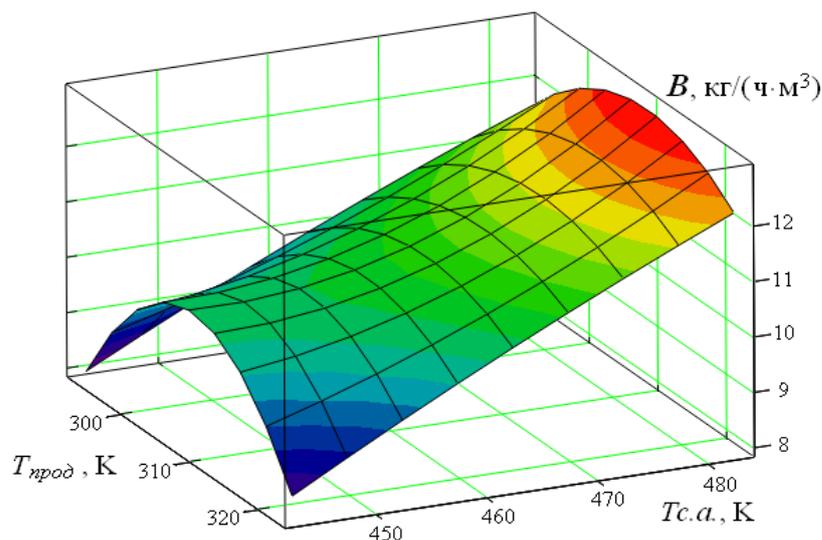


Рисунок 4.2 - Поле значений влагонапряженности рабочего объема сушильной камеры

Таблица 4.3 – Удельная производительность при сушке экстракта зеленого чая

$T_{\text{прод}}, \text{K}$ $T_{\text{с.а.}}, \text{K}$	293	298	303	308	313	318	323
443	0,939	1,091	1,184	1,220	1,197	1,116	0,976
448	0,997	1,116	1,190	1,219	1,204	1,144	1,040
453	1,054	1,146	1,205	1,230	1,221	1,178	1,102
458	1,109	1,182	1,230	1,251	1,247	1,218	1,162
463	1,162	1,223	1,264	1,284	1,283	1,262	1,220
468	1,213	1,270	1,308	1,328	1,329	1,312	1,277
473	1,262	1,321	1,361	1,382	1,384	1,367	1,331
478	1,310	1,378	1,424	1,448	1,449	1,428	1,384
483	1,355	1,440	1,497	1,525	1,524	1,494	1,435

Таблица 4.4 – Удельная влагонапряженность при сушке экстракта зеленого чая

$T_{\text{прод}}, \text{K}$ $T_{\text{с.а.}}, \text{K}$	293	298	303	308	313	318	323
443	7,978	9,270	10,067	10,368	10,174	9,484	8,300
448	8,476	9,484	10,114	10,364	10,235	9,727	8,840
453	8,958	9,744	10,242	10,454	10,378	10,016	9,366
458	9,424	10,048	10,452	10,637	10,603	10,349	9,876
463	9,875	10,397	10,744	10,914	10,909	10,728	10,371
468	10,310	10,791	11,116	11,285	11,297	11,152	10,851
473	10,729	11,230	11,571	11,749	11,766	11,622	11,316
478	11,132	11,714	12,106	12,307	12,317	12,137	11,766
483	11,519	12,243	12,723	12,959	12,950	12,697	12,200

Графическая интерпретация зависимостей удельной производительности (рисунок 4.1) и удельной влагонапряженности (рисунок 4.2) объема сушильной камеры построены с использованием функциональных зависимостей (4.5) и (4.6). В таблицах 4.3 – 4.4 представлены численные значения удельной производительности и влагонапряженности, определенные с использованием (4.5) и (4.6), которые сопоставимы со значениями данных величин при обезвоживании растительных экстрактов на промышленных установках [9, 81, 183].

4.2 Анализ влияния основных факторов на производительность и влагонапряженность при распылительной сушке экстракта зеленого чая

Из анализа характера полей значений (рисунки 4.1 и 4.2) следует, что с ростом исходных температур экстракта и сушильного агента существенно

интенсифицируются тепломассообменные процессы, что определяет рост функций за счет сокращения продолжительности сушки.

Закономерности изменения Π и B от исходной температуры экстракта зеленого чая носят экстремальный характер (рисунки 4.1 и 4.2). Рост значений Π и B при увеличении исходной температуры экстракта в диапазоне $T_{prod} = 293 \dots 313\text{K}$ (рисунки 4.1 и 4.2) очевиден, так как сокращаются затраты энергии теплоносителя на прогрев продукта и повышается термический к.п.д. сушильной установки. При $T_{prod} = 310\text{K}$ достигаются максимумы съема сухого продукта и количества испаренной влаги с единицы объема камеры, а далее при $T_{prod} = 310..323\text{K}$ отмечается снижение значений Π и B , что обусловлено некоторым снижением скоростных характеристик внутреннего тепломассопереноса в частице продукта и внешнего тепломассообмена при контакте распыленных частиц экстракта зеленого чая с сушильным агентом. Как отмечалось в пункте 3.3 при анализе механизма внутреннего массопереноса при практически мгновенном (несколько секунд) обезвоживании распыленных капель в жестких термических режимах, стремительно протекают процессы формирования капиллярно-пористой структуры частиц, что, по-видимому, создает условия для образования сухой плотной оболочки на поверхности капель [62-66, 81], а, следовательно, приводит к иммобилизации влаги. Иммобилизация влаги в ходе процесса сушки обуславливает появление дополнительной связи влаги, на преодоление которой, дополнительно расходуется энергия сушильного агента, увеличивается продолжительность обезвоживания и снижается удельная влагонапряженность и производительность рабочего объема сушильной установки. Эффекты образования сухой плотной оболочки капель и иммобилизации влаги в процессе сушки, а также влияние этих явлений на кинетику процесса обезвоживания отмечены в ряде работ [62-66, 81, 183].

Границы варьирования исходной температуры экстракта зеленого чая (таблица 3.3) установлены из технологических ограничений. Нижний предел $T_{prod} = 293\text{K}$, соответствует температуре хранения жидких водных

растительных экстрактов, а верхний предел $T_{\text{прод}} = 323 \text{ К}$ может достигаться предварительным нагревом экстракта, в том числе в ходе вакуум – выпаривании.

С ростом начальной температуры сушильного агента удельная производительность (удельная влагонапряженность) рабочего объема сушильной установки также увеличивается (рисунки 4.1 и 4.2). Общеизвестно, что перегрев растительного пищевого материала в ходе сушки выше 333 К недопустим и снижает качество сушеной продукции.

Увеличение температуры экстракта $T_{\text{прод}} \geq 323 \text{ К}$ и температуры сушильного агента $T_{\text{с.а.}} \geq 483 \text{ К}$ приводит к термическому разложению растительного материала в ходе перегрева при сушке, что подтверждается результатами анализа качественных показателей сухого экстракта – порошка.

Оценить поля распределения температур в сечении движущихся тонкодисперсных частиц экстракта зеленого чая при высокой интенсивности процесса промышленной распылительной сушки экспериментально невозможно. Следовательно, очевидна необходимость реализации математической модели тепломассопереноса с целью расчета температур в течение процесса сушки в каждой пространственной точке объекта обезвоживания для управления качеством продукции при реализации различных температурных режимов при сушке.

4.3 Разработка режимных параметров конвективной распылительной сушки экстракта зеленого чая

Опираясь на закономерности (4.5) и (4.6) с помощью опции «maximize» в Mathcad Professional установлен рациональный режим для обеспечения максимумов целевых функций (таблица 4.5). Так как в реальности есть вероятность производственных ситуаций, в которых эффективное удаление влаги из экстракта при величинах влияющих факторов отличающихся от номинальных значений, с целью быстрой трансформации операции высушивания необходимо использовать результаты, сведенные в таблице 4.1.

Таблица 4.5 – Максимумы удельной производительности и удельной влагонапряженности, время сушки и рациональные значения варьируемых параметров

Продукт \ Параметр	P , кг/(м ³ ·ч)	B , кг/(м ³ ·ч)	τ_c , с	$T_{c.a.}$, К	$T_{prod.}$, К
Экстракт ($W_H = 0,9$ кг/кг)	1,528	12,985	4	483	310

В частности, при распылительной сушке водного экстракта зеленого чая при исходной температуре $T_{prod} = 293$ К, соответствующей температуре хранения жидких водных растительных экстрактов следует использовать режим представленный в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Удельная производительность и удельная влагонапряженность, время сушки и значения варьируемых параметров при $T_{prod} = 293$ К

Продукт \ Параметр	P , кг/(м ³ ·ч)	B , кг/(м ³ ·ч)	τ_c , с	$T_{c.a.}$, К	$T_{prod.}$, К
Экстракт ($W_H = 0,9$ кг/кг)	1,353	11,5	4,5	483	293

При распылительной сушке водного экстракта зеленого чая при исходной температуре $T_{prod} = 323$ К, которая может достигаться предварительным нагревом экстракта, в том числе в ходе вакуум – выпаривания, следует использовать режим представленный в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Удельная производительность и удельная влагонапряженность, время сушки и значения варьируемых параметров при $T_{prod} = 318$ К

Продукт \ Параметр	P , кг/(м ³ ·ч)	B , кг/(м ³ ·ч)	τ_c , с	$T_{c.a.}$, К	$T_{prod.}$, К
Экстракт ($W_H = 0,9$ кг/кг)	1,433	12,177	4,25	483	323

Режим, представленный в таблице 4.5 можно рекомендовать как рациональный, позволяющий обеспечить регламентируемые показатели качества сухого экстракта зеленого чая, для практического внедрения на предприятиях различной мощности. Дополнительно проведены исследования по определению значений качественных показателей опытных и опытно-промышленных образцов сухих порошков экстракта (Приложение 3).

В ходе комплекса теоретических и экспериментальных исследований установлено, что эффективное обезвоживание водного экстракта зеленого чая с начальной влажностью $W_n = 0,9$ кг/кг при конвективной распылительной сушке с удельной производительностью по сухому порошку экстракта $\Pi = 0,937..1,528$ кг/(м³·ч) и удельной влагонапряженностью рабочего объема сушильной камеры $B = 7,962..12,985$ кг/(м³·ч) необходимо осуществлять при следующих диапазонах варьирования режимных параметров:

- Начальная (исходная) температура водного экстракта зеленого чая $T_{прод} = 293..318$ К;
- Начальная (исходная) температура нагретого воздуха – сушильного агента $T_{с.а.} = 443..503$ К;
- Конечная температура отработавшего сушильного агента 343..353 К;
- Способ подачи экстракта зеленого чая в сушильную камеру – распыление.
- Способ распыления – акустический, механический и др.
- Начальный (исходный) диаметр распыленных частиц экстракта зеленого чая 20..30 мкм;
- Средний характерный размер частиц сухого экстракта зеленого чая – порошка 1..6 мкм.
- Удельный расход сушильного агента на 1 кг испаренной влаги $Q_{с.а.} = 20$ кг/кг.
- Параметры воздуха рабочей зоны производственного помещения перед нагревом и направлением в сушильную камеру (ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны и СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений): температура $T_e = 285..303$ К; влажность воздуха составляет $\varphi_e = 40..75\%$.

Полученные функциональные зависимости (4.5) и (4.6) рекомендуется применять для расчета режимных параметров при проектировании,

пуск/наладке и эксплуатации распылительных установок для сушки водных экстрактов. Рекомендованные режимы (таблица 4.5 – 4.7) позволяют использовать для обезвоживания экстракта зеленого чая типовые конструкции распылительных сушильных установок.

ГЛАВА 5. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И РАСЧЕТ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР В МАТЕРИАЛЕ ПРИ КОНВЕКТИВНОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКЕ ЭКСТРАКТА ЗЕЛЕНОГО ЧАЯ

Для повышения удельной производительности распылительных сушильных установок зачастую используют приемы для повышения температурных режимов в рабочей камере, то есть увеличение температуры продукта и/или температуры теплоносителя (например, нагретого воздуха) – сушильного агента. Для термолабильных растительных продуктов данный подход следует тщательно обосновать [9, 30], так как при высушивании пищевых материалов, в том числе функционального назначения необходимо обеспечить высокое качество готовой конечной продукции и т.п. Конвективную распылительную сушку следует выполнять при постоянном контроле и своевременной регулировке ключевых параметров процесса (расходные характеристики, параметры режима распыления, температуры сушильного агента и продукта).

Экспериментально оценить температуру по глубине витающей тонкодисперсной частицы пищевого материала в процессе её распылительной сушки с достаточной точностью невозможно. Рассчитать температуру капли/частицы и прогнозировать её изменения при изменении значений влияющих параметров возможно только за счет разработки адекватной (с учетом результатов комплекса исследований) реальному процессу распылительной сушки математической модели теплопереноса.

Большим количеством работ подтверждено, что аналитический расчет температур в объеме дисперсных частиц и построение температурного поля капли/частицы в координатах средний характерный размер (например, диаметр или радиус) и содержание сухих веществ в материале, которое зависит от времени процесса возможно в результате решения системы дифференциальных уравнений влаго- и теплопереноса [4, 9, 30, 62].

Реализация математической модели дополнительно упрощается при использовании положений и допущений, обоснованных в научно-исследовательских работах профессора И.Ю. Алексаняна [4, 9].

Предложенная в ряде работ [4, 9, 81, 182, 190, 192, 214, 218] математическая модель основана на решении методом конечных разностей дифференциального уравнения переноса тепла [62] с учетом режимных параметров и кинетики процесса сушки, гигроскопических, теплофизических и других физико-химических свойств материала, термодинамических параметров и др.

Модель [4, 9] основана на 3 допущениях:

- от центра высушиваемой капли/частицы материала и до её поверхностного слоя происходит линейная релаксация избыточного давления, при этом, чем ближе координата к поверхности капли/частицы, тем меньшее сопротивление для диффузии влаги к поверхности оказывает внутренняя структура материала;

- избыточное давление соответствует температуре насыщения только для внутренних слоев, что подтверждено работами П.Д. Лебедева [57, 58].

- доминирующее значение градиента давления для диффузии влаги внутри материала не исключает потенциал трансфера влаги в виде пара под действием градиента температуры.

При моделировании принимаем, в качестве допущения, что в ходе конвективной распылительной сушки обеспечивается объемный равномерный подвод энергии для правильной формы частицы – шар диаметром $d_e = 20..30$ мкм (достигается распылением, см. глава 3) размер которой не меняется во времени сушки.

За первую координату x , которая характеризует высушиваемую каплю/частицу и от которой зависит искомая целевая температурная функция $t(x,y)$ принимаем диаметр капли/частицы d , мкм. Таким образом, $x = 0.. d_e$:

- $Xn = 0$ и $Xk = d_e$ – соответственно начальное (исходное) и конечное значения координаты x , которые соответствует диаметрально противоположным точкам на поверхности капли/частицы.

В данном случае логично отказаться от использования полярных координат, так как эволюция температурного поля во времени процесса не зависит от угла и направления энергоподвода.

За вторую координату для решения дифференциального уравнения и составления разностной сетки принимаем содержание сухих веществ c , кг/кг (или влажность продукта W , кг/кг), которая связана функциональной зависимостью (определена экспериментально, см. глава 3) со временем процесса сушки τ , с. Координата $W = Wn..Wk$ (или $c = Cn..Ck$):

- Начальное значение координаты W (или c), соответствующее началу процесса сушки в начальный момент времени при $\tau=0$: Wn ($Cn = 1-Wn$).
- Конечное значение координаты W (или c), соответствующее концу процесса сушки при $\tau = \tau_c$: Wk (или $Ck = 1- Wk$).

Также при моделировании в качестве допущения принимаем, что структура частиц высушиваемого материала изотропна и, следовательно, поле влажности равномерно по диаметру капель/частиц малых размеров.

При моделировании дополнительно пренебрегаем лучистым теплообменом между поверхностями капель/частиц, так как фактически при обезвоживании отражателем будет являться внешняя поверхность ближайших распыленных капель/частиц, имеющих одинаковую температуру [4, 9].

При объемном энергоподводе дифференциальное уравнение переноса тепла при одномерной задаче [30, 31, 62], принимая во внимание, что внутренний источник тепла отсутствует, с учетом ранее установленных зависимостей имеет вид:

$$c'(W) \cdot \rho(W) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(x, t, W) \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \varepsilon \cdot r(x, t, W) \cdot \rho(W) \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau}, \quad (5.1)$$

где x – координата глубины капли/частицы экстракта зеленого чая, м; $\lambda(x, t, W)$ – теплопроводность экстракта зеленого чая (см. глава 2), Вт/(м·К); $c'(W) \cdot \rho(W)$

$= c_v$ – объемная теплоемкость экстракта (см. глава 2), Дж/(К·м³); $\rho(W)$ – плотность экстракта (см. глава 2), кг/м³; $r(x,t,W)$ – теплота испарения, Дж/кг – (см. глава 2); t – температура пространственной точки материала, К; $\varepsilon = 1$ – коэффициент фазовых превращений, при влагопереносе в виде пара при допущении, что структура материала изотропна [9, 30, 31, 62]; $\partial W/\partial \tau$ – скорость сушки, кг/(кг·с), заменяем на $\partial \bar{W}/\partial \tau$ – дифференциальное изменение средней по слою высушиваемой частицы экстракта зеленого чая;

С учетом ранее обоснованного допущения об изотропности структуры капли/частицы, принимаем, что теплопроводность не зависит от координаты x . Среднюю по слою $\bar{\lambda}(t,W)$ вынесем за знак дифференциала и преобразуем выражение, разделив обе части уравнения на $c_v(W) \cdot \rho(W) = c_v$:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \bar{a}(t,W) \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{r(t,W) \bar{\rho}(t,W)}{\bar{c}_v(t,W)} \cdot \frac{\partial \bar{W}}{\partial \tau}, \quad (5.2)$$

где $\bar{a}(t,W) = \frac{\bar{\lambda}(t,W)}{\bar{c}_v(t,W)}$ – коэффициент температуропроводности (глава 2), м²/с.

После математических преобразований и далее опускаем знак среднего и варьируемого параметров получим:

$$\frac{\partial t}{\partial W} = \frac{a}{\partial W / \partial \tau} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{r \cdot \rho}{c_v}. \quad (5.3)$$

Искомая температурная функция $t = f(x,W)$ является решением дифференциального уравнения (5.3) при краевых условиях.

В первоначальный момент времени $\tau = 0$ (в момент распыления) при продукте при начальной (исходной) влажности W_H , температура материала всех пространственных точек капли одинакова $t_0 = T_{prod}$ и задается как варьируемый параметр, который влияет на скорость сушки (см. глава 4) и характер процесса. Начальные условия: $W = W_H, t = t_0$.

При реализации модели конечные условия предыдущего участка при текущей влажности W (распределение значений температур по диаметру

частицы) являются начальными условиями для последующего участка при следующем шаговом значении влажности W .

Граничные условия для теплообмена на границе материала с сушильным агентом:

$$-\lambda(W) \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha(T_{c.a.} - t_{x=0(\text{поверх})}), \quad (5.4)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К), $T_{c.a.}$ – температура нагретого воздуха – сушильного агента, К; $t_{x=0(\text{поверх})}$ – температура поверхности капли/частицы экстракта зеленого чая, К.

При численной реализации математической модели произведем замену влажности материала W на концентрацию сухих веществ $c = 1 - W$. Дифференциальное уравнение параболического типа решено методом конечных разностей, при котором функции, заданные на континууме, представляются сеточным вектором, а дифференциальные операторы аппроксимируются на сетке их разностными аналогами [37].

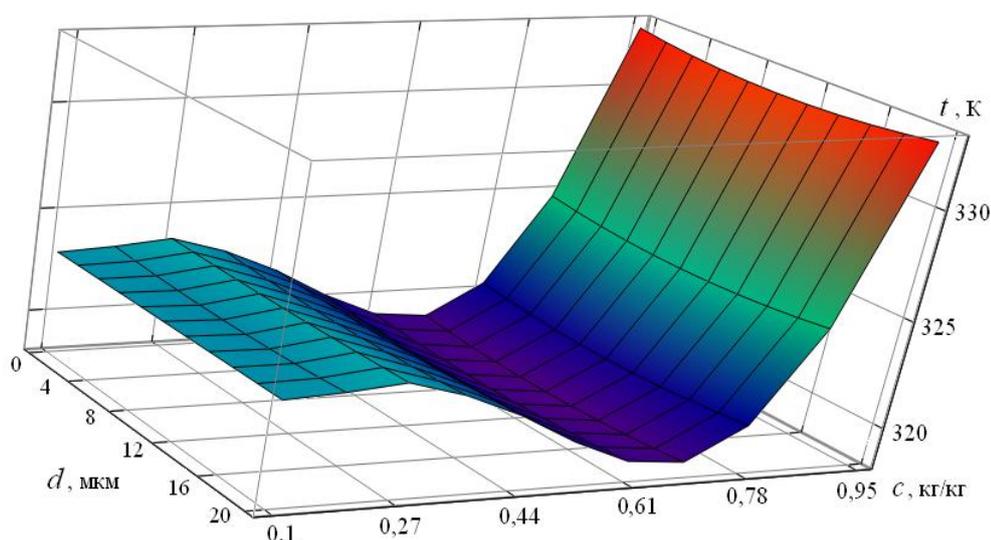


Рисунок 5.1 – Поле распределения значений температур в объеме капли/частицы экстракта зеленого чая при распылительной сушке (приложение 4), температурный режим: $T_{prod} = 323\text{K}$; $T_{c.a.} = 443\text{K}$.

Реализация математической модели выполнена в среде Mathcad Professional (Приложения 4-6) при различных режимах, включая

рациональный режим и определены температурные функции (рисунки 5.1 – 5.3) по диаметру распыленной капли/частицы и изменяющемуся содержанию сухих веществ (таблица 5.1).

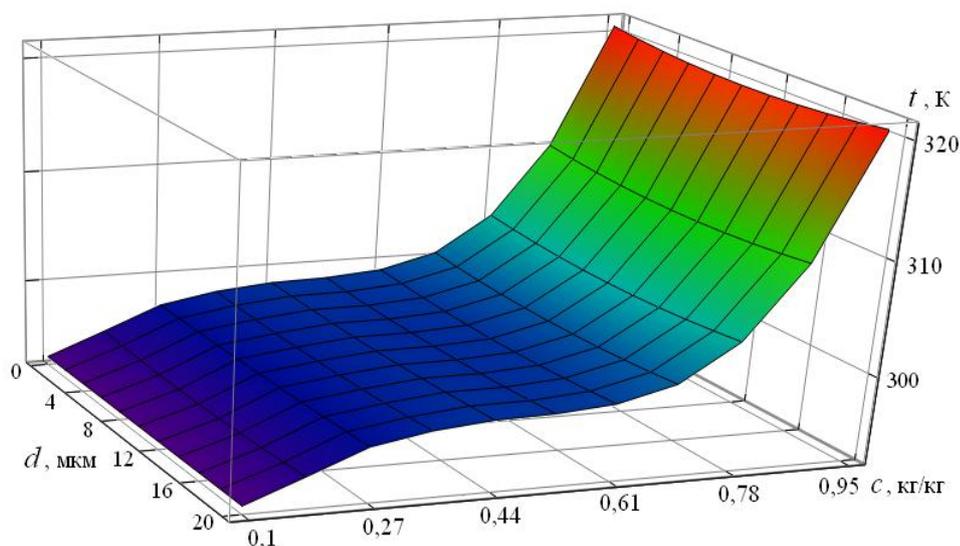


Рисунок 5.2 – Поле распределения значений температур в объеме капли/частицы экстракта зеленого чая при распылительной сушке (приложение 5), температурный режим: $T_{prod} = 293\text{K}$; $T_{c.a.} = 483\text{K}$.

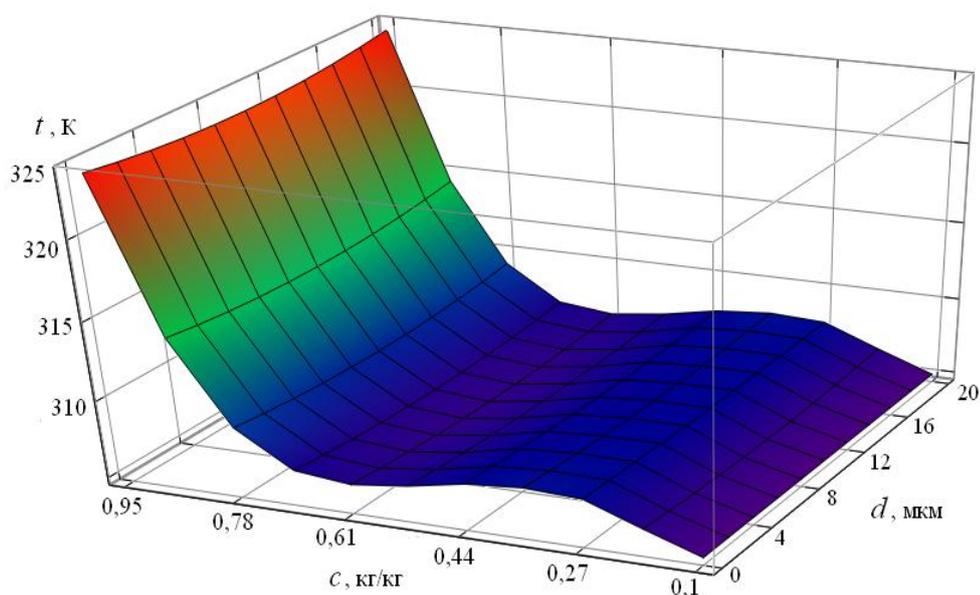


Рисунок 5.3 – Поле распределения значений температур в объеме капли/частицы экстракта зеленого чая при распылительной сушке (приложение 6), рациональный температурный режим: $T_{prod} = 313\text{K}$; $T_{c.a.} = 483\text{K}$.

На рисунке 5.4 в графическом виде представлены установленные зависимости средней объемной температуры t_{cp} , К от содержания сухих веществ.

В ходе анализа температурных функций установлено, что колебания температуры по слою продукта в его пространственных точках незначительны (1..2 К) во всем диапазоне изменения содержания сухих веществ, что свойственно для практически мгновенной распылительной сушки тонкодисперсных капель/частиц.

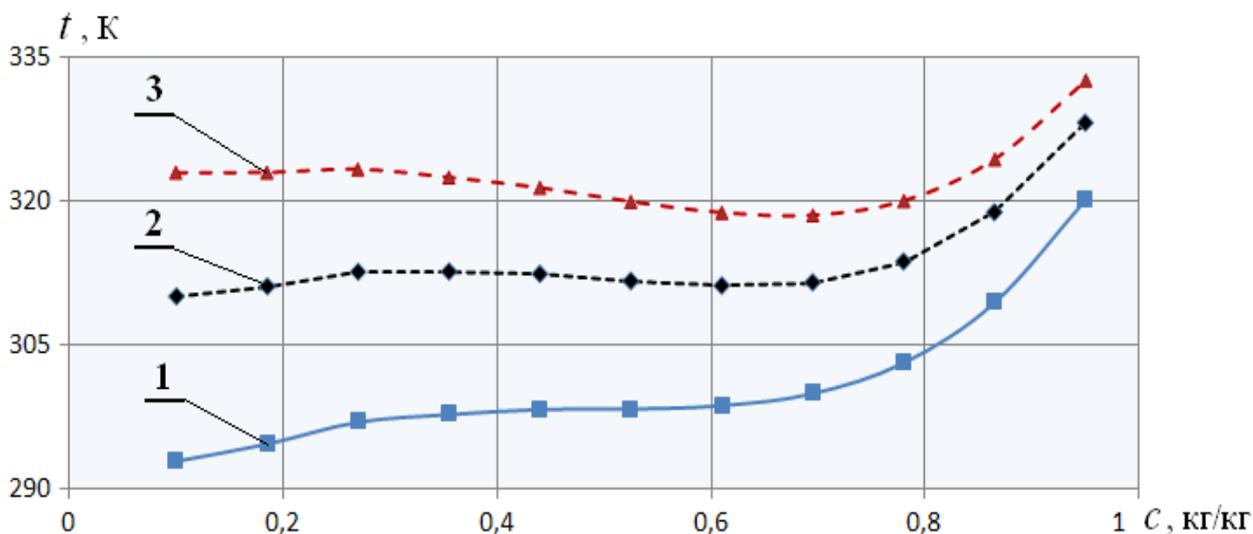


Рисунок 5.4 – Зависимость средней объемной температуры от содержания сухих веществ частицы экстракта зеленого чая при распылительной сушке:

1 – $T_{prod} = 293$ К; $T_{c.a.} = 483$ К; 2 – $T_{prod} = 310$ К; $T_{c.a.} = 483$ К (рациональный температурный режим); 3 – $T_{prod} = 323$ К; $T_{c.a.} = 443$ К.

Полученные аналитически температурные функции (поверхности) сопоставим с ранее установленными зависимостями для скорости сушки (см. глава 3). На начальной стадии процесса в период интенсивного влагоудаления преимущественно влаги несвязанной с материалом до максимума функций скорости сушки (рисунки 3.7 – 3.12) капли/частицы материала практически не нагреваются (рисунки 5.1 – 5.4). Тепловая энергия нагретого воздуха – сушильного агента используется максимально полезно и без термодинамических потерь расходуется на фазовый переход, то есть на испарение свободной влаги.

Изотермическое испарение свободной влаги с поверхности капель/частиц в начале сушильного процесса аргументировано в классических работах [30, 62] и исключает перегрев продукта на первоначальном этапе.

Таблица 5.1 –Значения температур в объеме капли/частицы экстракта зеленого чая при распылительной сушке, рациональный температурный режим: $T_{prod} = 313\text{K}$; $T_{c.a.} = 483\text{K}$.

$c, \text{ кг/кг}$ $d, \text{ мкм}$	0,1	0,185	0,27	0,355	0,44	0,525	0,61	0,695	0,78	0,865	0,95
0	310	311,29	312,66	312,84	312,54	311,86	311,43	311,82	314,07	319,28	328,71
2	310	311,15	312,61	312,69	312,45	311,7	311,26	311,61	313,84	319,01	328,42
4	310	311,05	312,57	312,59	312,36	311,59	311,12	311,46	313,65	318,8	328,19
6	310	310,98	312,54	312,52	312,29	311,52	311,02	311,35	313,51	318,65	328,03
8	310	310,93	312,52	312,48	312,25	311,48	310,96	311,29	313,43	318,56	327,93
10	310	310,92	312,51	312,47	312,24	311,47	310,94	311,27	313,4	318,54	327,9
12	310	310,93	312,52	312,48	312,25	311,48	310,96	311,29	313,43	318,56	327,93
14	310	310,98	312,54	312,52	312,29	311,52	311,02	311,35	313,51	318,65	328,03
16	310	311,05	312,57	312,59	312,36	311,59	311,12	311,46	313,65	318,8	328,19
18	310	311,15	312,61	312,69	312,45	311,7	311,26	311,61	313,84	319,01	328,42
20	310	311,29	312,66	312,84	312,54	311,86	311,43	311,82	314,07	319,28	328,71

Далее после достижения максимума для всех режимов наблюдается снижение значений скорости (рисунки 3.7 – 3.12), что свидетельствует о переходе к удалению из материала влаги, связанной с ним – преимущественно влаги полимолекулярной адсорбции (для растительных экстрактов и, в частности, для экстракта зеленого чая). При уменьшении скорости сушки, очевидно, интенсифицируется прогрев материала и происходит углубление зоны испарения (рисунки 5.1 – 5.4), что подтверждается термограммами [31] и работами [9, 10, 30, 62].

Адекватность математической модели можно оценить по температуре в слое готового порошка высушенных частиц (температура поверхности частицы). Данная оценка проводилась в ходе тестирования установленных режимных параметров на установке распылительной сушки Ohkawara Kakohki OL/OC-L8.

При тестировании различных температурных режимов (таблица 4.1) выполнялась регулировка расхода исходного продукта в диапазоне $G_{wh} = 1,5..2,5 \text{ кг/ч}$, при размере распыленных капель/частиц 20 – 30 мкм (в соответствии с техническими характеристиками распылителя).

Температура воздуха составляла 348..363 К на выходе из центральной трубы циклона сушилки. При непрерывной сушке внизу циклона в сборнике сухого продукта осуществлялась фиксация значений температуры сухого готового продукта. В зависимости от устанавливаемого режима распылительной сушки температура поверхности частиц сухого порошка в сборнике составляла 308..328 К, что подтвердило экспериментально адекватность предложенной математической модели. Средние объемные температуры частиц материала не превышали рекомендованных пороговых значений (328 ..333 К), что определяет сохранность качества при сушке (Приложение 3).

Разработанные температурные режимы распылительной сушки экстракта зеленого чая, включая рациональный режим (таблицы 4.5 – 4.7) рекомендованы для практического внедрения.

На математической модели следует разработать программное обеспечение или обновление для существующих программных модулей с целью контроля параметров и управления режимами при сушке программно-аппаратными комплексами.

ГЛАВА 6. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОЕКТНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

6.1 Тестирование и опытно-промышленная реализация режимных параметров сушки экстракта зеленого чая

Получение исходных экстрактов для последующей сушки было организовано с использованием комплекса экспериментальных и опытно-промышленных установок научно-исследовательских лабораторий кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» (далее – АГТУ) (рисунок 6.1) и с использованием производственных установок технологического партнера АГТУ ООО «Инновационные технологии продуктов питания» (г. Астрахань) (приложение 2).

Объект исследования/сушки – водный экстракт зеленого чая. Приготовление экстракта зеленого чая производилось в периодическом режиме в соответствии с рекомендациями [186, 187] и технология приготовления включала стадии: предварительное измельчение сырья, подготовку экстрагента – очищенной воды; проведение экстракции 1 – получение первичной вытяжки; проведение экстракции 2 – получение вторичной вытяжки; отстаивание; фильтрация для отделения экстракта от осадка; центрифугирование; смещение экстрактов (первичной и вторичной вытяжки), концентрирование экстракта при вакуумном выпаривании.

При двукратном экстрагировании гидромодуль составлял 10..15 мл/г (1:10..1:15), температура экстракции – 343..363К. Процесс экстракции проводился 60..80 минут на основании рекомендаций. Для экстрагирования использовался реактор УПЭС модели 0,15/3,0 при перемешивании. В ходе экстрагирования (после перемешивания экстрактов двух степеней) достигалась концентрация сухих веществ 2..4%. От осадка экстракт чая отделяли методами отстаивания, фильтрования и далее экстракт осветляли в

процессе отстойного центрифугирования. Температура экстракта после отстаивания при фильтрации и центрифугировании составляла 313..363К, что минимизировало процессы осаждения веществ танино-катехинового комплекса.



Рисунок 6.1 – Основное оборудование для приготовления экстрактов (лаборатория кафедры «Технологические машины и оборудование» АГТУ)

Концентрирование экстракта осуществляли в вакуум-выпарном аппарате до содержания сухих веществ 8..12% в экстракте.

На базе ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» выполнены исследования и тестирование параметров / режимов сушки на опытно-промышленной сушилке (рисунок 6.2), получены опытно-промышленные образцы.



Рисунок 6.2 – Установка распылительной сушки

Диапазон температуры при тестировании $T_{с.а.} = 443..483$ К. Диапазоны регулировки: расход материала $G_{Wн} = 1,5 - 2,5$ кг/ч; начальная температура продукта $T_{прод} = 293..318$ К; температура воздуха на выходе из сушилки $343..353$ К. Размер капель/частиц (исходный) $20 - 30$ мкм (в соответствии с техническими характеристиками распылителя). Установлены рабочие диапазоны варьирования основных факторов для стабильной работы установки (таблица 6.1).

Таблица 6.1 – Режимы тестирования и получения опытно-промышленных образцов

$T_{с.а.}$, К	443..483
$T_{прод}$, К	293..318
$G_{Wн}$, кг/ч	1,5..2,5
$Wн$, кг/кг	0,9
$Wк$, кг/кг	$\leq 0,05$
$G_{Wк}$, кг/ч	0,158..0,265
G_{W} , кг/ч	1,342..2,234

В сборнике сухого продукта опытно-промышленной установки (рисунок 6.2) осуществлялась регистрация конечной температуры экстракта – готового порошка, которая составляла $308..328$ К, что подтвердило экспериментально адекватность предложенной математической модели и определяет сохранность качества при сушке (приложение 2).

Таблица 6.2 – Основные показатели образцов сухого экстракта зеленого чая

№ п/п	Режим обезвоживания	Масса образца, г	Влажность, (%)	Зола общая, %	Содержание водорастворимых экстрактивных веществ, %	Содержание суммы полифенолов, не менее, %	Содержание кофеина, %	Активная кислотность, рН	Микотоксины, токсичные элементы (тяжелые металлы), %	Продолжительность растворения в воде, с
1	$T_{prod} = 310 \text{ K}$ $T_{c.a.} = 483 \text{ K}$	500	4,98	≤17	≥33%	40	10	5,58	Соответствует НД	30 (при $T = 96^{\circ}\text{C} - 98^{\circ}\text{C}$) 240 (при $T = 18^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$)
2	$T_{prod} = 293 \text{ K}$ $T_{c.a.} = 483 \text{ K}$	500	4,98		37,6		8	5,73		
3	$T_{prod} = 323 \text{ K}$ $T_{c.a.} = 483 \text{ K}$	500	4,77		37,6		9	5,78		
Мелкодисперсный порошок от желтого до коричневого цвета. Запах и вкус характерны (метод анализа – органолептический).										

Методики для анализа качества опытно-промышленных партий сухого экстракта (таблица 6.2) зеленого чая:

- Влажность определяли по требованиям ГОСТ Р ИСО 7513-2012 «Чай растворимый. Метод определения массовой доли влаги (потеря массы при 103°C)»;
- Общую золу определяли согласно требованиям ГОСТ Р ИСО 7514-2012 «Чай растворимый. Метод определения общего содержания золы»;
- Содержание водорастворимых экстрактивных веществ определяли согласно требованиям ГОСТ 28551-90 «Чай. Метод определения водорастворимых экстрактивных веществ»;
- Содержание суммы полифенолов определяли колориметрическим методом согласно требованиям ГОСТ Р ИСО 14502-1-2010 «Чай. Метод определения общего содержания полифенолов»;

- Содержание кофеина по методу жидкостной хроматографии согласно требованиям ГОСТ ISO 10727-2013 «Чай и чай растворимый. Определение содержания кофеина»;

- Активную кислотность определяли потенциометрическим методом согласно требованиям ТР ТС 021/2011 (Технический регламент Таможенного союза о безопасности пищевой продукции);

- Содержание микотоксинов и токсичных элементов (тяжелые металлы) определяли согласно требованиям ТР ТС 021/2011 (Технический регламент Таможенного союза о безопасности пищевой продукции).

Показатели качества сухого экстракта зеленого чая соответствуют требованиям ГОСТ Р ИСО 6079-2012 «Чай растворимый. Технические условия», ГОСТ 32593 —2013 «Чай и чайная продукция», Требованиям ТР ТС 021/2011 (Технический регламент Таможенного союза о безопасности пищевой продукции) и нормативам к растительным экстрактам и сырью по СанПин 2.3.2.1078-01.

6.2 Технические решения для совершенствования конструкции распылительной сушильной установки

Перспективным конструкторским решением является распылительная сушильная установка (рисунок 6.3), разработанная группой авторов под руководством профессора И.Ю. Алексаняна [12] для обезвоживания жидких и пастообразных материалов.

В результате продолжения исследований, конструкция была усовершенствована (рисунок 6.4) и получен патент на полезную модель 191126 РФ [120], что дополнительно подтверждает ее промышленную применимость. Конфликта интересов нет. Доказано, что интенсификация процесса тепломассообмена в данной конструкции при взаимодействии частиц высушиваемого материала с сушильным агентом достигается в результате замены вертикальных прямоугольных перегородок на вертикальные криволинейные перегородки.

Предлагаемое устройство (рисунки 6.3 и 6.4) включает следующие основные конструктивные элементы: цилиндрическая сушильная камера 1, образованная двумя последовательно соединенными цилиндрами разных диаметров (малый 2 и большой 3), распылитель 4 (механический дисковый, акустический или ультразвуковой), система (газоходы, циклон и др.) отсоса и улавливания частиц материала 5, узел выгрузки 6 готового высушенного материала.

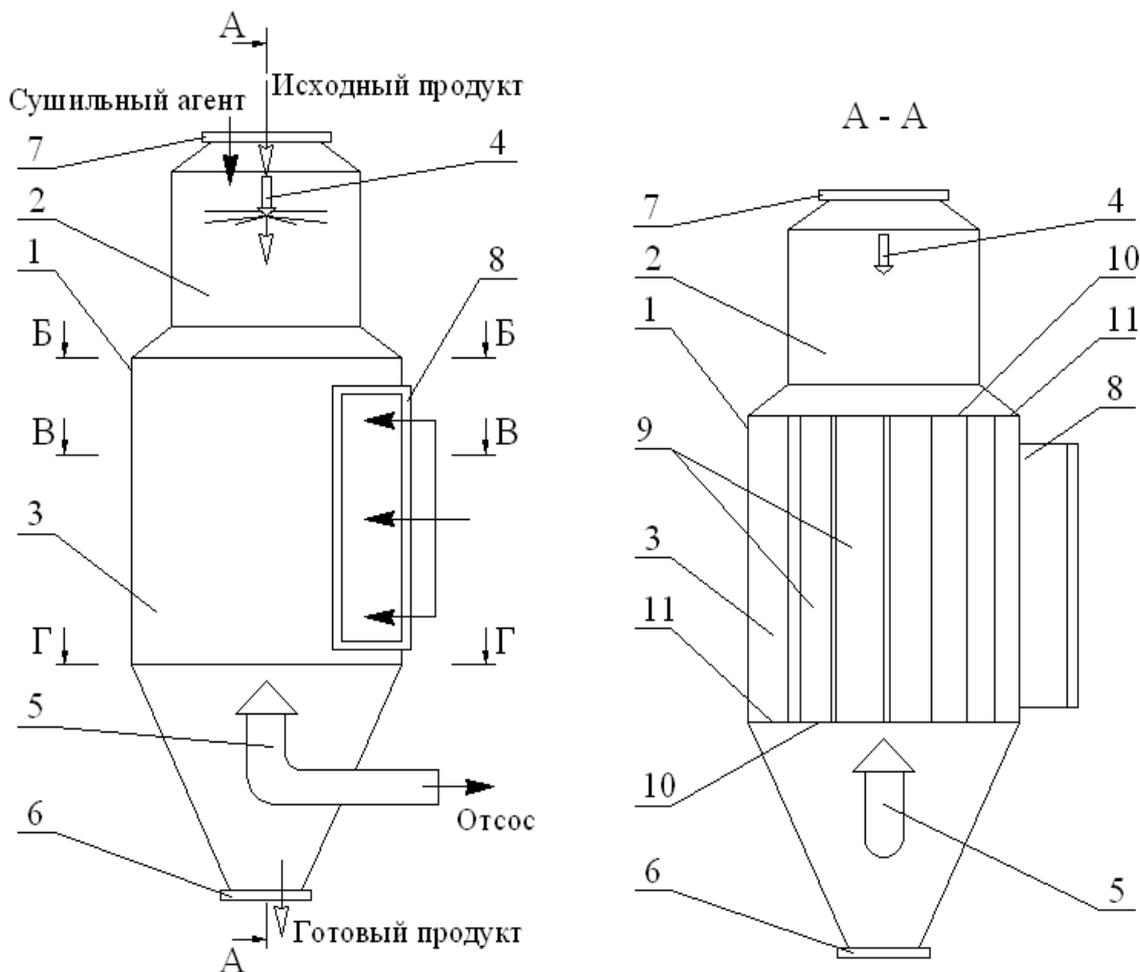


Рисунок 6.3 – Распылительная сушилка

1 – камера; 2 – цилиндр; 3 – цилиндр; 4 – распылитель 4 (механический дисковый, акустический или ультразвуковой); 5 – система (газоходы, циклон и др.) отсоса и улавливания частиц материала; 6 – узел выгрузки; 7, 8 – патрубки; 9 –перегородки; 10 – крепления; 11 – крепежные элементы

Цилиндры 2 и 3 имеют патрубки для ввода теплоносителя – сушильного агента (например, нагретого воздуха) – верхний 7 и тангенциальный 8.

Положительный эффект от модернизации конструкции обеспечивается прежде всего установкой круговым массивом вокруг оси сушильной камеры 1 с зазорами между собой вертикальных криволинейных перегородок 9 внутри цилиндра 3, что позволяет сформировать каналы – щели для поступления сушильного агента. Угол между перегородками $\alpha = 360/n$, где n – количество перегородок (рисунок 6.4).

Исходный жидкий продукт (например, водный экстракт зеленого чая) на сушку подается через распылитель 4 и далее распыленные капли (частицы) продукта при непосредственном активном, но при этом кратковременном (несколько секунд), контакте с сушильным агентом высыхают и отбираются из зоны обезвоживания через узел выгрузки 6 и систему (газоходы, циклон и др.) отсоса и улавливания частиц материала.

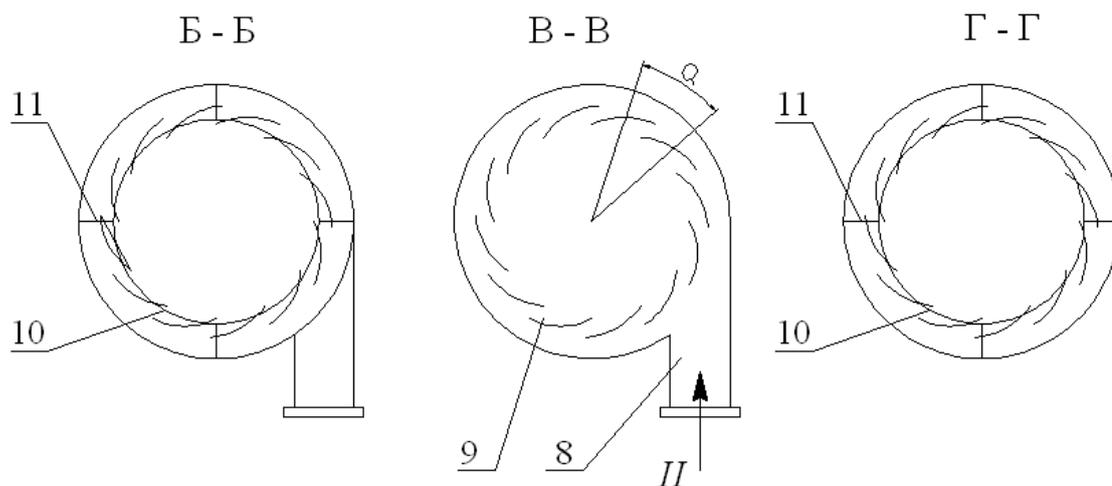


Рисунок 6.4 – Распылительная сушилка (сечения)

8 – патрубок; 9 – криволинейные перегородки; 10 – крепления; 11 – крепежные элементы

Предложенная конструкция обеспечивает организацию активного аэродинамического массообменного контакта материал-теплоноситель по нисходящей до зоны выгрузки и улавливания сухого материала спиралевидной траектории. В сравнении с традиционным прямоточным и прямолинейным движением фаз, организованное спиралевидное движение системы материал-теплоноситель обуславливает более полное

использование/задействование рабочего объема сушильной камеры и, следовательно, обеспечивает наибольшее время сушки при контакте материал-теплоноситель.

Таблица 6.3 – Рекомендации по применению сушильной установки

Объекты сушки растительного происхождения
Преимущественно растворы различных биологически активных веществ; экстракты трав, плодов, ягод, специй, частей деревьев или кустов; соки и экстракты из плодовоовощных продуктов и ягод и др. Ограниченное применение для пюре- и пастообразных плодовоовощных материалов (для некоторых продуктов при предельных температурах).
Ключевые затраты энергии на организацию сушки
Нагрев исходного продукта перед распылением до 293 – 328 К Нагрев сушильного агента до 423 – 523 К
Удельные затраты электроэнергии на сушку
2,2 – 3,2 кВт·ч/кг
Пути повышения эффективности работы установок
Разработка рациональных/оптимальных режимов сушки. Совершенствование конструкций установок для обеспечения: нестационарного, продолжительного и интенсивного аэродинамического контакта фаз; защиты внутренних элементов и поверхностей сушилок от контакта с продуктом; уменьшения габаритов и энергопотребления установок и т.п. Выравнивание температуры сушильного агента по высоте сушильной камеры. Создание комбинированных установок, например, сочетание прямого и перекрестного тока сушильного агента в камере и т.п.

Внедрение принципиального конструкторского решения позволяет:

- снизить габаритные размеры сушильной камеры при проектировании на заданную удельную влагонапряженность;
- увеличить удельную влагонапряженность камеры, а, значит, и интенсивность процесса при модернизации типовых конструкций распылительных сушилок.

Ключевым условием при проектировании рациональной сушильной техники является учет результатов исследований кинетических закономерностей обезвоживания и комплекса характеристик материала.

Безусловно, актуальным направлением развития техники сушки следует признать разработку методов высокоинтенсивного обезвоживания сырья в диспергированном состоянии, в том числе за счет создания и внедрения в практику конструкторских решений для исключения недостатков / снижения производственных рисков, которые характерны для традиционных установок.

При обоснованных температурных режимах активный вихревой аэродинамический контакт фаз в системе материал – сушильный агент позволяет адаптировать распылительную технологию сушки для производства сухих дисперсных материалов, в частности экстракта зеленого чая, высокого качества. Предложены и обоснованы соответствующие рекомендации (таблица 6.3). В таблице 6.4 сформулированы основные этапы и виды работ по вводу в эксплуатацию новой сушильной техники.

Таблица 6.4 – Основные этапы и виды работ по вводу в эксплуатацию новой сушильной техники

Этап «Экспериментально-аналитические исследования»	
1	Исследовать кинетику процесса при разном сочетании основных влияющих параметров, предварительно оценив диапазоны варьирования параметров и технологические ограничения для высушиваемого материала.
2	Определить время процесса сушки материала до требуемой влажности.
3	Получить зависимость удельной производительности и/или удельной влагонапряженности рабочего объема сушильной камеры от влияющих параметров.
4	Определить максимум целевой функции и соответствующие ему рациональные значения варьируемых факторов – рациональный режим.
Этап «Моделирование процесса»	
1	Реализовать математическую модель тепломассопереноса с целью расчета температур в высушиваемых дисперсных частицах материала.
2	Выполнить анализ влияния режимных параметров на температуру материала в процессе высушивания.
Этап «Опытно-промышленные испытания»	
1	Провести тестирование установленного рационального режима и проверить адекватность математической модели.
2	Оценить качественные показатели опытно-промышленных образцов.
Этап «Автоматизация процесса»	
Разработать программно-аппаратный комплекс и реализовать автоматизированную систему управления сушильным комплексом на основе модели тепломассопереноса.	
Этап «Внедрение. Промышленная реализация»	

На установку получен патент на полезную модель патент 191126 РФ [120], что свидетельствует о конкурентоспособности и промышленной применимости разработки (приложение 7).

6.3 Промышленное внедрение и практическое использование результатов исследований

1) Общество с ограниченной ответственностью «Инновационные технологии продуктов питания». На предприятии активно внедряются инновационные разработки и перспективные технологии при производстве кулинарной продукции, пищевых полуфабрикатов и продуктов питания и оказании услуг в области общественного питания.

К внедрению приняты результаты диссертационного исследования (приложение 8), которые будут использованы при налаживании производства сухих растительных полуфабрикатов. В производственных условиях апробированы: способ экстракции и способ обезвоживания экстракта зеленого чая. Выполнена оценка экономической эффективности внедрения результатов, ожидаемый экономический эффект составит 917,6 тыс. руб.

2) Общество с ограниченной ответственностью «БИОПОЛИМЕР - НЕО» специализируется на переработке рыбного сырья и производстве коллагенсодержащих пищевых и косметических продуктов. В соответствии с программой развития предприятия, запланировано развивать ассортимент выпускаемой продукции за счет производства сухих дозированных форм коллагенсодержащих материалов. Для внедрения на производстве принята (приложение 9) конструкция распылительной сушильной установки (патент на полезную модель 191126 РФ). Экономический эффект внедрения составит 1120 тыс. руб.

3) Акционерное общество «ОРЕЛПРОДУКТ», специализируется на производстве пищевой консервированной продукции. На предприятии для усовершенствования стадий технологических процессов к внедрению приняты результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (приложение 10). Экономический эффект внедрения составит 713,8 тыс. руб.

4) Ассоциация Астраханских рестораторов и кулинаров. Основными задачами в деятельности Ассоциации являются: популяризация и

развитие индустрии гостеприимства, совершенствование технологий пищевой индустрии и повышение качества услуг в сфере общественного питания. Диссертация и результаты исследований рассмотрены экспертами и проанализированы на заседании совета Ассоциации. Результаты диссертационной работы рекомендованы советом для внедрения (приложение 11).

5) Общество с ограниченной ответственностью «ЭЛЕКТРОН» занимается производством и реализацией химических реагентов, поверхностно-активных материалов и готово внедрить в производственный цикл распылительную технологию обезвоживания ряда жидких материалов и конструкцию распылительной сушильной установки (патент на полезную модель 191126 РФ) для расширения ассортиментного состава производимой продукции (приложение 12). Экономический эффект внедрения составит 1120 тыс. руб.

6.4 Рекомендации по практическому использованию результатов исследований

1) При проектировании процессов и аппаратов в технологиях переработки растительного сырья и комплексного анализа процессов теплообмена, их рационализации, оптимизации и физико-математического моделирования следует использовать полученные функциональные математические зависимости по характеристикам (теплофизическим, структурно-механическим, гигроскопическим и др.) концентратов экстракта зеленого чая.

2) С целью оптимального планирования продолжительности / промежутков времени выполнения ряда технологических стадий (транспортировка, дозирование, фасовка, упаковка) следует использовать функциональные математические зависимости сорбционной активности экстракта зеленого чая – порошка от температуры и влажности воздуха.

3) При проектировании и определении термического коэффициента полезного действия установок для сушки экстракта зеленого чая следует применять результаты исследований по анализу эффективности использования тепловой энергии и оценке термодинамических потерь тепла в процессе сушки.

4) При проектировании процессов и аппаратов в технологиях переработки растительного сырья и комплексного анализа процессов тепломассообмена, их рационализации, оптимизации и физико-математического моделирования необходимо применять полученные функциональные математические зависимости по кинетике процесса сушки экстракта зеленого чая и расчету удельной производительности сушилки и удельной влагонапряженности рабочего объема сушильной камеры от влияющих параметров.

6) Разработанные предложения по организации сушки экстракта зеленого чая и рациональные режимные параметры процесса рекомендованы для практического внедрения на предприятиях, которые выпускают растительные экстракты или планируют внедрить соответствующие технологии.

7) Математическая модель тепломассопереноса может стать основой для разработки программно-аппаратного комплекса и специализированного программного обеспечения по контролю режимных параметров процесса и управлению режимами сушки.

8) Для эффективного обезвоживания при производстве сухих дисперсных материалов следует внедрить конструкцию установки для сушки (патент на полезную модель 191126 РФ).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1) Установлены и проанализированы функциональные зависимости для расчета структурно–механических, теплофизических и гигроскопических характеристик концентратов экстракта зеленого чая.

2) Установлено и проанализировано влияние влажности концентратов экстракта зеленого чая и их температуры на структурно–механические, теплофизические и гигроскопические характеристики концентратов экстракта зеленого чая.

3) Исследованы сорбционные явления при контакте концентратов экстракта зеленого чая с водой и установлены соответствующие математические зависимости для оценки видов и энергий связи влаги с сухими веществами экстракта.

4) Исследована эффективность расхода тепловой энергии, затрачиваемой на высушивание экстракта зеленого чая с учетом термодинамических потерь тепла. Проанализированы внутренний тепломассоперенос и фазовые превращения в процессе сушки экстракта зеленого чая.

5) Исследованы кинетические закономерности тепломассопереноса при распылительной сушке экстракта зеленого чая.

6) В ходе комплекса теоретических и экспериментальных исследований выявлено, что эффективное обезвоживание водного экстракта зеленого чая с начальной влажностью $W_H = 0,9$ кг/кг при котором достигается удельная производительность по сухому порошку экстракта $0,937..1,528$ кг/(м³·ч) и удельная влагонапряженность рабочего объема сушильной камеры $7,962..12,985$ кг/(м³·ч) надлежит реализовывать при распылительном способе и следующих условиях:

- Начальная (исходная) температура водного экстракта зеленого чая $293..318$ К;

- Начальная (исходная) температура нагретого воздуха – сушильного агента $443..503$ К;

- Конечная температура отработавшего сушильного агента 343..353 К;
- Способ подачи экстракта зеленого чая в сушильную камеру – распыление.
- Способ распыления – акустический, механический и др.
- Начальный (исходный) диаметр распыленных частиц экстракта зеленого чая 20..30 мкм;
- Средний характерный размер частиц сухого экстракта зеленого чая – порошка 1..6 мкм.
- Расход сушильного агента на 1 кг испаренной влаги 20кг/кг.
- Параметры воздуха рабочей зоны производственного помещения перед нагревом и подводом в сушильную камеру (ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны и СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений): температура 285..303К; влажность воздуха составляет 40..75%.

7) Реализована математическая модель внутреннего тепломассопереноса при распылительной сушке экстракта зеленого чая с учетом свойств материала, технологических, термодинамических параметров процесса и кинетических закономерностей влагоудаления.

8) Разработана конструкция сушильной установки и получен патент на полезную модель 191126 РФ для практического внедрения.

9) Разработаны и апробированы в промышленности рекомендации по практическому использованию результатов проектно-технических решений и научных исследований.

ООО «БИОПОЛИМЕР-НЕО», АО «ОРЕЛПРОДУКТ», ООО «Инновационные технологии продуктов питания», ООО «ЭЛЕКТРОН» и Ассоциация Астраханских рестораторов и кулинаров внедрили и используют результаты и рекомендации диссертационной работы.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Авраменко, В.Н.** Инфракрасные спектры пищевых продуктов [Текст] / В.Н. Авраменко, Н.П. Есельсон, А.А. Заика // М.: Пищевая промышленность, 1974. 174 с.
- 2. Азин, Д.Л.** Возможности использования растительных порошков в пищевой промышленности [Текст] / Д.Л. Азин, О.В. Чугунова, Н.Б. Осипова // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Пищевая промышленность, продовольственная безопасность». Екатеринбург, 1999. С. 208-209.
- 3. Акулич, П.В.** Моделирование и экспериментальное исследование тепло- и влагопереноса при СВЧ-конвективной сушке растительных материалов [Текст] / П. В. Акулич, А. В. Темрук, А. В. Акулич // Инженерно-физический журнал. – 2012. – Т. 85. – № 5. – С. 951-958.
- 4. Алексанян, И.Ю.** Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование: Монография [Текст] / И.Ю. Алексанян, А.А. Буйнов// Астрахань: АГТУ, 2004. -380 с.
- 5. Алексанян, И.Ю.** Зависимость теплофизических свойств пектиновых концентратов от влияющих факторов [Текст] / И.Ю. Алексанян, О.А. Петровичев, Ю.А. Максименко, Л.М. Головизина // Научно-практическая конференция «Российский пектин: история, настоящее, перспективы». Воронеж: ВГАУ им. К.Д. Глинки, 2006. С. 56-59.
- 6. Алексанян, И.Ю.** Инновационные технологии переработки сырья растительного происхождения [Текст]/ И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Л.М. Титова// Инновационные технологии АПК России – 2014: материалы II конференции в рамках Международного научно-технологического форума «Биоиндустрия – основа зеленой экономики, качества жизни и активного долголетия». - М., 2014.- 84 с. С. 12–18.
- 7. Алексанян, И.Ю.** Исследование кинетики и совершенствование процесса распылительной сушки меланжа [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, О.Е. Губа // Научно-теоретический журнал. Технологии

пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания, №3. Воронеж, 2014. С. 43-47.

8. Алексанян, И.Ю. Математическое моделирование тепломассопереноса при распылительной сушке растительных экстрактов [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Ю.С. Феклунова // Вестник АГТУ. Научный журнал. Серия: УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА. 2013. №1 (Февраль). Астрахань: АГТУ, 2013. С. 9 – 13.

9. Алексанян, И.Ю. Развитие научных основ процессов высокоинтенсивной сушки продуктов животного и растительного происхождения [Текст] : автореф. дис. ... доктора техн. наук : 05.18.12 / Алексанян Игорь Юрьевич.– М.: МГУПБ, 2001. -52 с.

10. Алексанян, И.Ю. Распылительная сушилка [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, О.Е. Губа, Ю.С. Феклунова// Научно-теоретический журнал. Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания, №1(5). Воронеж, 2015. С. 61-66.

11. Алексанян, И.Ю. Совершенствование тепломассообменных процессов при конвективной сушке растительного сырья в диспергированном состоянии [Текст]/ И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Ю.С. Феклунова// Научно-теоретический журнал. Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания, №3. Воронеж, 2014. С. 48-53.

12. Алексанян, И.Ю. Распылительная сушильная установка [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Ю.С. Феклунова, О.Е. Губа // АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СУШКИ И ТЕРМОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ: сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений (22-23 сентября 2015 года). Курск: ЗАО «Университетская книга», 2015. С. 168 – 171.

13. **Алиева, А.К.** Товароведная характеристика и оценка качества зеленого чая, реализуемого в торговых сетях Санкт-Петербурга [Текст] / А.К. Алиева, Е.О. Барбашенова // Вестник ВГУИТ. 2018. №2 (76).
14. **Атанаевич, В.И.** Сушка пищевых продуктов: справ. пособие [Текст] / В.И. Атанаевич // - М.: ДеЛи, 2000. - 296.: ил. - ISBN 5-93314-006-6.
15. **Андреев, И. М.** Функции вакуоли в клетках высших растений [Текст] / И.М. Андреев // Физиология растений. 2001. Т. 48. № 5. С.777-787.
16. **Антипов, С.Т.** Сушка пивной дробины в аппарате с закрученным потоком фаз [Текст] / С. Т. Антипов, В. Е. Добромиров, А. В. Прибытков// Воронеж, гос. технол. акад. Воронеж, 2005. -164 с.
17. **Антипов, С.Т.** Установки для пофракционной сушки дисперсных материалов [Текст] / С. Т. Антипов, А. В. Прибытков // Техника машиностроения. 2001. № 6. С. 97-101.
18. **Афони́на, С.Н.** Биохимия компонентов чая и особенности его биологического действия на организм (обзор) [Текст] / С. Н. Афони́на, Е.Н. Лебедева, Н.П. Сетко // Оренбургский медицинский вестник. Том V. № 4 (20). С.17-33.
19. **Бессарабов, А. М.** Моделирование высокоинтенсивных процессов сушки в технологии особо чистых веществ [Текст] / А.М. Бессарабов, Т.А. Николенко, Д.А. Баранов, А.Г. Вендило // V Международный научно-технический симпозиум «Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и термовлажностная обработка материалов (СЭТТ – 2014). – Иван. гос. хим.-технол. ун-т. –Иваново, 2014. – С. 29 – 33..
20. **Брунауэр, С.** Адсорбция газов и паров [Текст] В 2-х т. Т. 1. Физическая адсорбция/ С. Брунауэр; пер. с англ. под ред. М.Н. Дубинина//. М.: Госиздат иностр. лит., 1948. -784 с.
21. **Гайфулина, Р.Р.** Влияние режимных параметров сверхкритической сушки на скорость сушки пористых материалов и на их качество [текст] /Р.Р. Гайфулина, Л.Ю. Яруллин, З.И. Зарипов, Ф. М. Гумеров // Вестник

Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 19. – С. 130-132.

22. Гаджиева, А.М. Использование томатного порошка как натуральной пищевой добавки [Текст] / А.М. Гаджиева // Современные достижения в исследовании натуральных пищевых добавок: Сборник материалов международной научно-технической Интернет - конференции, 17-18 октября 2014 г.- Краснодар: Изд. КубГТУ, 2014. С. 205-209.

23. Гамрекели, М.Н. Использование теории турбулентных струй для прогнозирования аэродинамики распылительных камер и оптимизации теплотехнологических процессов [Текст] / М.Н. Гамрекели // Тр. 1-й международной научно-практ. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)». М.: МТАУ им. В.П. Горячкина, 2002. Т.4. С.164-171.

24. Гамрекели, М.Н. Факторы ограничения и интенсификации тепломассообмена в зоне активного испарения распылительных сушильных камер [Текст] / М.Н. Гамрекели // Тр. 1-й международной научно-практ. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)». М.: МТАУ им. В.П. Горячкина, 2002. Т.4. С. 172-176.

25. Гатапова, Н.Ц. Особенности механизма и кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на подложках [Текст] / Н.Ц. Гатапова, А.Н. Пахомов, Ю.В. Пахомова // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе [текст]: сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений (22-23 сентября 2015 года)/ РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, ЗАО «Университетская книга», Курск. – 2015. С. 42-47.

26. Гиббс, Дж.В. Термодинамика. Статистическая механика [Текст] / Дж.В. Гиббс. -М.: Химия, 1982. 584 с.

- 27. Гинзбург, А.С.** Инфракрасная техника в пищевой промышленности [Текст] / А.С. Гинзбург // М.: Пищевая промышленность, 1966. - 408 с.
- 28. Гинзбург, А.С.** Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов [Текст] / А.С. Гинзбург, И.М. Савина// М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. - 280 с.
- 29. Гинзбург, А.С.** Теплофизические характеристики пищевых продуктов : Справочник / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская // 2-е изд., доп. и перераб. М. Пищ. пром-сть 1980/ - 288 с. ил. 21.
- 30. Гинзбург, А.С.** Основы теории и техники сушки пищевых продуктов [Текст] / А.С. Гинзбург// М.: Пищевая промышленность, 1975. - 527 с.
- 31. Гинзбург, А.С.** Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов [Текст] / А.С. Гинзбург, М.А. Громов. М.: Агропромиздат,1987. -272 с.
- 32. Головачева, Т.В.** Новые виды растительных пищевых добавок в рецептурах специализированных продуктов питания [Текст] / Т.В. Головачева, А.А. Запорожский, С.П. Запорожская // Современные достижения в исследовании натуральных пищевых добавок: Сборник материалов международной научно-технической Интернет - конференции, 17-18 октября 2014 г.- Краснодар: Изд. КубГТУ, 2014. С. 130-133.
- 33. Губа, О.Е.** Исследование кинетики процесса распылительной сушки меланжа [Текст] / О.Е. Губа, Ю.А. Максименко // Вестник АГТУ. Научный журнал. №2 (58) ноябрь. Астрахань: АГТУ, 2014. С. 92–96.
- 34. Губа, О.Е.** Исследование кинетики распылительной сушки меланжа с учетом влияния основных факторов на интенсивность теплообмена [Текст] / О.Е. Губа, Ю.А. Максименко // Журнал. Естественные и технические науки, №7(75). Москва: Издательство «Спутник+», 2014. С. 72 – 74.
- 35. Губа, О.Е.** Разработка рациональных способов конвективной сушки для жидких продуктов [Текст] / О.Е. Губа, Ю.А. Максименко, С.А Терешонков // Журнал. Пищевая промышленность. № 10. Москва: Изд-во «Пищевая промышленность», 2010 г. С. 24 – 25.

- 36. Губа, О.Е.** Термодинамический анализ закономерностей взаимодействия яичного порошка с водой/ О.Е. Губа, Ю.А. Максименко, Т.Г. Васильева, Э.П. Дяченко // Теоретический журнал «Хранение и переработка сельхозсырья», № 1. Москва: Издательство «Пищевая промышленность», 2012 г. С.8-9.
- 37. Гутер, Р.С.** Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта [Текст] / Р.С. Гутер, Б.В. Овчинский. – 2-е изд., перераб.// М.: Наука, 1970. – 428 с.
- 38. Демьянов В.Д.** Научное обоснование и разработка способов СВЧ-конвективной сушки фруктов [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12. Воронеж: ВГУИТ, 2015. -19 с.
- 39. Деревенко, В.В.** Функционально-структурный анализ линии для переработки косточкового сырья [Текст] / В.В. Деревенко, А.В. Сидоренко, Л.М. Бакирова // Современные проблемы техники и технологии пищевых производств: Материал XII Межд. науч.- практич. конф. Барнаул, 2009. С. 365–370.
- 40. Долинский, А.А.** Теоретические основы сушки распылением и возможности совершенствования техники и технологии [Текст] / А.А. Долинский, К.Д. Малецкая // Четвёртая Международная научно – практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2011». Т. 1. – 2011. С. 25-35.
- 41. Дранников, А.В.** Использование теории подобия при описании процесса сушки свекловичного жома перегретым паром [Текст] / А.В. Дранников, С.В. Куцов, Е.В. Костина, В.П. Ясинеvская // Вестник ВГТА. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2010. № 1. С. 25-28.
- 42. Ермолаев, В.В.** Зависимость скорости сушки препарата «Бифидумбактерин» в обобщенных координатах от влияющих факторов при инфракрасном (ИК) энергоподводе [Текст]/В.В. Ермолаев, А.Х-Х. Нугманов,

Ю.А. Максименко // Известия вузов. Пищевая технология. 2009. № 1. С. 122-123.

43. Зайко, Г.М. Получение и применение пектина для лечебных и профилактических целей [Текст] / Г.М. Зайко // - Краснодар: Изд-во КубГТУ, 1997. -138с.

44. Зуева, Г. А. Математическое моделирование процесса осциллирующей инфракрасной сушки семян [Текст] / Г.А. Зуева, С.П. Рудобашта, Н.А. Зуев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2014. – № 4 (54) – С. 23-26.

45. Ильина, С.А. Таблицы теплофизических характеристик овощных продуктов. Астрахань, СНЦ РАН, Отдел энергетических проблем, Лаборатория нетрадиционной энергетики (при АГТУ), 2005, 19с.

46. Ильясов, С.Г. Физические основы инфракрасного облучения пищевых продуктов [Текст] / С.Г. Ильясов, В.В. Красников // М.: Пищевая промышленность, 1978. 359 с.

47. Касьянов, Г.И. Применение пряно-ароматических и лекарственных растений в пищевой промышленности [Текст] / Г.И. Касьянов, И.Е. Кизим, М.А. Холодцов // «Пищевая промышленность» №5, 2000. С. 33–35.

48. Кац, З.А. Производство сушеных овощей, картофеля и фруктов. – 2-е издание, переработанное и дополненное [Текст] / З.А. Кац // - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 216с.

49. Кольман, О.Я. Разработка технологий получения продуктов профилактического назначения с использованием выжимок дикорастущих ягод [Текст] : автореф. дис. ... кандидата техн. наук : 05.18.01 / Кольман Ольга Яковлевна.- М. : КрасГАУ, 2013. - 20 с.

50. Костина, Е.В. Исследование форм связи влаги в яблочных выжимках методом термического анализа [Текст] / Е.В. Костина, Е.А. Острикова, А.А. Шевцов, А.В. Дранников // Материалы республиканской конференции молодых ученых «Наука. Образование. Молодежь». Алматы: АТУ, 2012. С. 245-246.

- 51. Краснов, В.А.** Зонд для определения коэффициента теплопроводности сыпучих материалов [Текст] / В.А. Краснов, Н.А. Подледнева, Ю.А. Максименко// Вестник АГТУ. Научный журнал. 2012. № 1(53). Астрахань: АГТУ, 2012. С. 34 – 36.
- 52. Краснов, В.А.** Установка для определения коэффициента теплопроводности жидкостей [Текст] / В.А. Краснов // Геология, добыча, переработка и экология нефтяных и газовых месторождений. Научные труды Астраханьнипигаз. Астрахань: ИПЦ «Факел» ООО «Астраханьгазпром», 2001. С.254-256.
- 53. Кретов, И. Т.** Кинетика процесса сушки свекловичного жома перегретым паром атмосферного давления [Текст] / И.Т. Кретов, В.М. Кравченко, А.В. Дранников // Хранение и переработка сельхозсырья. 2003. № 7. С.27-29.
- 54. Кретов, И.Т.** Разработка устройства для сушки свекловичного жома [Текст] / И.Т. Кретов, С.В. Шахов, А.В. Дранников, А.В. Прибытков // Хранение и переработка сельхозсырья. 2001. № 10. С. 56-57.
- 55. Куцакова, В.Е.** Интенсификация тепло- и массообмена при сушке пищевых продуктов [Текст] / В.Е. Куцакова, А.Н. Богатырев// М.: Агропромиздат, 1987. -236с.
- 56. Ланкевич, С.В.** Особенности распределения осмотически активных компонентов в растительных тканях [Текст] : диссертация ... кандидата биол. наук : 03.00.12/ Ланкевич Светлана Владимировна. Иркутск, 2005. -133 с. 6106-3/218
- 57. Лебедев, П.Д.** Высокотемпературная сушка материалов под действием внутреннего градиента давлений пара [Текст] / П.Д. Лебедев // Труды МЭИ. 1958. вып.30. С. 169-178.
- 58. Лебедев, П.Д.** Расчет и проектирование сушильных установок [Текст] / П.Д. Лебедев // М.-Л. Госэнергоиздат, 1963. -320 с.
- 59. Леончик, Б.И.** Особенности моделирования сушки распылением // Вторая Международная научно-практическая конференция «Современные

энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2005». Труды конференции. Т. 1. – М.: Издательство ВИМ, 2005. С. 71-73.

60. Липин, А. Г. Моделирование периодического процесса сушки дисперсного материала [текст] / А. Г. Липин, А. А. Липин // Материалы четвертой международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)» (СЭТТ-2011). – Москва: МГАУ, 2011. – С. 162 - 168.

61. Лыков, А.В. Сушка в химической промышленности [Текст] / А.В. Лыков// М.: Химия, 1970. - 499 с.

62. Лыков, А.В. Теория сушки [Текст] / А.В. Лыков// М.: Энергия, 1968. - 471с.

63. Лыков, А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки [Текст] / А.В. Лыков// М.: Гостоптехиздат, 1956. - 464 с.

64. Лыков, А.В. Тепломассообмен [Текст] / А.В. Лыков// М.: Энергия, 1978. - 478 с.

65. Лыков, М.В. Распылительные сушилки [Текст] / М.В. Лыков, Б.И. Леончик //- М.: Машиностроение. 1966 - 330 с.

66. Магомедов, Г.О. Структурообразование кондитерских дисперсных систем на основе пищевых порошков [Текст] / Г.О. Магомедов. Воронеж : Изд- во Воронеж. гос. технол. акад., 2001. -204с.

67. Максименко, Ю.А. Автоматизация технологических процессов при переработке сырья растительного происхождения [Текст]/ Ю.А. Максименко, Э.П. Дяченко, Ю.С. Феклунова, Э.Р. Теличкина // Вестник АГТУ. Научный журнал. Серия: УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА. №3 (Июль). Астрахань: АГТУ, 2014. С. 21 – 29.

68. Максименко, Ю.А. Анализ влияния основных факторов на эффективность процесса сушки сырья растительного происхождения [Текст]/ Ю.А. Максименко, Ю.С. Феклунова, Э.Р. Теличкина // Вестник АГТУ. Научный журнал. №2 (58) ноябрь. Астрахань: АГТУ, 2014. С. 97–101.

- 69. Максименко, Ю.А.** Гигроскопические характеристики и термодинамика взаимодействия пектина и воды [Текст] / Ю.А. Максименко, О.А. Петровичев, Р.А. Максименко // Вестник АГТУ. 2007. № 2. С. 185-188.
- 70. Максименко, Ю.А.** Исследование кинетики процесса распылительной сушки овариальной жидкости рыб осетровых пород в технологии икорного золя [Текст] / Ю.А. Максименко// Вестник АГТУ. Научный журнал. Серия «Рыбное хозяйство». 2/2011. Астрахань: АГТУ, 2011. С. 162 – 166.
- 71. Максименко, Ю.А.** Кинетика сушки кормовых продуктов растительного происхождения [Текст] / Ю.А. Максименко, С.В. Синяк // Вестник АГТУ. 2005. № 2(25). С. 267 – 271.
- 72. Максименко, Ю.А.** Установка конвективно-радиационной распылительной сушки [Текст] / Ю.А. Максименко, Ю.С. Феклунова, Н.Э. Пшеничная, Н.М. Шакезов // Естественные и технические науки. № 10 (88), 2015. Москва: Изд-во «Спутник+», 2015. С. 352-354.
- 73. Максименко, Ю.А.** Механизм внутреннего тепломассопереноса на основе экспериментально-аналитического изучения аномальной кинетики обезвоживания для продуктов животного и растительного происхождения [Текст] / Ю.А. Максименко, С.В. Синяк, Р.А. Хайбулов // Труды Второй Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы)». М.: МЭИ, 2005. Т. 1. С. 301-303.
- 74. Максименко, Ю.А.** Механизм и аномальные термодинамические особенности статического взаимодействия пищевых продуктов с водой [Текст] / Ю.А. Максименко, С.В. Синяк, Р.А. Хайбулов // Труды Второй Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы)». М.: МЭИ, 2005. Т. 2. С. 110-113.
- 75. Максименко, Ю.А.** Моделирование и совершенствование тепломассообменных процессов при конвективной сушке растительного сырья в диспергированном состоянии [Текст] / Ю.А. Максименко // Вестник

АГТУ. Научный журнал. Серия: УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА. 2013. №2 (Август). Астрахань: АГТУ, 2013. С. 19 – 24.

76. Максименко, Ю.А. Разработка рационального режима радиационно-конвективной распылительной сушки водного экстракта корня имбиря [Текст] / Ю.А. Максименко, Н.Э. Пшеничная // Естественные и технические науки. № 10 (88), 2015. Москва: Изд-во «Спутник+», 2015. С. 355-356.

77. Максименко, Ю.А. Разработка рационального режима конвективно-радиационной распылительной сушки пюре из тыквы [Текст] / Ю.А. Максименко, Ю.С. Феклунова // Естественные и технические науки. №9(87), 2015. Москва: Изд-во «Спутник+», 2015. С. 137 – 138.

78. Максименко, Ю.А. Совершенствование процесса распылительной сушки продуктов из сырья растительного происхождения [Текст] / Ю.А. Максименко, Э.Р. Теличкина, Ю.С. Феклунова // Естественные и технические науки. №6(84), 2015. Москва: Изд-во «Спутник+», 2015. С. 509 – 511.

79. Максименко, Ю.А. Конвективно-радиационная распылительная сушилка для жидких и пастообразных пищевых материалов [Текст] / Ю.А. Максименко, Ю.С. Феклунова, Н.Э. Пшеничная, Н.М. Шакезов // Вестник АГТУ. Научный журнал. 2015. №2 (60) ноябрь. Астрахань: АГТУ, 2015. С. 19 – 23.

80. Максименко, Ю.А. Совершенствование тепломассообменных процессов при сушке кормовых дрожжей в диспергированном состоянии [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2005. -21 с.

81. Максименко, Ю.А. Развитие научно-практических основ и совершенствование процессов сушки растительного сырья в диспергированном состоянии: дис. . д-ра техн. наук. - Астрахань, 2016. -502с.

82. Максименко, Ю.А. Сушильная установка для получения порошков из жидких продуктов [Текст] / Ю.А.Максименко, Н.А. Подледнева, О.Е. Губа //

Вестник АГТУ. Научный журнал. 2011. № 2(52). Астрахань: АГТУ, 2011. С. 41 – 44.

83. Максименко, Ю.А. Термодинамика внутреннего массопереноса при взаимодействии плодоовощных продуктов с водой [Текст] / Ю.А. Максименко // Вестник АГТУ. Научный журнал. 2012. № 1(53). Астрахань: АГТУ, 2012. С. 41 – 45.

84. Максименко, Ю.А. Термодинамика внутреннего массопереноса при взаимодействии продуктов микробиологического синтеза с водой [Текст] / Ю.А. Максименко, Р.А. Хайбулов, Г.У. Азизова// Материалы II Всероссийской научно - технической конференции – выставке с международным участием «Высокоэффективные пищевые технологии, методы и средства для их реализации». М.: МГУПП, 2004. С. 71-76.

85. Медведев, С.С. Физиология растений [Текст] /С.С. Медведев// -СПб.: Изд-во Санкт- Петербургского ун- та, 2004. -336 с.

86. Меркулова, Н.Ю. Применение порошков из растительного сырья в производстве пищевых концентратов [Текст] / Н.Ю. Меркулова, Н.Б. Осипова, О.В. Чугунова // Материалы 3-ей Между народной научно-практической конференции «Продовольственный рынок и проблемы здорового питания». Орел, 2000. С. 84-85.

87. Мустафаева, К.К. Совершенствование технологии переработки плодов облепихи, произрастающей в Республике Дагестан, с использованием инновационных технологических приемов [Текст] : автореферат дис. ... кандидата техн. наук : 05.18.01 / Мустафаева Каният Камаловна.- М. : КубГТУ, 2013. - 24 с.

88. Никитина, Л.М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах [Текст] / Л.М. Никитина // М.: Энергия, 1968. - 500 с.

89. Нугманов, А.Х-Х. Разработка рациональных режимов процесса варки пищевой смеси для его автоматизации с элементами анализа сложных физико-химических систем [Текст]/ А.Х-Х. Нугманов, В.В. Ермолаев, П.Н. Ларин,

Ю.А. Максименко// Известия вузов. Пищевая технология. Издательство «Кубанский государственный технологический университет», 2010. № 2-3. С. 70-73. ISSN: 0579-3009.

90. Нугманов, А.Х.-Х. Исследование теплоемкости пастообразных пищевых продуктов [Текст] / А.Х.-Х. Нугманов, В.А. Краснов, Ю.А. Максименко, Е.В. Фоменко // Естественные и технические науки. №6(84), 2015. Москва: Изд-во «Спутник+», 2015. С. 512 – 514.

91. Остриков, А.Н. Энергосберегающие технологии и оборудование для сушки пищевого сырья [Текст] / А.Н. Остриков, И.Т. Кретов, А.А. Шевцов // Воронеж: Воронежская государственная технологическая академия, 1998. - 344 с.

92. Остриков, А.Н. Новое в технологии сушки культивируемых грибов [Текст] / А. Н. Остриков, С. А. Шевцов // Воронеж: ВГТА, 2006. – 168 с.

93. Остриков, А.Н. Развитие научных основ и разработка способов тепловой обработки пищевого растительного сырья с использованием перегретого пара [Текст]: дисс. ... докт. техн. наук: 05.18.12 / Остриков Александр Николаевич. – Воронеж, 1993. – 350 с.

94. Остриков, А.Н. Кинетика сушки топинамбура перегретым паром [Текст] / А. Н. Остриков, И. А. Зуев // Известия вузов. Пищевая технология. – 2005. – № 2 - 3. – С. 87 – 89.

95. Панфилов, В. А. Системология пищевых производств - новое направление в научном обеспечении АПК [Текст] / В. А. Панфилов // Тезисы докладов 2-й междунар. науч. конф. «Управление свойствами зерна в технологии муки, крупы и комбикормов». МГУПП. - М., 2000. С. 132 - 133.

96. Панфилов, В.А. Технологические линии пищевых производств. Теория технологического потока [Текст] / В.А. Панфилов // М.: Колос, 1993. -286 с.

97. Пат. на полезную модель 106555 РФ, МПК В01D11/00 (2006.01). Устройство для получения экстрактов из растительного сырья [Текст] / С.Ф. Яцун, В.Я. Мищенко, О.С. Тарасов; Патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Юго-

западный государственный университет» (ГОУВПО «ЮЗГУ»). – 2011106619/05; заявл. 22.02.2011; опубл. 20.07.2011, Бюл. № 20.

98. Пат. на полезную модель 109541 РФ, МПК F26B17/10 (2006.01).

Сушилка взвешенного слоя [Текст]/ Н.А. Устинов, А.А. Матказина, С.В. Варнаков; Патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный технический университет» (СГТУ). – 2011128048/06; заявл. 07.07.2011; опубл.20.10.2011, Бюл. № 29.

99. Пат. на полезную модель 111620 РФ, МПК F26B17/26 (2006.01).

Многосекционная вибрационная сушилка для сыпучих материалов [Текст] В.Н. Денисов, С.П. Курилин, В.М. Новиков, П.А. Никитенков, Д.Ю. Фицулин; Патентообладатель:ГНУ Смоленский научно-исследовательский институт сельского хозяйства Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2011108815/06; заявл. 09.03.2011; опубл.20.12.2011, Бюл. № 35.

100. Пат. на полезную модель 120236РФ, МПК G01R1/067.

Зонд для определения коэффициента теплопроводности [Текст] / Краснов В.А., Лысова В.Н., Максименко Ю.А., Подледнева, Н.А., Пленкин А.В; Патентообладатель: ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет» - 2012115153/28; Заявлено 16.04.2012. Опубл. 10.09.2012, Бюл. № 25.

101. Пат. на полезную модель 123915 РФ, МПК F26B17/04 (2006.01).

Многослойная сушилка кипящего слоя [Текст] /А.Б. Голованчиков, В.В. Шишлянников, А.Ю. Обухова, Т.А. Осетрова, Н.Н. Коваль, В.А.; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ). – 2012129455/06; заявл. 11.07.2012 опубл.10.01.2013, Бюл. № 1.

102. Пат. на полезную модель 126103РФ, МПК F26B17/10 (2006.01).

Аппарат для получения порошков из жидких продуктов [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Э.П. Дяченко; Патентообладатель: И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Э.П. Дяченко, Общество с ограниченной

ответственностью «АСТРБИОПРОДУКТ»- 2012104262/06; Заявлено 07.02.2012. Оpubл. 20.03.2013, Бюл. № 8.

103. Пат. на полезную модель 126104 РФ, МПК F26B17/12 (2006.01).

Конвективная сушилка [Текст] /А.В, Дранников; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Воронежский государственный университет инженерных технологий (ФГБОУ ВПО ВГУИТ). – 2012148099/06; заявл. 12.11.2012; опубл.20.03.2013, Бюл. № 8.

104. Пат. на полезную модель 131138 РФ, МПК F26B17/10 (2006.01).

Сушилка с псевдооживленным слоем для дисперсных материалов [Текст] /Ю.И. Шишацкий, Е.С. Бунин, Е.И. Голубятников, С.В. Лавров; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Воронежский государственный университет инженерных технологий (ФГБОУ ВПО ВГУИТ). – 2013111544/06; заявл. 14.03.2013; опубл.10.08.2013, Бюл. № 22.

105. Пат. на полезную модель 138096 РФ, МПК F26B17/04 (2006.01).

Многослойная сушилка кипящего слоя [Текст] /А.Б. Голованчиков, В.В. Шишлянников, Н.А. Дулькина, Т.А. Осетрова, М.С. Густякова, О.В. Затымин; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ). – 2013121860/06; заявл. 13.05.2013; опубл.27.02.2014, Бюл. № 6.

106. Пат. на полезную модель 139139 РФ, МПК F26B17/10 (2006.01).

Сушилка с псевдооживленным слоем [Текст] /Н.А. Устинов, Е.К. Кожевникова; Патентообладатель: Федеральное Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.» (СГТУ). – 2013123026/06; заявл. 20.05.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 10.

- 107. Пат. на полезную модель 139937 РФ, МПК F26B15/04 (2006.01).** Ротационная сушилка кипящего слоя [Текст] Е.П. Кошевой, В.С. Косачёв, С.А. Подгорный; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВПО «КубГТУ»). – 2014100721/06; заявл. 09.01.2014; опубл. 27.04.2014, Бюл. № 12.
- 108. Пат. на полезную модель 141899 РФ, МПК A61J 3/00 (2006.01), B01J 8/18 (2006.01).** Аппарат для нанесения пленочных покрытий на гранулированные, капсулированные и таблетированные формы [Текст] / Н.П. Васина, Э.П. Дяченко, И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Л.М. Титова; Патентообладатель: ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет». – 2013157409/15; заявл. 24.12.2013; опубл. 20.06.2014, Бюл. № 17.
- 109. Пат. на полезную модель 150305 РФ, МПК F26B 5/00 (2006.01).** Распылительная сушилка [Текст] / И.Ю. Алексанян, Э.П. Дяченко, Ю.А. Максименко, Н.П. Васина, Ю.С. Феклунова, Э.Р. Теличкина, П.И. Григорьев; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Астраханский государственный технический университет" (ФГБОУ ВПО "АГТУ"). – 2014126288/28; заявл. 27.06.2014; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4.
- 110. Пат. на полезную модель 44804 РФ, МПК F26B17/10.** Сушилка кипящего слоя для термолабильных полидисперсных сыпучих материалов [Текст] / Ю.Н. Агапов, А.В. Бараков, В.И. Лукьяненко, В.Г. Стогней.; Патентообладатель: Воронежский государственный технический университет. – 2004113491/22; заявл. 05.05.2004 опубл. 27.03.2005, Бюл. № 9.
- 111. Пат. на полезную модель 54786 РФ, МПК A61J3/00 (2006.01).** Распылительная сушилка [Текст] В.П. Гусев, М.А. Смирнов, В.А. Спирин, Т.Б. Кравченко, Д.С. Иванов; Патентообладатель: Общество с ограниченной

ответственностью «АРТЛАЙФ ТЕХНО». – 2006105242/22; заявл. 20.02.2006; опубл. 27.07.2006, Бюл. № 21.

112. Пат. на полезную модель 84518 РФ, МПК F26B17/00. Установка для сушки дисперсных материалов / И.Ю. Алексанян, Л.М. Титова, Ю.А. Максименко, П.Н. Ларин; Патентообладатель: Федеральное агентство по рыболовству, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Астраханский государственный технический университет» (ФГОУ ВПО «АГТУ»). – 2008147611/22; заявл. 02.12.2008; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 19.

113. Пат. на полезную модель 86718 РФ, МПК F26B5/04. Сушильная установка для получения порошков из жидких продуктов [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Э.П. Дяченко; Патентообладатель: Государственный комитет Российской Федерации по рыболовству, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Астраханский государственный технический университет» (ФГОУ ВПО «АГТУ»). – 2008143929/22; заявл. 05.11.2008; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25.

114. Пат. на полезную модель 93633 РФ, МПК A23L3/46 (2006.01). Распылительная сушилка [Текст] / В.В. Илюхин, М.Я. Бурлев; Патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет прикладной биотехнологии». – 2009145825/22; заявл. 11.12.2009; опубл. 10.05.2010, Бюл. № 13.

115. Пат. на полезную модель 93634 РФ, МПК A23L3/46 (2006.01). Распылительная сушилка [Текст] / В.В. Илюхин, М.Я. Бурлев; Патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет прикладной биотехнологии». – 2009145826/22; заявл. 11.12.2009; опубл. 10.05.2010, Бюл. № 13.

- 116. Пат. на полезную модель 93635 РФ, МПК A23L3/46 (2006.01).** Распылительная сушилка [Текст] / В.В. Илюхин, М.Я. Бурлев; Патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет прикладной биотехнологии». – 2009148116/22; заявл. 24.12.2009; опубл. 10.05.2010, Бюл. № 13.
- 117. Патент на полезную модель 154840 РФ, F26B17/10 (2006.01).** Распылительная сушилка [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Н.П. Васина, Ю.С. Феклунова, О.Е. Губа; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Астраханский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО "АГТУ"). – 2014148752/06; заявл. 03.12.2014; опубл.: 10.09.2015, Бюл. № 25.
- 118. Пат. 2334182 РФ, МПК F26B3/12 (2006.01).** Распылительная сушилка со встречными закрученными потоками типа ВЗП [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов, А.В. Костылева, Е.О. Боброва; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2007100045/06; заявл. 09.01.2007; опубл. 20.09.2008, Бюл. № 26.
- 119. Пат. 2340851 РФ, МПК F26B17/10 (2006.01), F26B3/12 (2006.01).** Сушилка псевдооживленного слоя с инертной насадкой [Текст] / О.С. Кочетов, М.В. Голубева, Л.В. Колаева, Е.О. Боброва, Е.В. Духанина, Н.И. Горнушкина, Д.О. Павлова; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич, Голубева Мария Владимировна.- 2007128597/06; заявл. 26.07.2007; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 34.
- 120. Пат. на полезную модель 191126 РФ, МПК F26B 17/10.** Распылительная сушилка / Алексанян И.Ю., Максименко Ю.А., Невалённая А.А. Теличкин Р.С.; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный технический университет» ФГБОУ ВО "АГТУ" – 2019100749: Заявлено 10.01.2019. Опубликовано 25.07.2019 Бюл. № 21.

- 121. Пат. 2161890 РФ, МПК⁷ A23G3/00.** Способ производства кондитерских изделий [Текст] / Г.О. Магомедов, Г.П. Мальцев, Л.Е. Старчевая, Н.Т. Колимбет, А.В. Зубченко, А.Я. Олейникова, О.Д. Сухарева, Небренчина И.В.; Патентообладатель: Акционерное общество открытого типа «Воронежская кондитерская фабрика». – 99101886/13; заявл. 01.02.1999; опубл. 20.01.2001.
- 122. Пат. 2163814 РФ, МПК⁷ A61K35/78, A61K35/54, A61K35/56, A61K7/00, A61K9/00.** Биологически активная добавка для косметических, гигиенических и фармакологических средств и способ ее получения / А.Е. Груздева, Е.В. Потемкина, Н.В. Гришатова, М.А. Кульчицкая; Патентообладатель: Закрытое акционерное общество «Биофит» ЛТД. – 98110827/14; заявл. 05.06.1998; опубл. 10.03.2001.
- 123. Пат. 2197145 РФ, МПК A23L1/29.** Модифицированные пищевые волокна [Текст] / Л.Ф. Щелкунов, Н.А. Голубкина; Патентообладатель: Щелкунов Леонид Федорович, Голубкина Надежда Александровна. – 2001124010/13; заявл. 03.09.2001; опубл. 27.01.2003.
- 124. Пат. 2225242 РФ, МПК B01D11/02.** Аппарат для получения экстрактов из растительного сырья [Текст] / В.Л. Алексеев, Б.А. Ефремов, Ф.М. Гарипов, А.Д. Васенев; Патентообладатель: ОАО "Казанский завод продовольственных товаров «Алекс».- 97101065/12; заявл. 06.01.1997; опубл. 10.03.2004.
- 125. Пат. 2241928 РФ, МПК F26B17/10.** Сушилка кипящего слоя для термолабильных сыпучих материалов [Текст] / Ю.Н. Агапов; Патентообладатель: Воронежский государственный технический университет. – 20031033234/06; заявл. 30.02.2003; опубл. 10.12.2004.
- 126. 177. Пат. 2250131 РФ, МПК B01J2/04, B01J2/16, B01D1/18.** Установка для распылительной сушилки и способ её применения [Текст] / Ойген Шварц, Гернот Мушль, Ханспетер Рютцлер, Жан-Марк Дютте; Патентообладатель: МЕРК ПАТЕНТ ГМБХ.- 2002100641/12; заявл. 06.06.2000; опубл. 20.04.2005.
- 127. Пат. 2289950 РФ, МПК A23L 1/06, A23L 1/0524.** Способ производства яблочно-фруктовой смеси / Т.Г. Причко, Л.А. Вайнштейн, И.А. Мачнева, А.В. Прах, Н.П., Козьменко; Патентообладатель: ГНУ РАСХ Северо-Кавказский

зональный научно-исследовательский институт садоводства и виноградарства (СКЗНИИС и В). – 2004121300/13; заявл. 12.07.2004; опубл. 27.12.2006, Бюл. № 36.

128. Пат. 2303221 РФ, МПК F26B17/10 (2006.01), F26B5/02 (2006.01).

Сушилка кипящего слоя для полидисперсных материалов [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, Г.В. Львов, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2006112956/06; заявл. 19.04.2006; опубл. 20.07.2007, Бюл. № 20.

129. Пат. 2304266 РФ, МПК F26B17/00 (2006.01). Ступенчато-

противоточная сушилка кипящего слоя [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, Г.В. Львов, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2006112950/06; заявл. 19.04.2006; опубл. 10.08.2007, Бюл. № 22.

130. 181. Пат. 2305238 РФ, МПК F26B17/04 (2006.01). Ленточная сушилка

кипящего слоя [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, Г.В. Львов, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2006112968/06; заявл. 19.04.2006; опубл. 27.08.2007, Бюл. № 24.

131. Пат. 2305239 РФ, МПК F26B17/10 (2006.01). Сушилка кипящего слоя

для пастообразных материалов [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, Г.В. Львов, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2006112958/06; заявл. 19.04.2006; опубл. 27.08.2007, Бюл. № 24.

132. Пат. 2305240 РФ, МПК F26B17/10 (2006.01). Сушилка кипящего слоя

[Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, Г.В. Львов, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2006114464/06; заявл. 28.04.2006; опубл. 27.08.2007, Бюл. № 24.

133. Пат. 2309607 РФ, МПК A23L 1/0524 (2006.01). Способ получения

пектина и других продуктов из пектиносодержащего сырья [Текст] / И.Ю. Алексанян, П.М. Аристов, Ю.А. Максименко, С.В. Синяк; Патентообладатель: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Астраханский государственный технический

университет (ФГОУ ВПО АГТУ). - 2006101955/13; заявл. 24.01.2006; опубл. 27.07.2007, Бюл. № 31.

134. Пат. 2312697 РФ, МПК B01D11/00 (2006.01). Устройство для получения экстрактов растительного сырья [Текст] / В.Н. Шекуров; Патентообладатель: Шекуров Виктор Николаевич.- 2006109944/13; заявл. 17.03.2006; опубл. 20.12.2007, Бюл. №35.

135. Пат. 2314471 РФ, МПК F26B17/00 (2006.01). Многоленточная сушилка кипящего слоя [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, Г.В. Львов, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2006112966/06; заявл. 19.04.2006; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1.

136. Пат. 2326302 РФ, МПК F26B3/12 (2006.01). Сушилка кипящего слоя с инертной насадкой [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов, А.В. Костылева; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2007100022/06; заявл. 09.01.2007; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 16.

137. Пат. 2326306 РФ, МПК F26B3/12 (2006.01). Установка для сушки растворов, суспензий и пастообразных материалов [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов, А.В. Костылева; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2007100036/06; заявл. 09.01.2007; опубл. 10.06.2008.

138. Пат. 2282119 РФ, МПК F26B15/08 (2006.01). Комплексная сушильная установка [Текст] / И.Ю. Алексанян, В.В. Давидюк; Патентообладатель: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Астраханский государственный технический университет (ФГОУ ВПО АГТУ).- 2004138034/06; заявл. 24.12.2004; опубл. 20.08.2006, Бюл. №23.

139. Пат. 2328669 РФ, МПК F26B3/12 (2006.01). Распылительная сушилка с инертной насадкой [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов, А.В. Костылева; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2007100040/06; заявл. 09.01.2007; опубл. 10.07.2008.

- 140. Пат. 2328676 РФ, МПК F26B3/12 (2006.01).** Вихревая распылительная сушилка для дисперсных материалов [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов, А.В. Костылева; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2007100030/06; заявл. 09.01.2007; опубл. 10.07.2008.
- 141. Пат. 2328948 РФ, МПК A23L3/40 (2006.01).** Сушилка распылительная [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов, А.В. Костылева, Е.О. Боброва; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2007100046/13; заявл. 09.01.2007; опубл. 20.07.2008, Бюл. № 20.
- 142. Пат. 2329745 РФ, МПК A23L3/40 (2006.01).** Установка для вихревой распылительной сушки [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов, А.В. Костылева; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2007100033/13; заявл. 09.01.2007; опубл. 27.08.2008.
- 143. Пат. 2329747 РФ, МПК A23L3/40 (2006.01).** Сушилка с инертной насадкой [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов, А.В. Костылева, Е.О. Боброва; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2007100042/13; заявл. 09.01.2007; опубл. 27.07.2008, Бюл. № 21.
- 144. Пат. 2332624 РФ, МПК F26B3/12 (2006.01).** Распылительная сушилка типа ВЗП с инертным носителем [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Кочетова, С.С. Кочетов, С.С. Кочетов, А.В. Костылева; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2007100039/06; заявл. 09.01.2007; опубл. 27.08.2008, Бюл. № 24.
- 145. Пат. 2352880 РФ, МПК F26B3/30 (2006.01).** Сушилка инфракрасная [Текст] / С.К. Волончук; Патентообладатель: Государственное Научное Учреждение Сибирский Научно-Исследовательский и Проектно-Технологический институт переработки сельскохозяйственной продукции.- 2007114874/06; заявл. 19.04.2007; опубл. 20.04.2009, Бюл. №11.
- 146. Пат. 2340678 РФ, МПК C13C3/00 (2006.01), A23L1/214 (2006.01).** Способ получения пищевого волокна из свекловичного жома [Текст] / В.А. Лосева, Л.Н. Путилина, Н.А. Матвиенко, С.М. Шестова; Патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального

образования Воронежская государственная технологическая академия.- 2007117235/13; заявл. 08.05.2007; опубл. 10.12.2008, Бюл. №34.

147. Пат. 2548230 РФ, МПК F26B17/10 (2006.01), F26B5/04 (2006.01).

Энергосберегающая двухступенчатая сушильная установка для растительных материалов [Текст] / Ю.В. Родионов, Д.В. Никитин, А.С. Зорин, А.В. Щегольков, В.М. Дмитриев, Е.П. Ларионова; Патентообладатели: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО ТГТУ), Общество с ограниченной ответственностью «Новые агрегаты вакуумной сушки» (ООО «Навакс»).- 2013111266/06; заявл. 12.03.2013; опубл. 20.04.2015, Бюл. №11.

148. Пат. 2542527 РФ, МПК A23L1/20 (2006.01), A23N12/08 (2006.01).

Установка для ИК-термообработки семян бахчевых культур [Текст] / В.В. Деревенко; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВПО «КубГТУ»).- 2014102808/13; заявл. 28.01.2014; опубл. 20.02.2015, Бюл. №5.

149. Пат. 2343375 РФ, МПК F26B3/12 (2006.01).

Распылительная сушилка кипящего слоя с инертной насадкой [Текст] / О.С. Кочетов, М.В. Голубева, Л.В. Колаева, Е.О. Боброва, Е.В. Духанина, Н.И. Горнушкина, Д.О. Павлова; Патентообладатели: Кочетов Олег Савельевич, Голубева Мария Владимировна.- 2007124757/06; заявл. 03.07.2007; опубл. 10.01.2009.

150. Пат. 2051588 РФ, МПК A23B7/02.

Устройство для сушки плодов и ягод [Текст] / Б.А. Музыченко, Э.С. Гореньков, А.Н. Шевцов, А.Д. Еремин; Патентообладатель: Научно-производственное объединение «Виноград».- 5037377/13; заявл. 10.02.1992; опубл. 10.01.1996.

151. Пат. 2361159 РФ, МПК F26B3/12 (2006.01).

Камера сушки распылительной сушилки [Текст] / А.А. Шагивалеев, А.Н. Николаев, Ю.Ф. Коротков, А.С. Шагивалеев, А.С. Павлов; Патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального

образования «Казанский государственный технологический университет».- 2008104243/06; заявл. 28.01.2008; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 19.

152. Пат. 2366192 РФ, МПК A23B7/01 (2006.01), A61K36/00 (2006.01).

Способ сушки экстракта корня солодки [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, В.В. Ермолаев, Р.А. Хайбулов; Патентообладатель: Государственный комитет Российской Федерации по рыболовству Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Астраханский государственный технический университет" ФГОУ ВПО "АГТУ". - 2008112936/13; заявл. 03.04.2008; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25.

153. Пат. 2374851 РФ, МПК A23B7/02 (2006.01). Способ обезвоживания

пищевых волокон при производстве пектина [Текст] / И.Ю. Алексанян, Л.М. Титова, Ю.А. Максименко, В.В. Ермолаев, Э.П. Дяченко; Патентообладатель: Государственный комитет Российской Федерации по рыболовству Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Астраханский государственный технический университет" (ФГОУ ВПО "АГТУ"). - 2008130429/13; заявл. 22.07.2008; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 34.

154. Пат. 2377485 РФ, МПК F26B3/12. Распылительная сушилка [Текст] /

И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, Э.П. Дяченко, В.В. Ермолаев; Патентообладатель: Государственный комитет Российской Федерации по рыболовству, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Астраханский государственный технический университет» (ФГОУ ВПО «АГТУ»). – 2008145783/06; заявл. 19.11.2008; опубл. 27.12.2009, Бюл. № 36.

155. Пат. 2381805 РФ, МПК A61K35/74 (2006.01), A23L3/52 (2006.01).

Способ обезвоживания биологически активного препарата в вакууме во вспененном состоянии [Текст] / В.В. Ермолаев, И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко; Патентообладатель: Государственный комитет Российской Федерации по рыболовству Федеральное государственное образовательное

учреждение высшего профессионального образования "Астраханский государственный технический университет" (ФГОУ ВПО "АГТУ"). - 2008112966/15; заявл. 03.04.2008; опубл. 20.02.2010, Бюл. № 5.

156. Пат. 2414141 РФ, МПК A23G3/36, 23L1/29. Способ производства кондитерского изделия на основе топинамбура типа нуги и его состав / М.И. Курлаева; Патентообладатели: Государственное общеобразовательное учреждение высшего профессионального образования «Пятигорский государственный технологический университет», М.И. Курлаева. – 2009100288/13; заявл. 11.01.2009; опубл. 20.03.2011, Бюл. № 8.

157. Пат. 2423863 РФ, МПК A23B 7/01 (2006.01). Способ сушки томатов [Текст] / И.Ю. Алексанян, Т.Г. Васильева, Э.П. Дяченко, Ю.А. Максименко, В.В. Ермолаев; Патентообладатель: Алексанян Игорь Юрьевич, Дяченко Эдуард Павлович, Максименко Юрий Александрович, Ермолаев Виталий Витальевич. - 2010108565/13; заявл. 09.03.2010; опубл. 20.07.2011, Бюл. № 20.

158. Пат. 2423864 РФ, МПК A23B 7/01 (2006.01). Способ сушки баклажанов [Текст] / И.Ю. Алексанян, Э.П. Дяченко, Ю.А. Максименко, В.В. Ермолаев, Л.М. Титова; Патентообладатель: Алексанян Игорь Юрьевич, Дяченко Эдуард Павлович, Максименко Юрий Александрович, Ермолаев Виталий Витальевич. - 2010108637/13; заявл. 09.03.2010; опубл. 20.07.2011, Бюл. № 20.

159. Пат. 2432772 РФ, МПК A23J 1/04 (2006.01), A23J 3/00 (2006.01), A23L 3/52 (2006.01). Способ сушки овариальной жидкости осетровых рыб [Текст] / И.Ю. Алексанян, С.А. Терешонков, Э.П. Дяченко, Ю.А. Максименко, В.В. Ермолаев; Патентообладатель: Алексанян Игорь Юрьевич, Максименко Юрий Александрович, Ермолаев Виталий Витальевич, Дяченко Эдуард Павлович. - 2010136642/10; заявл. 31.08.2010; опубл. 10.11.2011, Бюл. № 31.

160. Пат. 2435118 РФ, МПК F26B3/12 (2006.01). Распылительная сушилка [Текст] / А.И. Зайцев, А.Е.Лебедев, А.Б Капранова, И.С. Шеронина, Ю.В. Никитина; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Ярославский государственный технический университет».- 2010127051/06; заявл. 01.07.2010; опубл. 27.11.2011, Бюл. №33.

161. Пат. 2438692 РФ, МПК А61К 36/71 (2006.01), А61К 36/28 (2006.01), А61Р 29/00 (2006.01), А61Р 35/00 (2006.01). Растительный экстракт и его терапевтическое применение [Текст] / М.Х. Кройтер; Патентообладатель: ИНСАЙНИОН ХОЛДИНГЗ ЛИМИТЕД.- 2009148321/15; заявл. 02.06.2008; опубл. 10.01.2012, Бюл. №1.

162. Пат. 2451256 РФ, МПК F26B9/06 (2006.01), F26B3/12 (2006.01), B05B7/00 (2006.01). Распылительная сушилка [Текст] / А.И. Зайцев, А.Е.Лебедев, А.Б Капранова, А.В. Дубровин, А.А. Павлов; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ярославский государственный технический университет».- 2010141491/06; заявл. 08.10.2010; опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14.

163. Пат. 2463536 РФ, МПК F26B3/12 (2006.01). Противоточная распылительная сушилка [Текст] / В.И. Мошкин, И.В. Мошкина, Н.В. Патрушева, Е.В. Шуваева; Патентообладатель: Мошкин Владимир Иванович.- 2010145969/06; заявл. 11.11.2010; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 14.

164. Пат. 2466554 РФ, МПК А23L1/00 (2006.01). Способ получения растительных экстрактов [Текст] / Н.Т. Пехтерева, В.В. Амельченко, Е.И. Кононова; Патентообладатель: Автономная некоммерческая организация высшего профессионального образования "Белгородский университет кооперации, экономики и права".- 2011112587/13; заявл. 01.04.2011; опубл. 20.11.2012, Бюл. №32.

165. Пат. 2473356 РФ, МПК А61К36/00 (2006.01), B01D11/02 (2006.01). Способ получения водных экстрактов из растительного сырья с повышенным содержанием извлекаемых активных веществ [Текст] / Б.В. Саргин, Г.В. Бобков, С.А. Павлов; Патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Компания Клевер».- 2011149734/15; заявл. 07.12.2011; опубл. 27.01.2013, Бюл. №3.

166. Пат. 2476792 РФ, МПК F26B17/10 (2006.01). Пневматическая сушилка [Текст] / А.А. Селиверстов, И.Е. Тимофеев, Е.А. Шестаков, С.А. Шестаков; Патентообладатель: Селиверстов Артем Александрович, Тимофеев Иван Егорович, Шестаков Евгений Александрович, Шестаков Сергей Александрович.- 2011131360/06; заявл. 26.07.2011; опубл. 27.02.2013, Бюл. № 6.

167. Пат. 2480693 РФ, МПК F26B17/10 (2006.01). Сушилка с регулируемым закрученным потоком теплоносителя [Текст] / С.Т. Антипов, А.В. Журавлев, Д.А. Казарцев, А.Ю. Баранов; Патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Воронежская государственная технологическая академия (ГОУ ВПО ВГТА).- 2011113204/06; заявл. 05.04.2011; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 28.

168. Пат. 2484398 РФ, МПК F26B9/06 (2006.01), F26B3/12 (2006.01), F28D7/00 (2006.01). Теплообменный аппарат для распылительной сушилки [Текст] / О.С. Кочетов, М.О. Стареева, Е.С. Бородина; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич, Стареева Мария Олеговна.- 2011142396/06; заявл. 20.10.2011; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 16.

169. Пат. 2490072 РФ, МПК B05B7/10 (2006.01). Центробежно-вихревая распылительная форсунка [Текст] Б.А. Зимин; Патентообладатель: Зимин Борис Алексеевич.- 2012109834/05; заявл. 15.03.2012; опубл. 20.08.2013, Бюл. № 23.

170. Пат. 2491947 РФ, МПК A61K36/00 (2006.01), B01D11/02 (2006.01). Способ получения экстрактов из растительного сырья водно-жировой экстракцией натуральными экстрагентами [Текст] / Б.В. Саргин, Г.В. Бобков, С.А. Павлов; Патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью "Компания Клевер".- 2011149735/15; заявл. 07.12.2011; опубл. 10.09.2013, Бюл. №25.

171. Пат. 2508514 РФ, МПК F26B15/04 (2006.01). Сушилка для сыпучих материалов [Текст] / А.Н. Крутин, А.А. Зурначев, А.В. Буцык; Патентообладатель: Крутин Александр Николаевич, Зурначев Александр

Андреевич, Буцык Андрей Владимирович.- 2012134657/06; заявл. 13.08.2012; опубл. 27.02.2014, Бюл. № 6.

172. Пат. 2528693 РФ, МПК C11B1/10 (2006.01). Способ получения растительных экстрактов для косметики [Текст] / А.П. Усов, О.В. Кожевникова, Э.Г. Хачари, А.П. Хохлова; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВПО «КубГТУ»).- 2013115336/13; заявл. 05.04.2013; опубл. 20.09.2014, Бюл. №26.

173. Пат. 2493515 РФ, МПК F26B15/26 (2006.01), F26B3/347 (2006.01). Комбинированная СВЧ-конвективная сушилка [Текст] / А.Н. Остриков, Р.В. Дорохин; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий» («ВГУИТ»).- 2012108886/06; заявл. 07.03.2012; опубл. 20.09.2013, Бюл. №26.

174. Пат. 2544109 РФ, МПК F26B17/10 (2006.01), F26B3/12 (2006.01). Распылительная сушилка [Текст] / О.С. Кочетов, И.Г. Гетия; Патентообладатель: Кочетов Олег Савельевич.- 2013146637/06; заявл. 18.10.2013; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 7.

175. Пахомова, Ю.В. Особенности механизма и кинетики сушки капель дисперсий (на примере сушки послеспиртовой барды) / Ю.В. Пахомова, В.И. Коновалов, А.Н. Пахомов // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 70–82.

176. Перфилова, О.В. Перспективные направления в производстве плодоовощных порошков [Текст] / О.В. Перфилова // Глобальный научный потенциал: сб. материалов 3-й Международной научно-практической конференции. - Тамбов. -2007.-С. 153-154.

177. Перфилова, О.В. Применение порошкообразных полуфабрикатов в производстве мучных кондитерских изделий, обогащенных пищевыми волокнами и биологически активными веществами [Текст] / О.В. Перфилова //

Наука и устойчивое развитие общества. Наследие В.И. Вернадского: сб. материалов 3-й Международной научно-практической конференции. - Тамбов. - 2008. - С. 333-336.

178. Перфилова, О.В. Разработка технологии производства фруктовых и овощных порошков для применения их в изготовлении функциональных мучных кондитерских изделий. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. - М.: ГОУ ВПО МГУТУ, 2009.- 26с.

179. Перфилова, О.В. Разработка технологии производства фруктовых и овощных порошков для применения их в изготовлении функциональных мучных кондитерских изделий [Текст] : диссертация ... кандидата техн. наук : 05.18.01/Перфилова Ольга Викторовна.-М. : Мичуринск-научоград, 2009. - 281с.

180. Перфилова, О.В. Фруктовые и овощные порошки из выжимок в кондитерском производстве [Текст] / О.В. Перфилова, Б.А. Баранов, Ю.Г. Скрипников // Хранение и переработка сельхозсырья. - 2009. - № 9. - С. 52-54.

181. Петровичев, О.А. Исследование кинетики распылительной сушки пектинового экстракта [Текст] / О.А. Петровичев, И.Ю. Алексанян // Вестник АГТУ. 2006. № 6. С. 154-158.

182. Петровичев, О.А. Исследование тепломассообменных и гидромеханических процессов при распылительной сушке пектинового экстракта [Текст]: диссертация ... кандидата техн. наук : 01.04.14 / Петровичев Олег Александрович. Астрахань, 2007. -172 с.: ил. РГБ ОД, 61 07-5/5462.

183. Петровичев, О.А. Критериальное уравнение процесса акустического распыления жидких и пастообразных пищевых продуктов [Текст]/ О.А. Петровичев, Ю.А. Максименко, С.В. Синяк, Л.Х.-А. Саипова// Вестник АГТУ. Научный журнал. №2 (58) ноябрь. Астрахань: АГТУ, 2014. С. 102–105.

184. Плаксин, Ю.М. Основы теории инфракрасного нагрева [Текст] / Ю.М. Плаксин, В.В. Филатов, А.Ф. Доронин, М.В. Гончаров, М.Г. Куликова // Монография. - М.: Издательский комплекс МГУПП, 2007. - 168 с.

- 185. Поверин, А.Д.** Новая технология получения инстантного порошкового экстракта зеленого чая [Текст] / А.Д. Поверин // Пиво и напитки. 2008. №2. С.42-45.
- 186. Поверин, А.Д.** Технология получения порошкового экстракта зеленого чая [Текст] / А.Д. Поверин // Пищевая промышленность. 2008. №7. С 36-38.
- 187. Подледнева, Н.А.** Гигроскопические характеристики и термодинамический анализ взаимодействия биомассы лактобактерий и воды [Текст]/ Н.А. Подледнева, Ю.А. Максименко// Вестник АГТУ. Научный журнал. 2011. № 2(52). Астрахань: АГТУ, 2011. С. 45 – 49.
- 188. Подледнева, Н.А.** Гигроскопические характеристики и термодинамика взаимодействия лактобактерий и воды [Текст]/ Н.А. Подледнева, Ю.А. Максименко// Четвертая Международная научно – практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2011» (20-23 сентября 2011г.). Москва: ФГОУ ВПО «МГАУ», 2011. т.1. С.473-478.
- 189. Полевой, В.В.** Физиология растений: учебник для биол. спец. вузов [Текст] / В. В. Полевой. - М. : Высш. шк., 1989. - 464 с.
- 190. Попова, С.Б.** Совершенствование процесса сушки тыквы в технологии плодовоовощных концентратов [Текст] : Дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 : Астрахань, 2004 220 с. РГБ ОД, 61:04-5/1574.
- 191. Присухина, Н. В.** Разработка технологии производства порошка из вторичных продуктов переработки мелкоплодных яблок Сибири : автореф. дис. ... кандидата техн. наук / Н. В. Присухина ; науч. рук. Типсина Н. Н. ; офиц. оппоненты: Буянов О. Н., Зырянов Н. И.- М. : ФГОУ ВПО Красноярский ГАУ, 2011. – 17 с.
- 192. Ревина, А.В.** Интенсификация тепломассообмена при сушке баклажанов [Текст] : диссертация ... кандидата техн. наук : 01.04.14/ Ревина Алла Викторовна. Астрахань, 2005. -176 с. : 61 05-5/2083.

- 193. Рогов, И.А.** Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов / И.А. Рогов, В.Я. Авраменко, С.В. Некрутман и др. // М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 288 с.
- 194. Рубанка, Е.В.** Исследование физико-химических свойств водных экстрактов чая [Текст] / Е.В. Рубанка, В.А. Терлецкая, И.Н. Зинченко // Научни трудове на Университет по хранителни Технологии – пловдив. Том LXI. 2014 г. С. 63-68.
- 195. Руднев, С.Д.** Интенсификация и повышение качества селективной дезинтеграции адгезионным разупрочнением растительной ткани [Текст] / С.Д. Руднев, Е.Ф. Вайман, А.И. Яремчук // Техника и технология пищевых производств. 2010. № 2. С. 50 - 55.
- 196. Руднев, С.Д.** Селективная дезинтеграция растительного сырья: монография [Текст] / С.Д. Руднев// Кемерово: КемТИПП, 2010. -294 с.
- 197. Руднев, С.Д.** Теоретическая оценка энергии связи в биологических структурах [Текст] / С.Д. Руднев // Техника и технология пищевых производств. 2010. № 2. С. 56 - 59.
- 198. Руднев, С.Д.** Термодинамический подход к определению прочности взаимодействия биологических дисперсных структур [Текст] / С.Д. Руднев, О.С. Карнадуд // Хранение и переработка сельхозсырья. 2009. №4. С.12-15.
- 199. Руднев, С.Д.** Установка селективного виброизмельчения с пневморазделением [Текст] / С.Д. Руднев, А.М. Попов, Д.В. Клеников // Известия вузов. Пищевая технология, №5-6, 2009. С. 72-73.
- 200. Рудобашта, С.П.** Массопроводность при сушке коллоидных капиллярно-пористых материалов [Текст] / С.П. Рудобашта, Г.А. Зуева, В.М. Дмитриев, Н.А. Зуев //Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2014. – Т. 57. – № 1. – С. 103-107.
- 201. Рудобашта, С.П.** Математическое моделирование процесса сушки дисперсных материалов [Текст] / С.П. Рудобашта // Известия Академии наук. Энергетика. 2000. № 4. С. 98-109.

- 202. Рудобашта, С.П.** Фундаментальные исследования тепломассообмена при сушке [Текст] / С.П. Рудобашта // Труды второй Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2005»: тез. докл. - М., 2005. Т.2. С. 7-17.
- 203. Рудобашта, С. П.** Массопроводность семян рапса при сушке [Текст] / С.П. Рудобашта, А.В. Моряков, В.М. Дмитриев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2012. – № 8. – С. 42-46.
- 204. Рущиц, А.А.** Повышение пищевой ценности мучных блюд с использованием растительного сырья / Рущиц А.А. // Вестник ЮУрГУ. Научный журнал. Серия: ПИЩЕВЫЕ И BIOTEХНОЛОГИИ. 2013. Т. 1. № 2. С. 10-13.
- 205. Семенов, Г.В.** Сушка сырья: мясо, рыба, овощи, фрукты, молоко: Учеб. Пособие. / Г.В. Семенов, Г.И. Касьянов // – Ростов на Дону: МарТ, 2002. – 112с.
- 206. Семенов, Г.В.** Тепломассообмен в процессах низкотемпературного вакуумного обезвоживания термолабильных материалов и его аппаратурное оформление [Текст]: дис. ... доктора техн. наук : 05.18.12 / Семенов Геннадий Вячеславович. Москва, 2003. -484с.
- 207. Судакова, Н.В.** Возможность использования растительных экстрактов для обогащения пищевых продуктов [Текст] / Судакова Н.В., Оботурова Н.П.// Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова. 2013. № 1. С. 156-159.
- 208. Тарасенко, Н.А.** Разработка рецептуры вафельных хлебцев с использованием нетрадиционных источников белка растительного происхождения [Текст] / Тарасенко Н.А., Красина И.Б., Кожина А.С.// Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2014. № 1 (337). С. 27-29.
- 209. Тенешев, Е.И.** Исследование факторов, формирующих качество и функциональную направленность специализированных продуктов на примере

биологически активных добавок [Текст] : диссертация ... кандидата техн. наук : 05.18.15 / Тенешев Евгений Игоревич.- М. : КемТИПП, 2013. - 171 с.

210. Типсина, Н.Н. Использование порошка моркови в пищевой промышленности [Текст] / Типсина Н.Н., Типсин Е.А. // Вестник КрасГАУ. Научный журнал. 2014. № 4. С. 257-261.

211. Типсина, Н.Н. Использование порошка облепихи в производстве кондитерских изделий [Текст] / Типсина Н.Н., Матюшев В.В., Присухина Н.В., Царёва Е.А.// Вестник КрасГАУ. Научный журнал. 2013. № 5. С. 223-228.

212. Титова, Л.М. Влияние основных факторов на интенсивность процесса сушки пищевых волокон [Текст] / Л.М. Титова, Ю.А. Максименко, А.В. Ревина// Вестник АГТУ. Научный журнал. Астрахань: АГТУ, 2007. № 6 (41). С. 132-133.

213. Титова, Л.М. Влияние основных факторов на интенсивность сушки пищевых волокон [Текст] / Л.М. Титова, А.В. Ревина, Ю.А. Максименко // Вестник АГТУ. - №6 (41). - 2007. - С. 132-133

214. Титова, Л.М. Разработка и научное обоснование способа сушки пищевых волокон [Текст] : диссертация ... кандидата технических наук : 05.18.12 / Титова Любовь Михайловна; [Место защиты: Воронеж. гос. технол. акад.]. Астрахань, 2009. -177 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/2569.

215. Татарченко, И.А. Разработка новых видов чайной и кофейной продукции и совершенствование оценки их качества [Текст] : диссертация ... кандидата технических наук : 05.18.05.- Краснодар, 2015.- 200 с.

216. Татарченко, И.А. Изменение химического состава чайного листа при производстве зеленого и черного чая [Текст] / И.А. Татарченко, Р.С. Решетова // Пищевая промышленность. 2014. №6. С.13-15.

217. Филоненко, Г.К. Сушка пищевых растительных материалов [Текст] / Г.К. Филоненко и др. – М.: Пищевая промышленность, 1971. – 439 с.

218. Хайбулов, Р.А. Исследование теплофизических и массообменных параметров вакуумной пеносушки экстракта корня солодки при

инфракрасном энергоподводе [Текст] : диссертация ... кандидата технических наук : 01.04.14.- Астрахань, 2006.- 134 с.: ил. РГБ ОД, 61 07-5/1355.

219. Хайбулов, Р.А. Теплофизические характеристики пектина [Текст] / Р.А. Хайбулов, О.А. Петровичев, Ю.А. Максименко, Е.Д. Кромский // Вестник АГТУ. 2006. № 6. С. 150-153.

220. Харенко, Е.Н. Исследование статики процесса сушки овариальной жидкости рыб осетровых пород для совершенствования технологии икорного золя [Текст] / Е.Н. Харенко, Ю.А. Максименко, С.А. Терешонков, Е.А. Дмитриева // Вестник АГТУ. Научный журнал. Серия «Рыбное хозяйство». 2012. №2 (Ноябрь). Астрахань: АГТУ, 2012. С. 178 – 181.

221. Чугунова, О.В. Использование растительного сырья при разработке продуктов с заданными свойствами [Текст] / О.В. Чугунова // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2011. № 5. С. 53-59.

222. Чугунова, О.В. Теоретические и практические аспекты применения растительных порошков для производства продуктов с заданными потребительскими свойствами [Текст] / О.В. Чугунова // М-во образования и науки РФ, Урал. гос. экон. ун-т. Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. экон. ун-та, 2011. – 148 с.

223. Шевцов, А.А. Исследование гранулометрического состава свекловичного жома, высушенного в активном гидродинамическом режиме [Текст] / А. А. Шевцов, А.В. Дранников, А. А. Дерканосова, В. П. Ясневская // Материалы 111 межд. науч.- технич. конф. «Инновационные технологии и оборудование для пищевой промышленности (приоритеты развития)». Воронеж : ВГТА, 2009. Т. 2. -195с.

224. Шевцов, А.А. К решению краевой задачи теплопроводности гранулы с пленкой раствора на ее поверхности в процессе распылительной сушки [Текст] / А.А. Шевцов, Д.С. Сайко, А.В. Дранников, Н.В. Шатунова / V Теоретические основы химической технологии. 2013. Том 47. № 2. С. 630-633.

225. Шевцов, А.А. Развитие научных основ энергосбережения в процессах сушки пищевого растительного сырья: Теория, техника, способы

производства и управления [Текст] : автореферат дис. ... доктора техн. наук : 05.18.12 / Шевцов Александр Анатольевич. Воронеж, 1999. -40 с.

226. Шевцов, А.А. Разработка технологии импортозамещающего кормового сырья на основе сухих яблочных выжимок [Текст] / А.А. Шевцов, А.В. Дранников, Е.В. Костина, Е.Ю. Стороженко // Кормопроизводство. 2012. № 1. С. 42-44.

227. Шевцов, С.А. Научное обеспечение энергосберегающих процессов сушки и тепловлажностной обработки пищевого растительного сырья при переменном теплоподводе [Текст]: дисс. ... докт. техн. наук: 05.18.12 / Шевцов Сергей Александрович. – Воронеж, 2015. – 487 с.

228. Шендеров, Б.А. Чай и кофе - основа для создания функциональных напитков и продуктов питания [Текст] / Б.А. Шендеров, А.Ф. Доронин // Пиво и напитки. 2004. №2. С.94-97.

229. Andersen, R. A. Algal culturing techniques [Text] / R. A. Andersen. Burlington: Academic Press, 2005. -570 p

230. Andersson, V. Beet pulp drying using pressurized superheated steam [Text] / V. Andersson // Int. Sugar J. 1999. V. 101, N. 1207. P. 340 - 344.

231. Basel, L. Superheated solvent drying in a fluidized bed [Text] / L. Basel., E. Gray // Chem. Eng. Progr. 1962. V. 53. N. 6. P. 345 - 351.

232. Borowitzka, M. A. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters [Text] / M. A. Borowitzka / Biotechnology. 1999. V. 70. P. 313-321.

233. Boukadida, N. Two dimensional heat and mass transfer during convective drying of porous media [Text] / N. Boukadida, Ben Nasrallah S. // Drying Technol. 1995. 13. 3. P. 661-694.

234. Chen, X.D. Drying Technologies in Food Processing [Text] / X.D. Chen, Mujumdar A.S // Oxford: Blackwell Publishers, 2008.- 360 p. ISBN: 1405157631 ISBN-13(EAN): 9781405157636.

- 235. Gurta Es Seyhan, F.** Low temperature mushroom (*A. bisporus*) drying with desiccant dehumidifiers [Text] / F. Gurta Es Seyhan, O. Evranuz // *Drying Technology*. 2000. № 18. P. 433 - 445.
- 236. Hepbasli, Arif.** Exergoeconomic analysis of plum drying in a heat pump conveyor dryer [Text] / Arif Hepbasli // *Drying Technology*. 2010. Vol. 28. P. 1385-1395.
- 237. Keey, R. B.** *Drying. Principles and Practice* [Text] / R. B. Keey. Oxford : Pergamon, 1975. - 376 p.
- 238. Konovalov, V. I.** Guest Editorial. Drying R&D needs: basic research in drying of capillary-porous materials [Text] / V.I. Konovalov // *Drying Technology an Intern. Journal*. 2005. Vol. 23, No. 12. P. 2307-2311.
- 239. Lasar, M. E.** Blanching and partial drying of foods with superheated steam [Text] / M. E. Lasar // *Journal of Food Science*. 1972. V. 37. P. 163 - 166.
- 240. Lee, Y. K.** Microalgal mass culture systems and methods: Their limitation and potential [Text] / Y. K. Lee // *Apply Phycology*. 2001. Vol. 13. P. 307-315.
- 241. Maini, S. B.** Physico-chemical characteristic in relation to market quality of apples during storage [Text] / S. B. Maini // *Food Technology*. 1982. № 12. -72p.
- 242. May, B.K.** The importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux period in foodstuffs [Text] / B.K. May, P. Perré // *Journal of Food Eng.* 2002. Vol. 54, № 4. P. 271-282.
- 243. Mersmann, A.** *Thermische Verfahrenstechnik: Grundlagen und Methoden* [Text] / A. Mersmann, M. Kind, J. Stichlmair // Springer, 2005. -664p.

Таблица П.1 –Результаты статистической обработки опытных данных при $T_{прод} = 293 \text{ К}$

$\tau, \text{ с}$	$W_1,$	$W_2,$	$W_3,$	$W, \text{ кг/кг}$	$S_n, \text{ кг/кг}$	$S_w,$	$\Delta W,$	$\varepsilon_w, \%$
<i>Tc.a. = 443 К</i>								
0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,000	0,000	0,000	0,000
1,25	0,74	0,75	0,744	0,745	0,005	0,003	0,012	1,677
2	0,525	0,525	0,51	0,52	0,009	0,005	0,022	4,135
2,5	0,385	0,385	0,382	0,384	0,002	0,001	0,004	1,120
3	0,27	0,278	0,268	0,272	0,005	0,003	0,013	4,830
4	0,173	0,174	0,166	0,171	0,004	0,003	0,011	6,328
4,75	0,134	0,134	0,128	0,132	0,003	0,002	0,009	6,515
5	0,11	0,105	0,11	0,108	0,003	0,002	0,007	6,636
5,75	0,081	0,083	0,079	0,081	0,002	0,001	0,005	6,130
6,5	0,052	0,049	0,05	0,05	0,002	0,001	0,004	7,584
<i>Tc.a. = 463 К</i>								
0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,745	0,755	0,765	0,755	0,010	0,006	0,025	3,288
1,75	0,515	0,52	0,51	0,515	0,005	0,003	0,012	2,410
2,5	0,28	0,28	0,295	0,285	0,009	0,005	0,021	7,544
3,25	0,177	0,17	0,169	0,172	0,004	0,003	0,011	6,292
4	0,13	0,118	0,124	0,124	0,006	0,003	0,015	12,013
4,25	0,113	0,113	0,11	0,112	0,002	0,001	0,004	3,839
4,75	0,081	0,083	0,084	0,083	0,002	0,001	0,004	4,569
5,25	0,052	0,048	0,05	0,05	0,002	0,001	0,005	9,930
5,75	0,036	0,036	0,033	0,035	0,002	0,001	0,004	12,286
<i>Tc.a. = 483 К</i>								
0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,715	0,712	0,718	0,715	0,003	0,002	0,007	1,042
1,5	0,47	0,455	0,44	0,455	0,015	0,009	0,037	8,184
2	0,31	0,31	0,32	0,313	0,006	0,003	0,014	4,579
2,5	0,22	0,225	0,23	0,225	0,005	0,003	0,012	5,517
3,25	0,14	0,148	0,135	0,141	0,007	0,004	0,016	11,546
3,75	0,095	0,09	0,09	0,092	0,003	0,002	0,007	7,790
4	0,081	0,084	0,081	0,082	0,002	0,001	0,004	5,244
4,5	0,052	0,049	0,05	0,05	0,002	0,001	0,004	7,584
5	0,032	0,034	0,033	0,033	0,001	0,001	0,002	7,523

$W_1, W_2,$ и W_3 –влажности, определенные при соответственно трех повторениях опыта, кг/кг;
 W – среднее значение влажности, кг/кг; S_n – среднее квадратичное отклонение при определении W , кг/кг; S_w – среднее квадратичное отклонение среднего при определении W ;
 ΔW – погрешность результатов, кг/кг; ε_w – относительная погрешность.

Таблица П.2 –Результаты статистической обработки опытных данных при $T_{\text{прод}} = 308 \text{ K}$

τ, c	$W_1,$	$W_2,$	$W_3,$	$W, \text{кг/кг}$	$S_n, \text{кг/кг}$	$S_w,$	$\Delta W,$	$\varepsilon_w, \%$
<i>Tc.a. = 443 K</i>								
0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,752	0,762	0,744	0,752	0,009	0,005	0,022	2,977
1,5	0,525	0,531	0,51	0,522	0,011	0,006	0,027	5,144
2	0,382	0,381	0,383	0,382	0,001	0,001	0,002	0,650
2,5	0,27	0,293	0,291	0,285	0,013	0,007	0,032	11,099
3,25	0,184	0,181	0,178	0,181	0,003	0,002	0,007	4,115
3,75	0,138	0,138	0,139	0,138	0,001	0,000	0,001	1,039
4	0,104	0,108	0,101	0,104	0,004	0,002	0,009	8,383
4,5	0,081	0,082	0,077	0,08	0,003	0,002	0,007	8,210
5	0,052	0,05	0,049	0,05	0,002	0,001	0,004	7,584
6,25	0,044	0,045	0,047	0,045	0,002	0,001	0,004	8,427
<i>Tc.a. = 463 K</i>								
0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,000	0,000	0,000	0,000
0,75	0,755	0,76	0,76	0,758	0,003	0,002	0,007	0,945
1,25	0,501	0,51	0,503	0,505	0,005	0,003	0,012	2,323
2	0,296	0,289	0,285	0,29	0,006	0,003	0,014	4,766
2,75	0,158	0,162	0,166	0,162	0,004	0,002	0,010	6,130
3,5	0,124	0,121	0,119	0,121	0,003	0,001	0,006	5,163
3,75	0,107	0,1	0,107	0,105	0,004	0,002	0,010	9,556
4,25	0,072	0,07	0,076	0,073	0,003	0,002	0,008	10,390
4,75	0,052	0,048	0,05	0,05	0,002	0,001	0,005	9,930
5,25	0,034	0,036	0,035	0,035	0,001	0,001	0,002	7,093
<i>Tc.a. = 483 K</i>								
0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,000	0,000	0,000	0,000
0,5	0,766	0,751	0,751	0,756	0,009	0,005	0,022	2,844
1	0,48	0,47	0,469	0,473	0,006	0,004	0,015	3,193
1,5	0,304	0,312	0,32	0,312	0,008	0,005	0,020	6,366
2	0,212	0,201	0,223	0,212	0,011	0,006	0,027	12,881
2,75	0,141	0,144	0,142	0,142	0,002	0,001	0,004	2,671
3,25	0,085	0,08	0,084	0,083	0,003	0,002	0,007	7,914
3,5	0,071	0,071	0,074	0,072	0,002	0,001	0,004	5,972
4	0,052	0,049	0,05	0,05	0,002	0,001	0,004	7,584
4,5	0,036	0,035	0,033	0,035	0,002	0,001	0,004	10,835

$W_1, W_2,$ и W_3 –влажности, определенные при соответственно трех повторениях опыта, кг/кг;

W – среднее значение влажности, кг/кг; S_n – среднее квадратичное отклонение при определении W , кг/кг; S_w – среднее квадратичное отклонение среднего при определении W ;

ΔW – погрешность результатов, кг/кг; ε_w – относительная погрешность.

Таблица П.3 –Результаты статистической обработки опытных данных при $T_{прод} = 323 \text{ К}$

$\tau, \text{ с}$	$W_1,$	$W_2,$	$W_3,$	$W, \text{ кг/кг}$	$S_n, \text{ кг/кг}$	$S_w,$	$\Delta W,$	$\varepsilon_w, \%$
<i>Tc.a. = 443 К</i>								
0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,751	0,761	0,744	0,752	0,009	0,005	0,021	2,821
1,75	0,501	0,503	0,513	0,506	0,006	0,004	0,016	3,154
2,25	0,374	0,378	0,363	0,372	0,008	0,004	0,019	5,184
2,75	0,28	0,269	0,264	0,271	0,008	0,005	0,020	7,499
3,75	0,183	0,189	0,176	0,183	0,007	0,004	0,016	8,827
4,5	0,131	0,133	0,136	0,133	0,003	0,001	0,006	4,698
4,75	0,111	0,114	0,111	0,112	0,002	0,001	0,004	3,839
5,5	0,081	0,083	0,079	0,081	0,002	0,001	0,005	6,130
6,25	0,052	0,049	0,049	0,05	0,002	0,001	0,004	8,600
6,5	0,038	0,041	0,042	0,04	0,002	0,001	0,005	12,920
<i>Tc.a. = 463 К</i>								
0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,000	0,000	0,000	0,000
0,75	0,755	0,754	0,765	0,758	0,006	0,004	0,015	1,992
1,5	0,515	0,501	0,519	0,512	0,009	0,005	0,023	4,583
2,25	0,29	0,271	0,285	0,282	0,010	0,006	0,024	8,671
3	0,179	0,171	0,168	0,173	0,006	0,003	0,014	8,160
3,75	0,125	0,116	0,122	0,121	0,005	0,003	0,011	9,402
4	0,107	0,1	0,104	0,104	0,004	0,002	0,009	8,383
4,5	0,071	0,071	0,073	0,072	0,001	0,001	0,003	3,981
5	0,052	0,048	0,05	0,05	0,002	0,001	0,005	9,930
5,5	0,038	0,036	0,038	0,037	0,001	0,001	0,003	7,748
<i>Tc.a. = 483 К</i>								
0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,000	0,000	0,000	0,000
0,75	0,731	0,736	0,731	0,733	0,003	0,002	0,007	0,978
1,25	0,468	0,475	0,458	0,467	0,009	0,005	0,021	4,542
1,75	0,325	0,319	0,316	0,32	0,005	0,003	0,011	3,555
2,25	0,2	0,216	0,22	0,212	0,011	0,006	0,026	12,393
3	0,133	0,137	0,13	0,133	0,004	0,002	0,009	6,555
3,5	0,083	0,084	0,08	0,082	0,002	0,001	0,005	6,302
3,75	0,074	0,068	0,071	0,071	0,003	0,002	0,007	10,490
4,25	0,052	0,049	0,05	0,05	0,002	0,001	0,004	7,584
4,75	0,035	0,035	0,034	0,035	0,001	0,000	0,001	4,095

$W_1, W_2,$ и W_3 –влажности, определенные при соответственно трех повторениях опыта, кг/кг;

W – среднее значение влажности, кг/кг; S_n – среднее квадратичное отклонение при определении W , кг/кг; S_w – среднее квадратичное отклонение среднего при определении W ;

ΔW – погрешность результатов, кг/кг; ε_w – относительная погрешность.

Таблица П.4 – Значения эмпирических коэффициентов функциональных зависимостей времени и скорости процесса сушки

Фактор Коэффициент	$T_{c.a.} = 443K$	$T_{c.a.} = 473K$	$T_{c.a.} = 503K$
$T_{prod} = 293K$			
a_k, c	28,2575	19,0972	13,8744
b_k, c	-83,9138	-60,7365	-46,2489
c_k, c	82,2153	61,8675	48,7725
d_k, c	-35,6375	-27,7338	-22,743
e_k, c	8,1233	6,5978	5,5817
$T_{prod} = 308K$			
a_k, c	32,2057	24,8142	23,8409
b_k, c	-84,8846	-70,6508	-62,7737
c_k, c	78,8709	68,3177	58,098
d_k, c	-34,057	-29,1082	-24,4814
e_k, c	37,5264	6,0977	5,1056
$T_{prod} = 323K$			
a_k, c	18,556	30,7846	27,1428
b_k, c	-61,8342	-80,6365	-70,7723
c_k, c	66,5733	72,7604	63,5648
d_k, c	-31,8712	-29,6931	-25,6468
e_k, c	7,6667	6,3826	5,3914

«ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ»

ИнТехПрод

Общество с ограниченной ответственностью «Инновационные технологии продуктов питания»
 ИНН: 3023000122, КПП: 302301001, ОГРН: 1103023000464, ОКПО: 66690437
 Юридический адрес: 414015, г. Астрахань, переулок Бакинский, д. 52.
 р/с р/с 40702810917130000121, Астраханский РФ ОАО «Россельхозбанк»,
 к/с 30101810400000000757, БИК 041203757. Тел.: 8(8512)480477

УТВЕРЖДАЮ

 / Абубекерова Л.И.

« 15 » 2019г.

М. П.



АКТ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ

Настоящим актом подтверждаем, что в период с 11 ноября 2019г. по 15 ноября 2019г. на производственно-технической базе цеха по производству пищевой продукции ООО «Инновационные технологии продуктов питания» (ООО «ИнТехПрод»), расположенного по адресу: г. Астрахань, Бакинский пер., 52.

Теличкиным Романом Сергеевичем,

аспирантом кафедры «Технологические машины и оборудование» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Астраханский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «АГТУ»), самостоятельно и в составе рабочих групп, под контролем представителей ООО «Инновационные технологии продуктов питания», проведен комплекс опытных и опытно-промышленных работ и получены образцов концентратов экстракта зеленого чая в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 6079-2012 «Чай растворимый. Технические условия», ГОСТ 32593 —2013 «Чай и чайная продукция», Требованиям ТР ТС 021/2011 (Технический регламент Таможенного союза о безопасности пищевой продукции) и требованиям к растительным экстрактам и сырью по СанПин 2.3.2.1078-01.

Технолог

 / Абубекерова Л.И.

« 15 » 11 2019 г.

Акционерное общество
 “ОРЕЛПРОДУКТ”
 ИНН 5717001550/КПП 775101001
 108810, город Москва, поселение Марушкинское,
 деревня Крёкшино, проезд Терминальный,
 строение 3, этаж 2, комната 64Е
 тел/факс: (48646) 2-58-37, тел. 2-53-20
 КБ «ЛОКО-БАНК» (АО) г. Москва р/с
 40702810600002002000
 к/с 30101810500000000161 БИК 044525161
 e-mail: orelproduct@meatcans.ru

УТВЕРЖДАЮ

Исполнительный директор
 Акционерное общество
 “ОРЕЛПРОДУКТ”

« » /Ю.С. Дуглякова/
 2020г.
 М.П. 

**ПРОТОКОЛ
 анализа образцов сухого экстракта зеленого чая**

Анализ проведен на базе производственной лаборатории АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА
 «ОРЕЛПРОДУКТ»

К анализу приняты образцы сухого экстракта зеленого чая (порошок).

Приготовление экстракта зеленого чая производилось в периодическом режиме, который последовательно включал следующие стадии: экстракция водорастворимых веществ из сырья – зеленого чая, отстаивание, отделение экстракта от осадка методами фильтрации, центрифугирование, смещение экстрактов, концентрирование методом вакуум-выпаривания и распылительная сушка.

При двукратном экстрагировании гидромодуль составлял 10..15 мл/г (1:10..1:15), температура экстракции – 343..363К. Процесс экстракции проводился 60..80 минут на основании рекомендаций. Для экстрагирования использовался реактор УПЭС модели 0,15/3,0 при перемешивании. В ходе экстрагирования достигалась концентрация сухих веществ 2..4% в экстракте зеленого чая (после смешивания экстрактов двух степеней). Экстракт от осадка чая отделяли методами отстаивания, фильтрации и далее экстракт осветляли в процессе отстойного центрифугирования. Температура экстракта после отстаивания при фильтрации и центрифугировании составляла 313..363К, что минимизировало процессы осаждения веществ танино-катехинового комплекса.

Концентрирование экстракта осуществляли в вакуум-выпарном аппарате до содержания сухих веществ 8..12% в экстракте.

Распылительную сушку экстракта осуществляли на установке Ohkawara Kakohki OL/OC-L8. Диапазон температур сушильного агента 443..483 К. Регулировка расхода исходного продукта производилась в диапазоне 1,5 – 2,5 кг/ч, при размере распыленных капель/частиц 20 – 30мкм. Задание начальной температуры продукта осуществлялось в диапазоне 293..318К. Температура воздуха на выходе из сушилки составляла 343..353 К.

В ходе анализа качества опытно-промышленных партий сухого экстракта (таблица 1) зеленого чая использовались следующие методики:

- Влажность определяли согласно требованиям ГОСТ Р ИСО 7513-2012 «Чай растворимый. Метод определения массовой доли влаги (потеря массы при 103°C)»;
- Общую золу определяли согласно требованиям ГОСТ Р ИСО 7514-2012 «Чай растворимый. Метод определения общего содержания золы»;
- Содержание водорастворимых экстрактивных веществ определяли согласно требованиям ГОСТ 28551-90 «Чай. Метод определения водорастворимых экстрактивных веществ»;
- Содержание суммы полифенолов определяли Колориметрическим методом согласно требованиям ГОСТ Р ИСО 14502-1-2010 «Чай. Метод определения общего содержания полифенолов»;

- Содержание кофеина определяли методом Высокоэффективной жидкостной хроматографии согласно требованиям ГОСТ ISO 10727-2013 «Чай и чай растворимый. Определение содержания кофеина»;
- Активную кислотность определяли потенциометрическим методом согласно требованиям ТР ТС 021/2011 (Технический регламент Таможенного союза о безопасности пищевой продукции);
- Содержание микотоксинов и токсичных элементов (тяжелые металлы) определяли согласно требованиям ТР ТС 021/2011 (Технический регламент Таможенного союза о безопасности пищевой продукции).

Таблица 1 – Показатели образцов сухого экстракта зеленого чая

№ п/п	Режим сушки	Масса экстракта, г	Влажность образца, (%)	Зола общая, %	Содержание водорастворимых экстрактивных веществ, %	Содержание суммы полифенолов, не менее, %	Содержание кофеина, %	Активная кислотность, рН	Микотоксины, токсичные элементы (тяжелые металлы), %	Продолжительность растворения в воде, с
1	$T_{prod} = 310 \text{ К}$ $T_{c.a.} = 483 \text{ К}$	500	4,98		$\geq 33\%$		10	5,58	Соответствует НД	30 (при $T = 96^{\circ}\text{C} - 98^{\circ}\text{C}$) 240 (при $T = 18^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$)
2	$T_{prod} = 293 \text{ К}$ $T_{c.a.} = 483 \text{ К}$	500	4,98	≤ 17	37,6	40	8	5,73		
3	$T_{prod} = 323 \text{ К}$ $T_{c.a.} = 483 \text{ К}$	500	4,77		37,6		9	5,78		

Мелкодисперсный порошок от желтого до коричневого цвета. Запах и вкус характерны (метод анализа – органолептический).

Показатели качества сухого экстракта зеленого чая соответствуют требованиям ГОСТ Р ИСО 6079-2012 «Чай растворимый. Технические условия», ГОСТ 32593 —2013 «Чай и чайная продукция», Требованиям ТР ТС 021/2011 (Технический регламент Таможенного союза о безопасности пищевой продукции) и нормативам к растительным экстрактам и сырью по СанПин 2.3.2.1078-01.

АО «ОРЕЛПРОДУКТ»

Заведующий лабораторией

_____/Р.С. Теличкин/
« ____ » _____ 2020 г.

« ____ » _____ 2020г.

**ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР В ОБЪЕМЕ РАСПЫЛЕННОЙ ЧАСТИЦЫ
с использованием метода конечных разностей по неявной схеме**

**ОБЪЕКТ СУШКИ: ВОДНЫЙ ЭКСТРАКТ ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ
СПОСОБ СУШКИ: КОНВЕКТИВНАЯ РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СУШКА (ПРЯМОТОК)**

Единицы измерения - система СИ

Исходные данные:

1. Диаметр распыленной частицы, м

$X_n := 0$ - координата поверхности частицы

$X_k := 20 \cdot 10^{-6}$ - координата поверхности частицы

$d_o := X_k$ - диаметр частицы

2. Начальная концентрация сухих веществ, кг/кг

$C_n := 0.1$

3. Конечная концентрация сухих веществ, кг/кг

$C_k := 0.95$

4. Скорость движения сушильного агента относительно частицы, м/с

$w_v := 0.5$

5. Температура сушильного агента, К

$T := 443 \quad T_{sr} := T$

6. Плотность сушильного агента, кг/м³

$\rho_v := 1.293$

7. Коэффициент теплопроводности сушильного агента, Вт/(м К)

$\lambda_v := 0.031$

8. Динамическая вязкость сушильного агента, м²/с

$\mu_v := 17.3 \cdot 10^{-6}$

9. Давление в сушильной камере, Па

$P_v := 101308.0$

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ:

Единицы измерения результатов расчета - система СИ

10. Коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции:

$$\alpha := 0.123 \cdot \left(\rho_v \cdot \frac{w_v \cdot d_o}{\mu_v} \right)^{0.83} \cdot \frac{\lambda_v}{d_o}$$

ξ - текущая концентрация сухих веществ

11. Плотность для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$\rho(\xi) := \frac{1}{1.412743 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - \xi) + 8.605289 \cdot 10^{-4}}$$

12. Коэффициент теплопроводности для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$\lambda(\zeta, t) := \left(-0.000087243 \cdot t^2 + 0.052802255 \cdot t - 7.628106333 \right) (1 - \zeta)^2 \dots \\ + \left(0.000081831 \cdot t^2 - 0.049191338 \cdot t + 7.522461906 \right) (1 - \zeta) \dots \\ + \left(-0.00000149 \cdot t^2 + 0.00134994 \cdot t - 0.17243941 \right)$$

13. Массовая теплоемкость для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$cm(\zeta) := 2220 \cdot (1 - \zeta) + 1962$$

14. Объемная теплоемкость для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$cr(\zeta) := \rho(\zeta) \cdot cm(\zeta)$$

15. Коэффициент температуропроводности для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

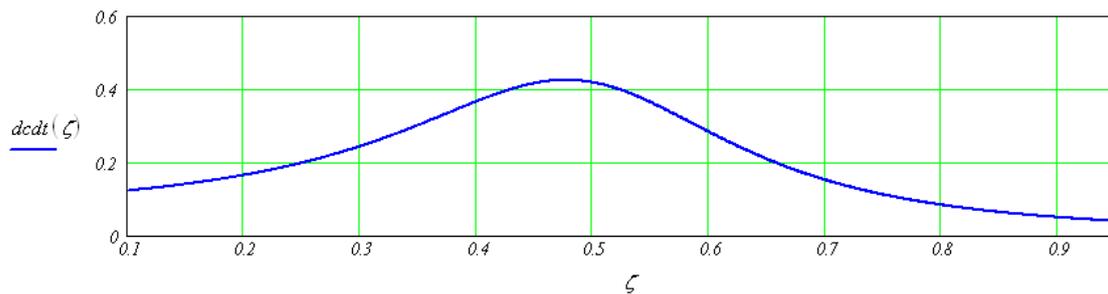
$$\alpha'(\zeta, t) := \frac{\lambda(\zeta, t)}{cr(\zeta)}$$

16. Кинетические коэффициенты зависимости скорости сушки (см. глава 3):

$$Ak := -0.019838 \quad Bk := 18.584658 \quad Ck := -4321.259832 \quad Dk := 0.035833125 \quad Ek := -33.40492625 \\ Fk := 7704.3331806249 \quad Gk := -0.019228375 \quad Hk := 17.73026275 \quad Kk := -4014.383732875 \quad Lk := 0.00233525 \\ Mk := -2.0068315 \quad Nk := 398.86467725$$

17. Зависимость скорости сушки

$$dcdt(\zeta) := \frac{-1}{\left[4 \cdot (Ak \cdot T^2 + Bk \cdot T + Ck) \cdot (1 - \zeta)^3 + 3 \cdot (Dk \cdot T^2 + Ek \cdot T + Fk) \cdot (1 - \zeta)^2 \dots \right. \\ \left. + 2 \cdot (Gk \cdot T^2 + Hk \cdot T + Kk) \cdot (1 - \zeta) + (Lk \cdot T^2 + Mk \cdot T + Nk) \right]}$$



18. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход для свободной влаги:

$$r1(\zeta, t) := 3118.4581 \cdot 10^3 - 2286.66 \cdot t$$

19. Эмпирические коэффициенты (см. глава 2):

$$a := -0.03270865 \quad b := -15.01564355 \quad c := 0.01667245 \quad d := 9.27305315 \\ e := 0.0000074 \quad f := 0.7656988 \quad g := -0.000002925 \quad h := 0.004748025$$

20. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом в гигроскопической области:

$$R := 8.314 \quad \text{- универсальная газовая постоянная}$$

$$r2(\zeta, t) := r1(\zeta, t) - 55.55555 \cdot \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right] \dots \\ + 55.55555 \cdot \left[-t \cdot \frac{d}{dt} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right] \right]$$

21. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом:

$$Wg := 0.4 \quad \text{- гигроскопическая влажность}$$

$$Cg := 1 - Wg \quad Cg = 0.60000$$

$$r(\zeta, t) := \text{if}(\zeta < Cg, r1(\zeta, t), r2(\zeta, t))$$

22. Термоградиентный коэффициент

$$D'(\zeta, t) := \frac{d}{dt} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right]$$

$$K(\zeta, t) := \frac{d}{d\zeta} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right]$$

$$\delta(\zeta, t) := D'(\zeta, t) \cdot K(\zeta, t)$$

23. Решение методом конечных разностей уравнения теплопереноса:

$$A(\zeta, t) := \frac{k' a'(\zeta, t)}{dc dt(\zeta)} \quad B(\zeta, t) := 0 \quad D(\zeta, t) := \left(\frac{-\rho(\zeta) r(\zeta, t)}{k'' cr(\zeta)} \right)$$

Число узлов сетки по концентрации и радиусу частицы

$$Nc := 10 \quad Nk := 10 \quad i := 0, 1..Nk \quad k := 0, 1..Nc$$

Значение шага сетки по концентрации и радиусу частицы

$$\tau := \frac{C_k - C_n}{Nc} \quad h := \frac{X_k - X_n}{Nk} \quad x_i := X_n + ih \quad cc_k := C_n + k \cdot \tau$$

$$z := \left[\begin{array}{l} \text{for } k \in 0, 1..Nc \\ \left| \begin{array}{l} P_{0,k} \leftarrow 0 \\ q_{0,k} \leftarrow 0 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

$$\left| \begin{array}{l} \psi_k \leftarrow 0 \end{array} \right.$$

$$\left| \begin{array}{l} \psi_{2k} \leftarrow 0 \end{array} \right.$$

for i ∈ 0, 1.. Nk

$$\left| \begin{array}{l} Y_{i,0} \leftarrow 323 \end{array} \right.$$

$$\left| \begin{array}{l} P_{i,0} \leftarrow 0 \end{array} \right.$$

$$\left| \begin{array}{l} q_{i,0} \leftarrow 0 \end{array} \right.$$

for k ∈ 0, 1.. Nc - 1

$$\left| \begin{array}{l} pom \leftarrow \alpha \cdot \left(\frac{T_{sr} - Y_{0,k}}{T_{sr}} \right)^{0.25} \cdot (T_{sr} - Y_{0,k}) \end{array} \right.$$

$$\left| \begin{array}{l} \psi_{k+1} \leftarrow pom \end{array} \right.$$

$$\left| \begin{array}{l} \psi_{2k+1} \leftarrow pom \end{array} \right.$$

for i ∈ 0, 1.. Nk

$$\left| \begin{array}{l} AA_{i,k+1} \leftarrow -\frac{\tau}{2 \cdot h} \cdot \frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h} \end{array} \right.$$

$$\left| \begin{array}{l} BB_{i,k+1} \leftarrow \left(\frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h^2} + \frac{B(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{2} \right) \cdot \tau + 1 \end{array} \right.$$

$$\left| \begin{array}{l} CC_{i,k+1} \leftarrow AA_{i,k+1} \end{array} \right.$$

$$\left| \begin{array}{l} DDp1 \leftarrow \text{if} \left(i < Nk, Y_{i+1,k}, Y_{Nk,k} + \frac{h}{\lambda(cc_{k+1}, Y_{Nk,k})} \cdot \psi_{2k+1} \right) \end{array} \right.$$

$$DDp \leftarrow \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot \text{if} \left(\begin{array}{l} i > 0, Y_{i-1,k}, Y_{0,k} \dots \\ + \frac{h}{\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k})} \cdot \psi_{k+1} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} B(cc_k, Y_{i,k}) \dots \\ + 2 \cdot \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \end{array} \right) \cdot Y_{i,k} \dots$$

$$+ \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot DDp1$$

$$DDi_{i,k+1} \leftarrow Y_{i,k} + \frac{\tau}{2} \cdot (D(cc_{k+1}, Y_{i,k}) + D(cc_k, Y_{i,k}) + DDp)$$

$$P_{0,k+1} \leftarrow \frac{AA_{0,k+1} + CC_{0,k+1}}{BB_{0,k+1}}$$

$$q_{0,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot AA_{0,k+1} \cdot \psi_{k+1} + DD_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}{BB_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}$$

for $i \in 1, 2 \dots N_x - 1$

$$P_{i,k+1} \leftarrow \frac{-CC_{i,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

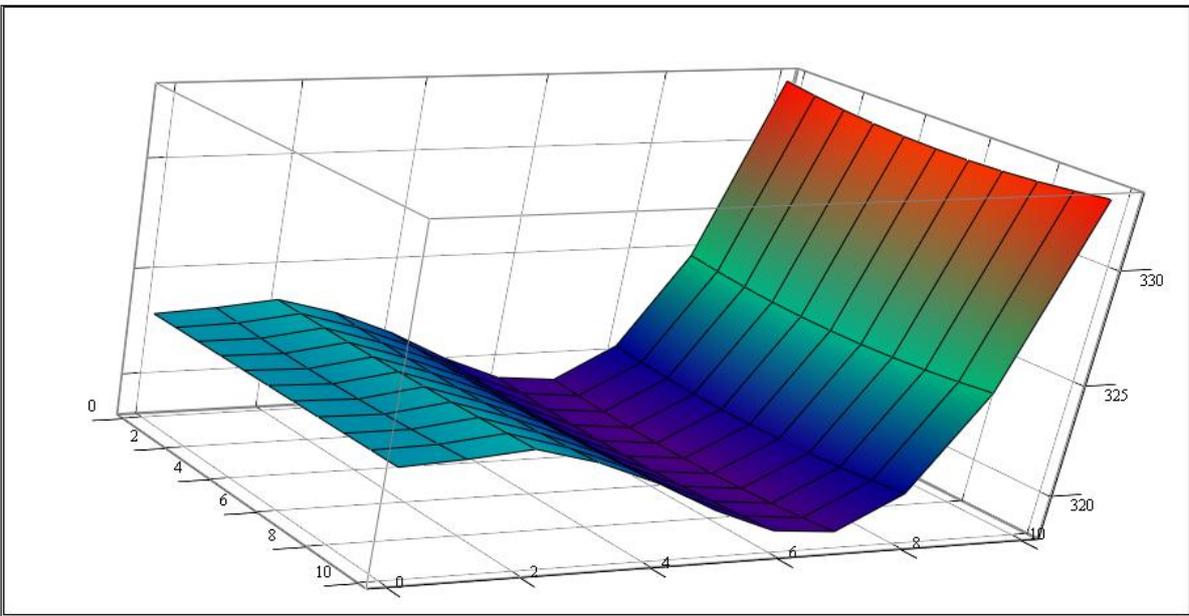
$$q_{i,k+1} \leftarrow \frac{DD_{i,k+1} - AA_{i,k+1} \cdot q_{i-1,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

$$Y_{N_x,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot CC_{N_x,k+1} \cdot \psi_{2k+1} - \lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k}) \cdot [DD_{N_x,k+1} - q_{N_x-1,k+1} \cdot (AA_{N_x,k+1} + CC_{N_x,k+1})]}{-\lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k}) \cdot [BB_{N_x,k+1} + P_{N_x-1,k+1} \cdot (AA_{N_x,k+1} + CC_{N_x,k+1})]}$$

for $i \in N_x - 1, N_x - 2 \dots 0$

$$Y_{i,k+1} \leftarrow P_{i,k+1} \cdot Y_{i+1,k+1} + q_{i,k+1}$$

24. Температурное поле по концентрации сухих веществ и радиусу продукта:



**ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР В ОБЪЕМЕ РАСПЫЛЕННОЙ ЧАСТИЦЫ
с использованием метода конечных разностей по неявной схеме
ОБЪЕКТ СУШКИ: ВОДНЫЙ ЭКСТРАКТ ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ
СПОСОБ СУШКИ: КОНВЕКТИВНАЯ РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СУШКА (ПРЯМОТОК)
Единицы измерения - система СИ**

Исходные данные:

1. Диаметр распыленной частицы, м

$X_n := 0$ - координата поверхности частицы

$X_k := 20 \cdot 10^{-6}$ - координата поверхности частицы

$d_\varnothing := X_k$ - диаметр частицы

2. Начальная концентрация сухих веществ, кг/кг

$C_n := 0.1$

3. Конечная концентрация сухих веществ, кг/кг

$C_k := 0.95$

4. Скорость движения сушильного агента относительно частицы, м/с

$w_v := 0.5$

5. Температура сушильного агента, К

$T := 483$ $T_{sr} := T$

6. Плотность сушильного агента, кг/м³

$\rho_v := 1.293$

7. Коэффициент теплопроводности сушильного агента, Вт/(м К)

$\lambda_v := 0.031$

8. Динамическая вязкость сушильного агента, м²/с

$\mu_v := 17.3 \cdot 10^{-6}$

9. Давление в сушильной камере, Па

$P_v := 101308.0$

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ:

Единицы измерения результатов расчета - система СИ

10. Коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции:

$$\alpha := 0.123 \cdot \left(\rho_v \cdot \frac{w_v \cdot d_\varnothing}{\mu_v} \right)^{0.83} \cdot \frac{\lambda_v}{d_\varnothing}$$

ζ - текущая концентрация сухих веществ

11. Плотность для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$\rho(\zeta) := \frac{1}{1.412743 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - \zeta) + 8.605289 \cdot 10^{-4}}$$

12. Коэффициент теплопроводности для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$\lambda(\zeta, t) := \left(-0.000087243 \cdot t^2 + 0.052802255 \cdot t - 7.628106333 \right) (1 - \zeta)^2 \dots \\ + \left(0.000081831 \cdot t^2 - 0.049191338 \cdot t + 7.522461906 \right) (1 - \zeta) \dots \\ + \left(-0.00000149 \cdot t^2 + 0.00134994 \cdot t - 0.17243941 \right)$$

13. Массовая теплоемкость для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$cm(\zeta) := 2220 \cdot (1 - \zeta) + 1962$$

14. Объемная теплоемкость для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$cr(\zeta) := \rho(\zeta) \cdot cm(\zeta)$$

15. Коэффициент температуропроводности для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$a'(\zeta, t) := \frac{\lambda(\zeta, t)}{cr(\zeta)}$$

16. Кинетические коэффициенты зависимости скорости сушки (см. глава 3):

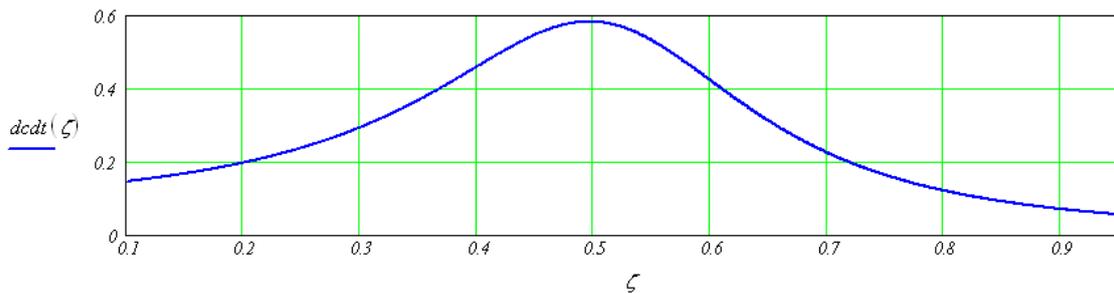
$$Ak := 0.004921875 \quad Bk := -4.91723375 \quad Ck := 1240.679004375 \quad Dk := -0.010862125 \quad Ek := 10.99995025$$

$$Fk := -2825.210591625 \quad Gk := 0.009066 \quad Hk := -9.231186 \quad Kk := 2392.437264 \quad Lk := -0.003641125$$

$$Mk := 3.69404425 \quad Nk := -957.531962625$$

17. Зависимость скорости сушки

$$dc/dt(\zeta) := \frac{-1}{4 \cdot (Ak \cdot T^2 + Bk \cdot T + Ck) \cdot (1 - \zeta)^3 + 3 \cdot (Dk \cdot T^2 + Ek \cdot T + Fk) \cdot (1 - \zeta)^2 \dots \\ + 2 \cdot (Gk \cdot T^2 + Hk \cdot T + Kk) \cdot (1 - \zeta) + (Lk \cdot T^2 + Mk \cdot T + Nk)}$$



18. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход для свободной влаги:

$$r1(\zeta, t) := 3118.4581 \cdot 10^3 - 2286.66 \cdot t$$

19. Эмпирические коэффициенты (см. глава 2):

$$a := -0.03270865 \quad b := -15.01564355 \quad c := 0.01667245 \quad d := 9.27305315$$

$$e := 0.0000074 \quad f := 0.7656988 \quad g := -0.000002925 \quad h := 0.004748025$$

20. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом в гигроскопической области:

$$R := 8.314 \quad \text{- универсальная газовая постоянная}$$

$$r2(\zeta, t) := r1(\zeta, t) - 55.55555 \cdot \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right] \dots \\ + 55.55555 \cdot \left[-t \cdot \frac{d}{dt} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right] \right]$$

21. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом:

$$Wg := 0.4 \quad \text{- гигроскопическая влажность}$$

$$Cg := 1 - Wg \quad Cg = 0.60000$$

$$r(\zeta, t) := \text{if}(\zeta < Cg, r1(\zeta, t), r2(\zeta, t))$$

22. Термодинамический коэффициент

$$D'(\zeta, t) := \frac{d}{dt} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right]$$

$$K(\zeta, t) := \frac{d}{d\zeta} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right]$$

$$\delta(\zeta, t) := D'(\zeta, t) \cdot K(\zeta, t)$$

23. Решение методом конечных разностей уравнения теплопереноса:

$$A(\zeta, t) := \frac{k' a'(\zeta, t)}{d \cdot c \cdot d t(\zeta)} \quad B(\zeta, t) := 0 \quad D(\zeta, t) := \left(\frac{-\rho(\zeta) r(\zeta, t)}{k' c r(\zeta)} \right)$$

Число узлов сетки по концентрации и радиусу частицы

$$Nc := 10 \quad Nx := 10 \quad i := 0, 1..Nx \quad k := 0, 1..Nc$$

Значение шага сетки по концентрации и радиусу частицы

$$\tau := \frac{C_k - C_n}{Nc} \quad h := \frac{X_k - X_n}{Nx} \quad x_i := X_n + i \cdot h \quad cc_k := C_n + k \cdot \tau$$

$$z := \left[\begin{array}{l} \text{for } k \in 0, 1..Nc \\ \left| \begin{array}{l} P_{0,k} \leftarrow 0 \\ q_{0,k} \leftarrow 0 \end{array} \right. \end{array} \right]$$

```

|
|   ψk ← 0
|   ψ2k ← 0
| for i ∈ 0, 1..Nx
|   Yi,0 ← 293
|   Pi,0 ← 0
|   qi,0 ← 0
| for k ∈ 0, 1..Nc - 1
|   pom ← α · ⎛⎜  $\frac{T_{sr} - Y_{0,k}}{T_{sr}}$  ⎞⎟0.25 · (Tsr - Y0,k)
|   ψk+1 ← pom
|   ψ2k+1 ← pom
|   for i ∈ 0, 1..Nx
|     AAi,k+1 ←  $-\frac{\tau}{2 \cdot h} \cdot \frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h}$ 
|     BBi,k+1 ←  $\left( \frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h^2} + \frac{B(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{2} \right) \cdot \tau + 1$ 
|     CCi,k+1 ← AAi,k+1
|     DDp1 ← if ( i < Nx, Yi+1,k, YNx,k +  $\frac{h}{\lambda(cc_{k+1}, Y_{Nx,k})} \cdot \psi_{2k+1}$  )

```

$$DDp \leftarrow \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot \text{if} \left(i > 0, Y_{i-1,k}, Y_{0,k} \dots \right) - \left(\frac{B(cc_k, Y_{i,k}) \dots}{+ 2 \cdot \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2}} \right) \cdot Y_{i,k} \dots$$

$$+ \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot DDp_l$$

$$DD_{i,k+1} \leftarrow Y_{i,k} + \frac{\tau}{2} \cdot (D(cc_{k+1}, Y_{i,k}) + D(cc_k, Y_{i,k}) + DDp)$$

$$P_{0,k+1} \leftarrow \frac{AA_{0,k+1} + CC_{0,k+1}}{BB_{0,k+1}}$$

$$q_{0,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot AA_{0,k+1} \cdot \psi_{k+1} + DD_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}{BB_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}$$

for $i \in 1, 2 \dots N_x - 1$

$$P_{i,k+1} \leftarrow \frac{-CC_{i,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

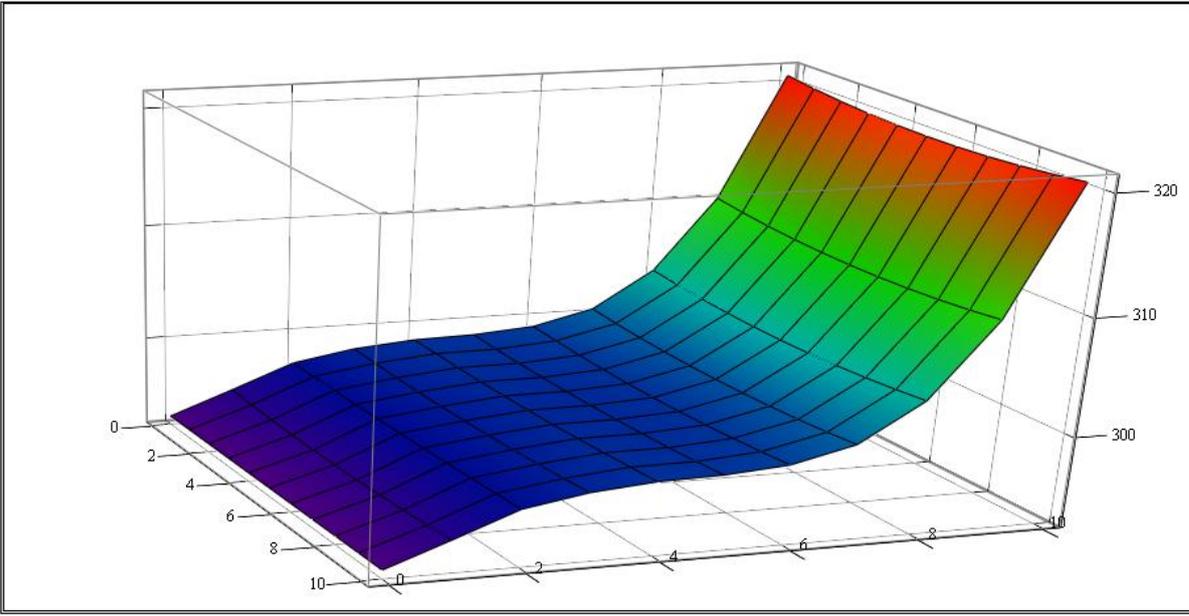
$$q_{i,k+1} \leftarrow \frac{DD_{i,k+1} - AA_{i,k+1} \cdot q_{i-1,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

$$Y_{N_x,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot CC_{N_x,k+1} \cdot \psi_{k+1} - \lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k}) \cdot [DD_{N_x,k+1} - q_{N_x-1,k+1} \cdot (AA_{N_x,k+1} + CC_{N_x,k+1})]}{-\lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k}) \cdot [BB_{N_x,k+1} + P_{N_x-1,k+1} \cdot (AA_{N_x,k+1} + CC_{N_x,k+1})]}$$

for $i \in N_x - 1, N_x - 2 \dots 0$

$$Y_{i,k+1} \leftarrow P_{i,k+1} \cdot Y_{i+1,k+1} + q_{i,k+1}$$

24. Температурное поле по концентрации сухих веществ и радиусу продукта:



**ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР В ОБЪЕМЕ РАСПЫЛЕННОЙ ЧАСТИЦЫ
с использованием метода конечных разностей по неявной схеме**

**ОБЪЕКТ СУШКИ: ВОДНЫЙ ЭКСТРАКТ ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ
СПОСОБ СУШКИ: КОНВЕКТИВНАЯ РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СУШКА (ПРЯМОТОК)
Единицы измерения - система СИ**

Исходные данные:

1. Диаметр распыленной частицы, м

$X_n := 0$ - координата поверхности частицы
 $X_k := 20 \cdot 10^{-6}$ - координата поверхности частицы
 $d_e := X_k$ - диаметр частицы

2. Начальная концентрация сухих веществ, кг/кг

$C_n := 0.1$

3. Конечная концентрация сухих веществ, кг/кг

$C_k := 0.95$

4. Скорость движения сушительного агента относительно частицы, м/с

$w_v := 0.5$

5. Температура сушительного агента, К

$T := 483$ $T_{sr} := T$

6. Плотность сушительного агента, кг/м³

$\rho_v := 1.293$

7. Коэффициент теплопроводности сушительного агента, Вт/(м К)

$\lambda_v := 0.031$

8. Динамическая вязкость сушительного агента, м²/с

$\mu_v := 17.3 \cdot 10^{-6}$

9. Давление в сушительной камере, Па

$P_v := 101308.0$

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ:

Единицы измерения результатов расчета - система СИ

10. Коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции:

$$\alpha := 0.123 \cdot \left(\rho_v \cdot \frac{w_v \cdot d_e}{\mu_v} \right)^{0.83} \cdot \frac{\lambda_v}{d_e}$$

ζ - текущая концентрация сухих веществ

11. Плотность для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$\rho(\zeta) := \frac{1}{1.412743 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - \zeta) + 8.605289 \cdot 10^{-4}}$$

12. Коэффициент теплопроводности для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$\lambda(\zeta, t) := \left(-0.000087243 \cdot t^2 + 0.052802255 \cdot t - 7.628106333 \right) (1 - \zeta)^2 \dots \\ + \left(0.000081831 \cdot t^2 - 0.049191338 \cdot t + 7.522461906 \right) (1 - \zeta) \dots \\ + \left(-0.00000149 \cdot t^2 + 0.00134994 \cdot t - 0.17243941 \right)$$

13. Массовая теплоемкость для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$cm(\zeta) := 2220 \cdot (1 - \zeta) + 1962$$

14. Объемная теплоемкость для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

$$cr(\zeta) := \rho(\zeta) \cdot cm(\zeta)$$

15. Коэффициент температуропроводности для реальных диапазонов концентрации сухих веществ и температуры продукта:

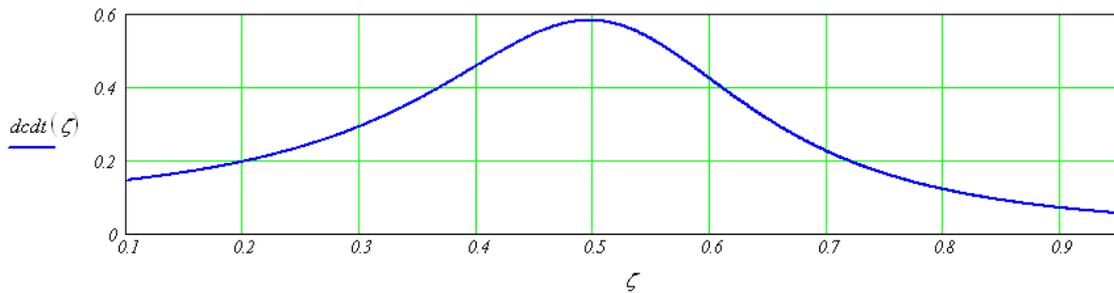
$$a'(\zeta, t) := \frac{\lambda(\zeta, t)}{cr(\zeta)}$$

16. Кинетические коэффициенты зависимости скорости сушки (см. глава 3):

$$Ak := 0.004921875 \quad Bk := -4.91723375 \quad Ck := 1240.679004375 \quad Dk := -0.010862125 \quad Ek := 10.99995025 \\ Fk := -2825.210591625 \quad Gk := 0.009066 \quad Hk := -9.231186 \quad Kk := 2392.437264 \quad Lk := -0.003641125 \\ Mk := 3.69404425 \quad Nk := -957.531962625$$

17. Зависимость скорости сушки

$$dcdt(\zeta) := \frac{-1}{4 \cdot (Ak \cdot T^2 + Bk \cdot T + Ck) \cdot (1 - \zeta)^3 + 3 \cdot (Dk \cdot T^2 + Ek \cdot T + Fk) \cdot (1 - \zeta)^2 \dots \\ + 2 \cdot (Gk \cdot T^2 + Hk \cdot T + Kk) \cdot (1 - \zeta) + (Lk \cdot T^2 + Mk \cdot T + Nk)}$$



18. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход для свободной влаги:

$$r1(\zeta, t) := 3118.4581 \cdot 10^3 - 2286.66 \cdot t$$

19. Эмпирические коэффициенты (см. глава 2):

$$a := -0.03270865 \quad b := -15.01564355 \quad c := 0.01667245 \quad d := 9.27305315 \\ e := 0.00000074 \quad f := 0.7656988 \quad g := -0.000002925 \quad h := 0.004748025$$

20. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом в гигроскопической области:

$R := 8.314$ - универсальная газовая постоянная

$$r2(\zeta, t) := r1(\zeta, t) - 55.55555 \cdot \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right] \dots \\ + 55.55555 \cdot \left[-t \cdot \frac{d}{dt} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right] \right]$$

21. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом:

$Wg := 0.4$ - гигроскопическая влажность

$$C_g := 1 - W_g \quad C_g = 0.60000$$

$$r(\zeta, t) := \text{if}(\zeta < C_g, r1(\zeta, t), r2(\zeta, t))$$

22. ТермоградIENTный коэффициент

$$D'(\zeta, t) := \frac{d}{dt} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right]$$

$$K(\zeta, t) := \frac{d}{d\zeta} \left[R \cdot t \cdot \ln \left[(a \cdot t + b) \cdot (1 - \zeta)^3 + (c \cdot t + d) \cdot (1 - \zeta)^2 + (e \cdot t + f) \cdot (1 - \zeta) + (g \cdot t + h) \right] \right]$$

$$\delta(\zeta, t) := D'(\zeta, t) \cdot K(\zeta, t)$$

23. Решение методом конечных разностей уравнения теплопереноса:

$$A(\zeta, t) := \frac{k' a'(\zeta, t)}{dc dt(\zeta)} \quad B(\zeta, t) := 0 \quad D(\zeta, t) := \left(\frac{-\rho(\zeta) r(\zeta, t)}{k' cr(\zeta)} \right)$$

Число узлов сетки по концентрации и радиусу частицы

$$N_c := 10 \quad N_x := 10 \quad i := 0, 1..N_x \quad k := 0, 1..N_c$$

Значение шага сетки по концентрации и радиусу частицы

$$\tau := \frac{C_k - C_n}{N_c} \quad h := \frac{X_k - X_n}{N_x} \quad x_i := X_n + i \cdot h \quad cc_k := C_n + k \cdot \tau$$

$$z := \left[\begin{array}{l} \text{for } k \in 0, 1..N_c \\ \left| \begin{array}{l} P_{0,k} \leftarrow 0 \\ q_{0,k} \leftarrow 0 \end{array} \right. \end{array} \right]$$

$$\left[\begin{array}{l} \left| \begin{array}{l} \psi_k \leftarrow 0 \\ \psi_{2k} \leftarrow 0 \end{array} \right. \\ \text{for } i \in 0, 1..N_x \\ \left| \begin{array}{l} Y_{i,0} \leftarrow 310 \\ P_{i,0} \leftarrow 0 \\ q_{i,0} \leftarrow 0 \end{array} \right. \\ \text{for } k \in 0, 1..N_c - 1 \\ \left| \begin{array}{l} pom \leftarrow \alpha \cdot \left(\left| \frac{T_{sr} - Y_{0,k}}{T_{sr}} \right| \right)^{0.25} \cdot (T_{sr} - Y_{0,k}) \\ \psi_{k+1} \leftarrow pom \\ \psi_{2k+1} \leftarrow pom \\ \text{for } i \in 0, 1..N_x \\ \left| \begin{array}{l} AA_{i,k+1} \leftarrow -\frac{\tau}{2 \cdot h} \cdot \frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h} \\ BB_{i,k+1} \leftarrow \left(\frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h^2} + \frac{B(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{2} \right) \cdot \tau + 1 \\ CC_{i,k+1} \leftarrow AA_{i,k+1} \\ DDp1 \leftarrow \text{if} \left(i < N_x, Y_{i+1,k}, Y_{N_x,k} + \frac{h}{\lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k})} \cdot \psi_{2k+1} \right) \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right]$$

$$DDp \leftarrow \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot \text{if} \left(i > 0, Y_{i-1,k}, Y_{0,k} \dots \right) - \left(\frac{B(cc_k, Y_{i,k}) \dots}{+ 2 \cdot \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2}} + \frac{h}{\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k})} \cdot \psi_{k+1} \right) \cdot Y_{i,k} \dots$$

$$+ \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot DDp_l$$

$$DD_{i,k+1} \leftarrow Y_{i,k} + \frac{\tau}{2} \cdot (D(cc_{k+1}, Y_{i,k}) + D(cc_k, Y_{i,k}) + DDp)$$

$$P_{0,k+1} \leftarrow - \frac{AA_{0,k+1} + CC_{0,k+1}}{BB_{0,k+1}}$$

$$q_{0,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot AA_{0,k+1} \cdot \psi_{k+1} + DD_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}{BB_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}$$

for $i \in 1, 2 \dots N_x - 1$

$$P_{i,k+1} \leftarrow \frac{-CC_{i,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

$$q_{i,k+1} \leftarrow \frac{DD_{i,k+1} - AA_{i,k+1} \cdot q_{i-1,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

$$Y_{N_x,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot CC_{N_x,k+1} \cdot \psi_{2k+1} - \lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k}) \cdot [DD_{N_x,k+1} - q_{N_x-1,k+1} \cdot (AA_{N_x,k+1} + CC_{N_x,k+1})]}{-\lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k}) \cdot [BB_{N_x,k+1} + P_{N_x-1,k+1} \cdot (AA_{N_x,k+1} + CC_{N_x,k+1})]}$$

for $i \in N_x - 1, N_x - 2 \dots 0$

$$\psi_k \leftarrow 0$$

$$\psi_{2k} \leftarrow 0$$

for $i \in 0, 1 \dots N_x$

$$Y_{i,0} \leftarrow 310$$

$$P_{i,0} \leftarrow 0$$

$$q_{i,0} \leftarrow 0$$

for $k \in 0, 1 \dots N_x - 1$

$$pom \leftarrow \alpha \cdot \left(\left| \frac{T_{sr} - Y_{0,k}}{T_{sr}} \right| \right)^{0.25} \cdot (T_{sr} - Y_{0,k})$$

$$\psi_{k+1} \leftarrow pom$$

$$\psi_{2k+1} \leftarrow pom$$

for $i \in 0, 1 \dots N_x$

$$AA_{i,k+1} \leftarrow - \frac{\tau}{2 \cdot h} \cdot \frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h}$$

$$BB_{i,k+1} \leftarrow \left(\frac{A(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{h^2} + \frac{B(cc_{k+1}, Y_{i,k})}{2} \right) \cdot \tau + 1$$

$$CC_{i,k+1} \leftarrow AA_{i,k+1}$$

$$DDp_l \leftarrow \text{if} \left(i < N_x, Y_{i+1,k}, Y_{N_x,k} + \frac{h}{\lambda(cc_{k+1}, Y_{N_x,k})} \cdot \psi_{2k+1} \right)$$

$$DDp \leftarrow \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot \text{if} \left(i > 0, Y_{i-1,k}, Y_{0,k} \dots \right) - \left(\frac{B(cc_k, Y_{i,k}) \dots}{+ 2 \cdot \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2}} \right) \cdot Y_{i,k} \dots$$

$$+ \frac{A(cc_k, Y_{i,k})}{h^2} \cdot DDp1$$

$$DD_{i,k+1} \leftarrow Y_{i,k} + \frac{\tau}{2} \cdot (D(cc_{k+1}, Y_{i,k}) + D(cc_k, Y_{i,k}) + DDp)$$

$$P_{0,k+1} \leftarrow -\frac{AA_{0,k+1} + CC_{0,k+1}}{BB_{0,k+1}}$$

$$q_{0,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot AA_{0,k+1} \cdot \psi_{k+1} + DD_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}{BB_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}, Y_{0,k}))}$$

for $i \in 1, 2.. Nk - 1$

$$P_{i,k+1} \leftarrow \frac{-CC_{i,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

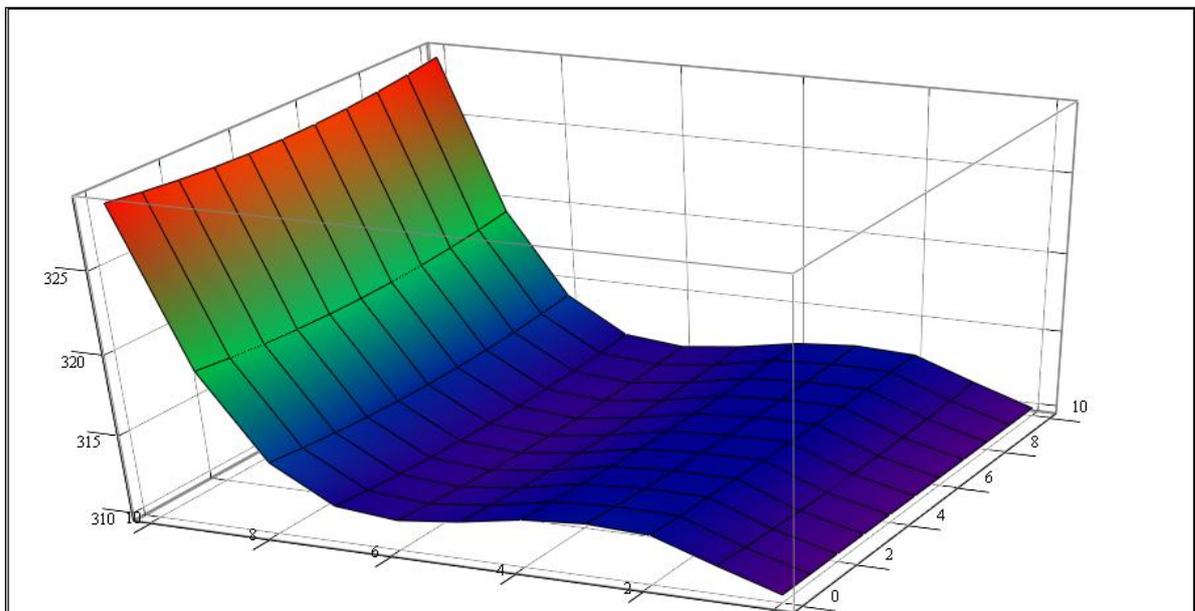
$$q_{i,k+1} \leftarrow \frac{DD_{i,k+1} - AA_{i,k+1} \cdot q_{i-1,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$$

$$Y_{Nk,k+1} \leftarrow \frac{2 \cdot h \cdot CC_{Nk,k+1} \cdot \psi_{2k+1} - \lambda(cc_{k+1}, Y_{Nk,k}) \cdot [DD_{Nk,k+1} - q_{Nk-1,k+1} \cdot (AA_{Nk,k+1} + CC_{Nk,k+1})]}{-\lambda(cc_{k+1}, Y_{Nk,k}) \cdot [BB_{Nk,k+1} + P_{Nk-1,k+1} \cdot (AA_{Nk,k+1} + CC_{Nk,k+1})]}$$

for $i \in Nk - 1, Nk - 2.. 0$

$$Y_{i,k+1} \leftarrow P_{i,k+1} \cdot Y_{i+1,k+1} + q_{i,k+1}$$

24. Температурное поле по концентрации сухих веществ и радиусу продукта:



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **191 126**⁽¹³⁾ **U1**

(51) МПК
F26B 17/10 (2006.01)
F26B 3/12 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
F26B 17/10 (2019.02); F26B 3/12 (2019.02)

(21)(22) Заявка: 2019100749, 10.01.2019
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.01.2019
Дата регистрации:
25.07.2019
Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 10.01.2019
(45) Опубликовано: 25.07.2019 Бюл. № 21
Адрес для переписки:
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16,
Федеральное агентство по рыболовству,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Астраханский государственный
технический университет" ФГБОУ ВО "АГТУ"

(72) Автор(ы):
Алексанян Игорь Юрьевич (RU),
Максименко Юрий Александрович (RU),
Невалённая Анастасия Александровна (RU),
Теличкин Роман Сергеевич (RU)
(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Астраханский
государственный технический университет",
ФГБОУ ВО "АГТУ" (RU)
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 160793 U1, 10.04.2016. RU 2412412
C1, 20.02.2011. RU 154840 U1, 10.09.2015. RU
2513077 C1, 20.04.2014. RU 2570536 C1,
10.12.2015. WO 1986006746 A1, 20.11.1986.

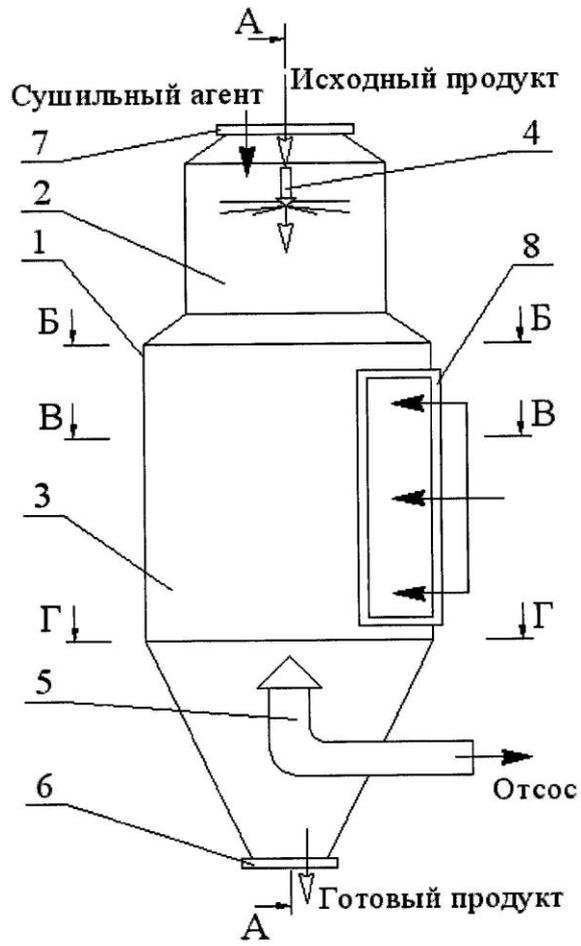
RU 191126 U1

RU 191126 U1

(54) Распылительная сушилка

(57) Реферат:
Полезная модель относится к пищевой и химической отраслям промышленности, в частности к технике сушки жидких и пастообразных продуктов, и может быть использована при производстве сухих дисперсных материалов. Распылительная сушилка содержит сушильную камеру цилиндрической формы в виде двух последовательно соединенных цилиндров, малого и большого, разного диаметра, распылитель, установленный по оси камеры, систему отсоса, установленную под большим цилиндром, и узел выгрузки в виде полого конуса, установленного под большим цилиндром по оси камеры, в полости большого цилиндра

установлены и жестко зафиксированы вертикальные перегородки круговым массивом вокруг оси сушильной камеры, большой и малый цилиндры имеют патрубки для ввода сушильного агента, причем патрубков большого цилиндра расположен тангенциально к поверхности большого цилиндра, вертикальные перегородки выполнены криволинейными и установлены с зазорами между собой, образуя криволинейные щелевые каналы для ввода сушильного агента. Технический результат - увеличение интенсивности процесса сушки за счет усовершенствования конструкции устройства. 3 ил.



Фиг. 1

«Иновационные технологии продуктов питания»

ИнТехПрод

Общество с ограниченной ответственностью «Иновационные технологии продуктов питания»
 ИНН: 3023000122, КПП: 302301001, ОГРН: 1103023000464, ОКПО: 66690437
 Юридический адрес: 414015, г. Астрахань, переулок Бакинский, д. 52.
 р/с р/с 40702810917130000121, Астраханский РФ ОАО «Россельхозбанк»,
 к/с 30101810400000000757, БИК 041203757. Тел.: 8(8512)480477



УТВЕРЖДАЮ

Абубекерова Л.И.

2020г.

М. П.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ
 НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК В
 ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО**

аспиранта кафедры «Технологические машины и оборудование»
 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
 высшего образования «Астраханский государственный технический университет»
 (ФГБОУ ВО «АГТУ»)

ТЕЛИЧКИНА РОМАНА СЕРГЕЕВИЧА

Настоящим актом подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы Теличкина Романа Сергеевича, выполненные в рамках диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук, посвященной разработке и научному обоснованию способа распылительной сушки экстракта зеленого чая, внедрены и используются на ООО «Иновационные технологии продуктов питания».

На предприятии активно внедряются инновационные разработки и перспективные технологии при производстве кулинарной продукции, пищевых полуфабрикатов и продуктов питания и оказании услуг в области общественного питания.

К внедрению приняты результаты диссертационного исследования, которые будут использованы при налаживании производства сухих растительных полуфабрикатов.

Основные выводы и рекомендации учтены при организации научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы на предприятии.

Выполнена оценка экономической эффективности внедрения результатов, ожидаемый экономический эффект составит 917,6 тыс. руб.

Объекты внедрения:

1) Функциональные зависимости для расчета структурно–механических, теплофизических и гигроскопических характеристик концентратов экстракта зеленого чая.

2) Кинетические закономерности тепломассопереноса при распылительной сушке экстракта зеленого чая.

3) Режимные параметры для эффективного обезвоживания водного экстракта зеленого чая с начальной влажностью 0,9 кг/кг при котором достигается удельная производительность по сухому порошку экстракта 0,937..1,528 кг/(м³·ч) и удельная влагонапряженность рабочего объема сушильной камеры 7,962..12,985 кг/(м³·ч):

- Начальная (исходная) температура водного экстракта зеленого чая 293..318 К;

- Начальная (исходная) температура нагретого воздуха – сушильного агента 443..503 К;

- Конечная температура отработавшего сушильного агента 343..353 К;

- Способ подачи экстракта зеленого чая в сушильную камеру – распыление.

- Способ распыления – акустический, механический и др.

- Начальный (исходный) диаметр распыленных частиц экстракта зеленого чая 20..30 мкм;

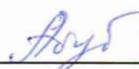
- Средний характерный размер частиц сухого экстракта зеленого чая – порошка 1..6 мкм.

- Расход сушильного агента на 1 кг испаренной влаги ≥ 20 кг/кг.

- Параметры воздуха рабочей зоны производственного помещения перед нагревом и подводом в сушильную камеру по ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны и СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

4) Конструкция сушильной установки по патенту на полезную модель 191126 РФ.

Технолог

 / Абубекерова Л.И.

« 19 » 06 2020 г.

Общество с ограниченной ответственностью
«БИОПОЛИМЕР-НЕО».

ООО «БИОПОЛИМЕР-НЕО»

414024, Астраханская область, г. Астрахань,
пер. Тихорецкий, дом № 1, кв. 12
Тел. +79297414831, +79093728818
e-mail: biopolymer_neo@mail.ru

ИНН 3025035868, КПП 302501001,
ОГРН 1193025004281

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «БИОПОЛИМЕР-НЕО»,
/А.А. Бекешева/
« 2020 г.
М.П.
ООО «Биополимер-НЕО»
ОГРН 1193025004281
Общество с ограниченной ответственностью

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ТЕЛИЧКИНА РОМАНА СЕРГЕЕВИЧА НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК В ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Настоящим актом подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы Теличкина Романа Сергеевича, выполненные в рамках диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук, посвященной разработке и научному обоснованию способа распылительной сушки экстракта зеленого чая, внедрены и используются на предприятии ООО «БИОПОЛИМЕР - НЕО».

Практический интерес для предприятия, которое специализируется на переработке вторичных рыбных отходов и производстве коллагенсодержащих продуктов различной формы и назначения, представляют предложенные в диссертационной работе конструкторские решения для организации эффективной распылительной сушки жидких материалов.

На предприятии запланировано изготовить и внедрить в производственный цикл конструкцию сушильной установки: Пат. на полезную модель 191126 РФ, МПК F26B 17/10. Распылительная сушилка / Алексанян И.Ю., Максименко Ю.А., Невалённая А.А., Теличкин Р.С.; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный технический университет» ФГБОУ ВО «АГТУ» – 2019100749: Заявлено 10.01.2019. Опубликовано 25.07.2019 Бюл. № 21.

Ввод в эксплуатацию сушильной установки позволит наладить выпуск сухих дисперсных форм производимых материалов, расширить ассортимент продукции и увеличить объем производства.

Выполнена оценка экономической эффективности внедрения результатов, ожидаемый экономический эффект составит 1120 тыс. руб.

Директор по инновациям

канд. техн. наук, доцент



/ О.С. Якубова /

Акционерное общество
 «ОРЕЛПРОДУКТ»
 ИНН 5717001550/КПП 775101001
 108810, город Москва, поселение Марушкинское,
 деревня Крёкшино, проезд Терминальный,
 строение 3, этаж 2, комната 64Е
 тел/факс: (48646) 2-58-37, тел. 2-53-20
 КБ «ЛОКО-БАНК» (АО) г. Москва р/с
 40702810600002002000
 к/с 3010181050000000161 БИК 044525161
 e-mail: orelproduct@meatcans.ru

УТВЕРЖДАЮ

Исполнительный директор

Акционерное общество

«ОРЕЛПРОДУКТ»

Ю.С. Дутлякова/
 « 5 » _____ 2020г.



**АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ
 НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ
 НАУК В ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО**

Автор:

ТЕЛИЧКИН РОМАН СЕРГЕЕВИЧ

Настоящим актом подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы Теличкина Романа Сергеевича, выполненные в рамках диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук, посвященной РАЗРАБОТКЕ И НАУЧНОМУ ОБОСНОВАНИЮ СПОСОБА РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ ЭКСТРАКТА ЗЕЛЕНОГО ЧАЯ внедрены и используются на АО «ОРЕЛПРОДУКТ».

Практический интерес для предприятия, специализированного на производстве пищевой консервированной продукции представляют следующие объекты внедрения:

- Функциональные зависимости удельной производительности сушилки и удельной влагонапряженности рабочего объема сушильной камеры от влияющих параметров при распылительной сушке экстракта зеленого чая.
- Рекомендации по организации сушильного процесса и рациональные режимные параметры для обеспечения наибольшей удельной производительности при сохранении качественных показателей продукции.
- Разработанные конструкторские решения для организации эффективной сушки при производстве сухих дисперсных материалов (Патент полезную модель 191126 РФ).

Результаты диссертационной работы используются для совершенствования технологических процессов на предприятии, при организации научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы с целью разработки и дальнейшего внедрения перспективных инновационных технологий для эффективного производства товаров массового потребления.

Отзыв подготовил:

Исп. директор

 Должность

[Signature]

 Подпись

Дутлякова Ю.С.

 ФИО

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора Ассоциации
Астраханских рестораторов и кулинаров
Сторублевский В.А.



« 4 » 06 2020г.

М. П.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

на соискание ученой степени кандидата технических наук

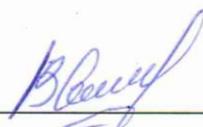
аспиранта кафедры «Технологические машины и оборудование»

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Астраханский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «АГТУ»)

ТЕЛИЧКИНА РОМАНА СЕРГЕЕВИЧА

Настоящим актом подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы Теличкина Романа Сергеевича, выполненные в рамках диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук, посвященной разработке и научному обоснованию способа распылительной сушки экстракта зеленого чая представляют значительный научный и практический интерес для предприятий специализирующихся на переработке растительного сырья.

Основными задачами в деятельности Ассоциации являются: популяризация и развитие индустрии гостеприимства, совершенствование технологий пищевой индустрии и повышение качества услуг в сфере общественного питания. Диссертация и результаты исследований рассмотрены экспертами и проанализированы на заседании совета Ассоциации. Результаты диссертационной работы рекомендованы советом Ассоциации для внедрения на пищевых предприятиях.

 / В.А. Сторублевский

« 4 » 06 2020 г.

Общество с ограниченной
ответственностью «Иннотех»

ООО «ИННОТЕХ»

ИНН 3023000860; КПП 302301001;
414017, Астраханская область,
Астрахань, Парковая дом 4

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Иннотех»,

/М.А. Албердина/

2020г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

**РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ТЕЛИЧКИНА РОМАНА
СЕРГЕЕВИЧА НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА
ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК В ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

Настоящим актом подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы Теличкина Романа Сергеевича, выполненные в рамках диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук, посвященной разработке и научному обоснованию способа распылительной сушки экстракта зеленого чая, внедрены и используются на ООО «ИННОТЕХ».

Практический интерес для предприятия, специализированного на производстве поверхностно-активных веществ, синтетических моющих средств, реагентов и других химических компонентов, представляют предложенные в диссертационной работе конструкторские решения для организации эффективной распылительной сушки жидких материалов.

На предприятии запланировано изготовить и внедрить в производственный цикл конструкцию сушильной установки: Пат. на полезную модель 191126 РФ, МПК F26B 17/10. Распылительная сушилка / Алексанян И.Ю., Максименко Ю.А., Невалённая А.А. Теличкин Р.С.; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Астраханский государственный технический университет" ФГБОУ ВО "АГТУ" – 2019100749; Заявлено 10.01.2019. Опубликовано 25.07.2019 Бюл. № 21.

Ввод в эксплуатацию сушильной установки позволит наладить выпуск сухих дисперсных форм производимых материалов, расширить ассортимент продукции и увеличить объем производства.

Выполнена оценка экономической эффективности внедрения результатов, ожидаемый экономический эффект составит 1120 тыс. руб.

Главный инженер

/ Фокин Ю.В. /

Главный бухгалтер

/ Албердина М.А. /

Дата составления

19 июля 2020