

На правах рукописи



Мещерякова Галина Сергеевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИИ
ПЕКТИНОСОДЕРЖАЩЕГО ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ
ИЗ АРБУЗНОГО СЫРЬЯ**

Специальность 4.3.3. Пищевые системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре «Технологические машины и оборудование» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Астраханский государственный технический университет», г. Астрахань

Научный руководитель:

Нугманов Альберт Хамед-Харисович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Шахов Сергей Васильевич
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет инженерных технологий»,
профессор кафедры «Машины и аппараты пище-
вых производств»

Кондратенко Владимир Владимирович
кандидат технических наук, доцент, Всероссий-
ский научно-исследовательский институт техно-
логии консервирования – филиал ФГБНУ «Фе-
деральный научный центр пищевых систем им.
В.М. Горбатова» РАН, заместитель директора по
научной работе

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Майкопский государственный
технологический университет»

Защита диссертации состоится 23 ноября 2022 г. в 14:00 на заседании диссертаци-
онного совета 24.2.372.05 на базе ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова» по адресу:
117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36, корп. 3, ауд. 353.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в Научно-информационном
библиотечном центре им. академика Л.И. Абалкина ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плева-
нова» по адресу: 117997, г. Москва, ул. Зацепа, д. 43 и на сайте организации:
<http://ords.rea.ru>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор химических наук,
профессор



Чалых Татьяна Ивановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Несмотря на достигнутые успехи в агропромышленном комплексе России, и ориентируясь на Стратегию развития пищевой и перерабатывающей промышленности РФ на период до 2030 года, в этой отрасли существует достаточно нерешенных проблем, влияющих на снижение эффективности промышленной переработки сельскохозяйственного сырья. В этой связи резонно, кроме увеличения мощностей уже функционирующих агропромышленных производств, разработка и реализация новых или оригинальных технологий, ориентированных на комплексную утилизацию и переработку сырьевых материалов растительного происхождения для выработки известной и оригинальной пищевой продукции, в том числе из малоценных и отходов материалов основной производственной деятельности. В частности, необходимость поиска новых рациональных путей по внедрению прогрессивных технологий, дополнительно обусловлена растущей потребностью российского рынка в увеличении номенклатуры экологически безопасных материалов для упаковки продуктов пищевого назначения, которые должны легко утилизироваться после использования. Одним из вариантов решения поставленных задач служит разработка и реализация способов выработки съедобных пектиносодержащих субстанций, в частности для упаковки, из возобновляемых сырьевых материалов пищевого назначения и, кроме того, получение пленочных структур из вторичных ресурсов, образующихся в результате обработки основных сырьевых материалов.

В качестве перспективного вторичного ресурса для производства пектиносодержащей пленки вполне может подойти арбузное сырье, т.к., во-первых, в его плодах содержится 13,4% пектиновых веществ, из которых 8,1% составляет протопектин, обуславливающий прочность ткани плода, а во-вторых, невостребованной арбузной продукции на полях остается около 150 тыс. тонн, а это выброшенные ресурсы, используя которые можно получить различные, и при этом, нужные на рынке пищевые продукты, в том числе, и глубокой переработки, те же пленочные пектиносодержащие структуры. Новизна продукта предопределяет целесообразность осуществления научно-технических исследований для определения рациональных режимов операции обезвоживания пектиносодержащего биополимера до заданных пределов влажности, где пленочная структура остается устойчивой в технологическом аспекте в течение гарантированного времени ее применения и обладает приемлемыми потребительскими параметрами при максимальном снижении его устойчивости к внешним воздействиям после использования для быстрого биологического разложения.

Таким образом, научно-техническая задача разработки рецептурного состава биополимерного пектиносодержащего жидкого полуфабриката на основе пектинового экстракта из арбузных корок и совершенствование способа его сушки, включая оригинальные конструкторские решения по реализации этого процесса, при повышении эффективности и экологической безопасности технологии, является актуальной с учетом того, что ресурсная база исходных сырьевых материалов перманентно возобновляется и практически не ограничена.

Степень её разработанности. Научными и практическими аспектами исследуемой проблемы занимались многие отечественные и зарубежные ученые.

Существенное влияние на обоснование и развитие отечественных научных

положений теории и практики получения пектиновых субстанций и материалов, содержащих пектин, оказали такие исследователи как: Г.Б. Аймухамедова, И.М. Литвак, Е.В. Сапожникова, Л.Б. Сосновский, Н.С. Карпович, Л.В. Донченко, Г.М. Зайко, М.Ю. Тамова, В.А. Компанцев, А.А. Кочеткова, В.В. Нелина, И.А. Ильина, Н.В. Сокол, З.Н. Хатко и др. Анализ состояния и тенденции развития технологий получения пектина показал, что в современных условиях ключевой проблемой производства различных видов пектинов являются безопасность, экологическая чистота процесса, высокое качество и прогнозируемость свойств целевого продукта. Не вызывает сомнений, что разработка рациональных технологических подходов должна опираться на комплексное исследование характеристик объекта изучения и режимов операции экстрагирования пектиновых веществ из него.

Среди зарубежных исследований в области сушки, термовлажностной обработки и в некоторых смежных областях по исследуемой тематике можно представить работы таких ученых как: Т. Kudra, A.S. Mujumdar, James R. Couper и W. Roy Penny, Gavin P. Towler и Ray K. Sinnott и др. Среди советских и российских ученых, внесших заметный вклад в развитие теоретических положений и техники сушки растительных материалов это: А.С. Гинзбург, А.В. Лыков, Г.К. Филоненко, П.А. Ребиндер, И.Ю. Алексанян, А.Н. Остриков и др.

При изучении и совершенствовании обозначенных процессов и их аппаратного обеспечения основной акцент следует поставить над исследованием и выбором и факторов, воздействующих на длительность и рациональные режимные параметры технологических процедур экстрагирования и обезвоживания объектов исследования. Следует отметить, что в технологии пленочных структур при изучении основных процессов, которому посвящена данная работа, необходимо предложить эффективный метод обезвоживания, с точки зрения самой организации процесса сушки, а также энергозатрат на эту процедуру. Решение задач, обуславливающих эффективность влагоудаления из арбузного полуфабриката, специально подготовленного для дальнейшего получения из него съедобного пленочного упаковочного материала и его технического обеспечение недостаточно проработано и обуславливает продолжение исследований в этой области.

Цель и задачи исследования.

Целью работы послужила разработка рациональных режимных параметров процессов экстрагирования пектиносодержащих веществ из отходов переработки арбузного сырья и сушки полученного экстракта в технологии съедобных защитных пленок.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Оценить современное состояние теории и техники в технологии пектиносодержащих пленочных структур для нужд пищевой промышленности;
2. Обосновать необходимость вспомогательных процедур получения пектиносодержащего экстракта, введения в него добавок для получения стабильной гелевой основы и определить рациональные режимные параметры их проведения в аспекте выработки съедобного пленочного материала;
3. Определить теплофизические, структурные и гигроскопические параметры полученного арбузного полуфабриката на основе пектинового экстракта, как объекта сушки и провести ее термодинамический анализ;
4. Исследовать и проанализировать кинетические закономерности процесса конвективно-кондуктивной сушки арбузного полуфабриката, а также адаптировать к нему и решить математическую модель внутреннего и внешнего переноса массы и

тепла при операции обезвоживания;

5. Выбрать и рекомендовать рациональные конструкции экстрактора и сушилки для практической реализации исследуемых процессов.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

для пектиносодержащего экстракта, полученного из арбузной корки:

1. Определено рациональное соотношение компонентов в гидромодуле для эффективной трансформации пектиновых веществ в водорастворимое состояние и построена рефрактометрическая шкала оценки их доли в нем;

2. Установлены и математически описаны кинетические закономерности процесса экстракции водорастворимых веществ в поле ультразвука, построены кривые скорости массопереноса;

для арбузного полуфабриката:

3. Определены и математически обобщены в виде эмпирических уравнений зависимости гигроскопических теплофизических и, структурных параметров от влияющих факторов в реальных влажностных и температурных диапазонах проведения процесса сушки, выявлены и математически аппроксимированы закономерности связывания его с влагой, опираясь на термодинамический анализ процедуры обезвоживания и сорбции им воды;

4. Выявлены, проанализированы, математически и графически аппроксимированы кинетические закономерности процедуры кондуктивно-конвективного обезвоживания в виде кривых интенсивности влагоудаления, изучен механизм внутреннего влагопереноса и его особенности, определена интенсивность продвижения температурного фронта в объекте изучения при сушке посредством построения, адаптации к объекту и решения математической модели трансфера тепловой энергии и вещества методом конечных разностей;

5. Обоснованы параметры, воздействующие на удельный выход сухого продукта в сушилке, пределы их изменения, принимая во внимание технологические ограничения, и определено значение съема готового материала по отношению к рабочей площади от влияющих факторов и его рациональная величина.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

Теоретическая значимость исследования заключается в осуществлении комплексного анализа процедур переноса тепловой энергии и массы при проведении экстрагирования и обезвоживания в технологии получения пектиносодержащих упаковочных материалов из арбузного сырья с заданными потребительскими свойствами при снижении материальных затрат и энергии. Выявлены пути повышения эффективности традиционных методов по избирательному извлечению ценных компонентов из сырьевых материалов растительной природы, сушки гелеобразных полуфабрикатов, конструкций для обеспечения рациональных режимных параметров осуществления обозначенных операций.

Практическая значимость заключается в разработке более совершенных способов экстракции из арбузной коры водорастворимых веществ, включая пектиновые, и кондуктивно-конвективной сушки полученного полуфабриката, а также предложенном эффективном оформлении конструкции сушилки. Реализация полученных данных позволит повысить качество извлекаемых из арбузного вторичного сырья ценных компонентов, скорость применяемых в технологии процессов, а также сократить материальные и энергетические затраты при избирательном извлечении ценных компонентов из сырьевых материалов растительной природы и сушке полученного арбузного полуфабриката.

Была разработана программа расчета гигроскопических параметров пищевой продукции и их термодинамический анализ, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611624.

Основные результаты и рекомендации, представленные в работе, приняты к использованию при проведении технологических операций на пищевых предприятиях гор. Астрахани (акты использования прилагаются).

Методология и методы исследования. Почти все выводы и рекомендации, приведенные в данной работе, опираются на комплексные теоретические и эмпирические исследования, а также анализ кинетических и динамических закономерностей процессов переноса тепловой энергии и массы, применяя соответствующие современные методики, для интенсификации изучаемого переноса тепла и массы в растительном сырье и полученном арбузном полуфабрикате, а также адаптации моделей тепломассопереноса к объекту исследования и их численного решения. Для нахождения специфических параметров объекта изучения, осуществляемых опытных серий и решения математической модели обезвоживания арбузного полуфабриката при кондуктивно-конвективном энергоподводе применялся специализированный для решения поставленных задач методический и инструментальный аппарат, включая современных программные продукты, приборную технику и разработанные экспериментальные стенды.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Опытные данные по гигроскопическим, структурным, теплофизическим характеристикам и параметрическим свойствам исследуемых объектов экстракции пектиновых веществ и сушки арбузного полуфабриката из вторичных сырьевых ресурсов (кора арбуза) и их теоретический анализ;

2. Результаты выявления специфики механизма тепломассопереноса, исследования статистики и кинетики операций экстракции водорастворимых, в том числе и пектиновых веществ из арбузных корок, а также сушки полученного арбузного полуфабриката при кондуктивно-конвективном энергоподводе;

3. Данные, полученные при реализации, разработанной и адаптированной к объекту изучения математической модели внутреннего тепломассопереноса и тепломассообмена на границе раздела фаз при обезвоживании арбузного полуфабриката;

4. Конструктивные особенности экстракционной и сушильной техники в технологии производства биоразлагаемого материала для упаковки пищевых продуктов на базе пектинового экстракта, полученного из вторичных сырьевых ресурсов.

Достоверность полученных результатов обоснована следующими позициями: удовлетворительной сходимостью (10%) данных решения математической модели с результатами натуральных испытаний и опытных серий; согласованностью выводов и рекомендаций, приведенных в работе с известными научными положениями и частными научными данными; проведенными опытно-конструкторскими исследованиями, опытом практического тестирования полученных результатов; приведенные результаты исследований и выводы обладают ясным физическим смыслом и не входят в конфликт с опубликованными результатами исследований в обозначенной научно-технической области.

Апробация результатов диссертационного исследования. В большей части результаты диссертационного исследования представлены и обсуждены на конференциях различного уровня, таких как: XLVI-XLVII Межд. науч.-прак. конф. «Технические науки: проблемы и решения» (г. Москва, 2021); VI Межд. науч.-прак.

конф. «Инновационный дискурс развития современной науки» (г. Петрозаводск, 2021); Межд. науч.-прак. конф. «Междисциплинарность научных исследований как фактор инновационного развития» (г. Магнитогорск, 2021); II Межд. науч.-прак. конф. «Innovation research and strategy» (г. Петрозаводск, 2021); XXVI Межд. науч.-прак. конф. «Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения» (г. Пенза, 2021); Всерос. науч.-прак. конф. «Научные исследования – основа современной инновационной системы» (г. Тюмень, 2021).

Публикации. Опубликовано 13 научных работ по материалам диссертации, в их числе 4 работы в журналах, включенных в список рецензируемых научных изданий, 1 работа проиндексирована в БД «Скопус», а также получены: одно свидетельство на ЭВМ и один патент на полезную модель.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, включающих аналитический обзор литературы, результатов собственных исследований, выводы, заключение, список литературы (195 наименований) и приложений. Общий объем диссертации с приложениями составляет 179 страниц. Работа содержит 24 таблицы и 56 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика исследования, определены его актуальность, цель и задачи, научная новизна, а также значимость с теоретической и практической точек зрения, проведена оценка степени разработанности подходов к устранению поставленной проблемы и полноты апробации результатов исследования.

В первой главе представлена общая информация о современном состоянии теории и техники в технологии пектиносодержащих пленочных структур для нужд пищевой промышленности. Приведены анализ существующих классификаций, технологий пленочных структур и их применения в пищевой промышленности, а также физико-химические основы пленкообразования пектиновых веществ и перспективы использования кожуры арбуза в качестве сырья для производства съедобных полимерных защитных пленок.

Вторая глава содержит сведения о целесообразности проведения вспомогательных процедур и введения добавок, в том числе и микроцеллюлозы, в разрабатываемую технологию пектиносодержащего пленочного материала, в частности в главе приводятся обоснования по применению ультразвука для интенсификации процесса экстракции водорастворимых веществ из исходного сырья; полученное рациональное соотношение компонентов в гидромодуле для эффективной трансформации пектиновых веществ в водорастворимое состояние, а также кинетические закономерности протекания исследуемого процесса экстракции.

К важной подготовительной процедуре, определяющей эффективность и интенсивность процессов экстракции можно отнести операцию диспергирования исходного сырья, т.к. она напрямую влияет на величину площади поверхности контакта фаз, участвующих в массообмене. Для определения распределения частиц по размерам необходимо использовать методы, позволяющие собрать данные о размерах большого количества частиц, как правило, не менее 200, либо массе фракций, а затем обработать эти данные согласно законам статистики. В работе применялся визуальный метод дисперсной оценки измельченных частиц по полученным микрофотографиям (рис. 1).

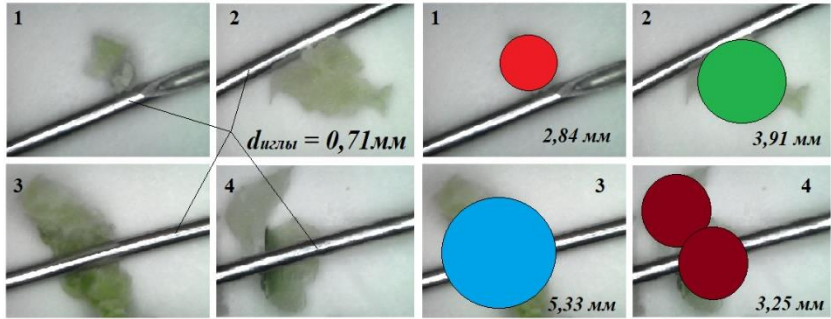


Рисунок 1 – Микрофотографии и схематичные иллюстрации фрагментов поверхности измельченных частиц

Визуальный анализ фотографий показывает присутствие в исследуемом материале ориентировочно четырех фракций, где характерные диаметры частиц в них сравнительно мало отличаются друг от друга, поэтому на схематичной иллюстрации фрагментов, частицы представлены окружностями с их средними диаметрами в каждой фракции. Результаты проведенных исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры, характеризующие дисперсный состав объекта исследования

Цвет окружности	$d_{\text{хар}}$, мм	$d_{\text{экв}}$, мм	Фракционное соотношение числа частиц, %
красный	2,84	2,01	45
зеленый	3,91	2,76	23
синий	5,33	3,77	12
коричневый	3,25	2,30	20

Для различных видов растительного сырья, подвергаемого экстрагированию, согласно статьям Госфармакопей РФ, существует определенный диапазон рационального размера частиц: 0,5...3мм. Дисперсный анализ показал, что средний эквивалентный размер у исследуемого измельченного растительного сырья попадает в рекомендованный диапазон ($d_{\text{экв, ср}} = 2,37\text{мм}$).

Для контроля за различными технологическими процессами в пищевой промышленности и за качеством пищевых продуктов широкое применение нашли рефрактометрические методы анализа. В данном исследовании применялся способ расчета концентрации, связанный с рефрактометрическими таблицами или графиками, а для построения шкалы оценки использовалась модельная пектиновая субстанция, выпускаемая промышленно и близкая по составу к свойствам пектиновой композиции из арбузных корок, включающая фруктозу и регулятор кислотности (Е 341 и Е 450) для регулирования уровня pH раствора. На рисунке 2а представлена оценочная шкала в виде градуировочного графика, построенного по девяти экспериментальным точкам для концентраций 0,88%; 1,33%; 2,58%; 4,22%; 5,55%; 6,25%; 7,04%; 8,12%, каждой из которых соответствует конкретное значение индекса рефракции n . На рисунке 2б представлен график, построенный по тем же экспериментальным точкам, каждой из которых соответствует конкретное значение содержания сухих веществ в растворах по шкале сахарозы.

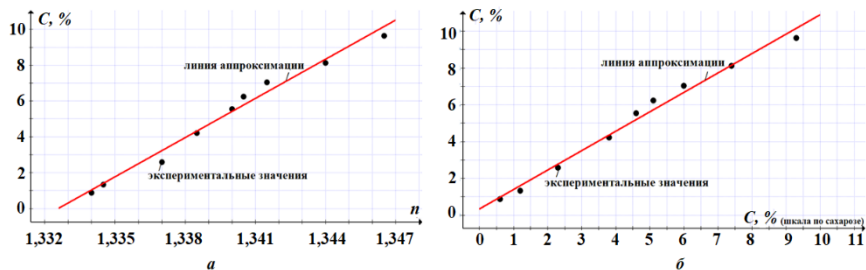


Рисунок 2 – Градуировочный график для определения концентрации арбузного экстракта

Результаты проведенных исследований показали, что наиболее рациональным считается массовое соотношение сырья: растворитель 1 к 6. В результате экстрагирования выявлено, что по предложенной технологии извлекается около 60% от общей массы целевого компонента. Для последующего анализа и расчета длительности экстракции пектиновых веществ из диспергированной кожуры необходимо выявление кинетических закономерностей процесса, которое проводилось при четырех различных вариантах, один из которых для примера представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Условия проведения эксперимента (вариант 4)

Наименование	Параметр
Экстрагент	Водный раствор лимонной кислоты
Концентрация	17,5 г/л
pH раствора	≈2,5
Температура экстрагента	358±2°K
Температура сырья	293±2°K
Гидромодуль	1/6
Влажность сырья	≈92%
Мощность на устройстве УЗТА-0,4/22-ОМ 90% от максимальной	не более 360 ВА
Частота ультразвука	22±1,65 кГц
Интенсивность ультразвука	≈126 кВт/м ²

На основании полученных опытных данных и формулам пересчета величин показателя преломления n и содержания сухих веществ в растворах по шкале сахарозы C_c в концентрацию сухих веществ в экстракте C_x построены кривые экстрагирования водорастворимых веществ (рис. 3) из измельченной корки столового арбуза дистиллированной водой и водным раствором лимонной кислоты без и с использованием ультразвука.

Эмпирическое исследование экстрагирования водорастворимых компонентов из технологически подготовленного арбузного сырья при вышеуказанных условиях проведения процесса выявило, что рациональная продолжительность процесса составляет не более 4 минут при использовании ультразвукового воздействия на полученную суспензию. Следует отметить, что с экономической точки зрения, для получения пектиносодержащего водного экстракта из арбузных корок достаточно использовать в качестве экстрагента очищенную питьевую воду, а не водный раствор лимонной кислоты, который еще надо получить, при этом проводить экстрагирование в поле ультразвука.

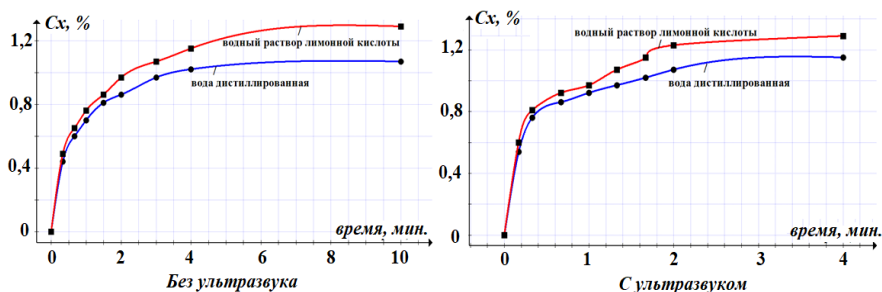
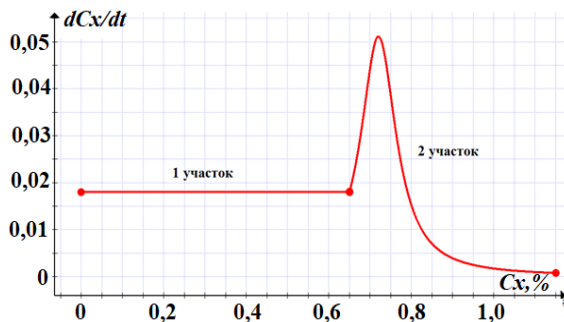


Рисунок 3 – Кривые экстрагирования

Анализ результатов опытных исследований кинетики процесса экстракции показал, что на кривой скорости (рис. 4) наблюдаются три характерных периода проведения этой процедуры. В первый период экстрагирования постоянство скорости экстракции можно объяснить тем, что интенсивность внутреннего и внешнего массопереноса равнозначны. Во втором периоде повышение скорости экстракции можно объяснить тем, что ультразвуковое воздействие, которое обуславливает на данном этапе окончательное нарушение структуры частиц арбузной кожуры, способствует переходу протопектина в водорастворимое состояние, и тем самым интен-

Рисунок 4 – График зависимости $\frac{dC_x}{dt} = f(C_x)$

сифицирует высвобождение и перенос целевых компонентов к поверхности раздела фаз, и, кроме того, максимальным повышением температуры объекта экстракции на данном участке, что тоже определяет рост скорости массопереноса за счет влияния термо- и бародиффузии. Падение скорости экстракции в третьем периоде объясняется уменьшением движущей силы переноса вещества, вследствие снижения концентрации переносимых компонентов в рафинате и ее роста в экстрагенте.

Априорная информация о пленочных структурах, свидетельствует о том, что для использования пектинового экстракта в инженерной практике очевидна необходимость повышения в нем концентрации сухих веществ, в частности, путем его упаривания. Рассматривая возможные варианты, автором рекомендуется вместо энергоемкого процесса выпаривания, введение в экстракт премиксов в виде порошкообразной микроцеллюлозы и глицерина, обладающих свойствами сохранять и увеличивать степень вязкости и консистенции пищевых гидрогелей. Постановочные эксперименты (рис. 5) показали, что их использование дает возможность увеличить прочность у готового покрытия, а также улучшить его защитные характеристики.

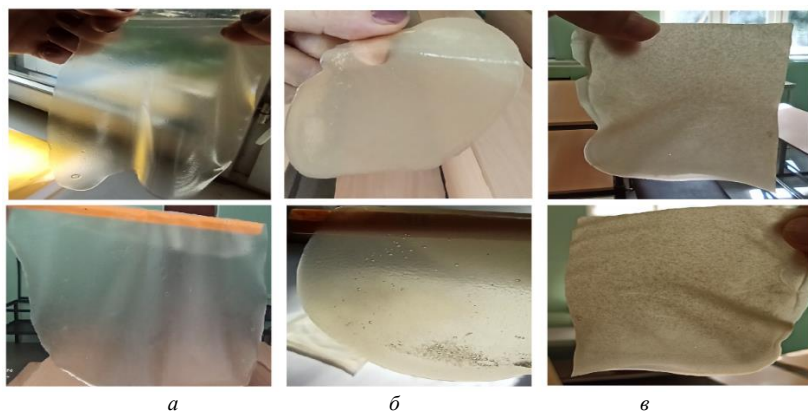


Рисунок 5 – Результат постановочных экспериментов получения пленочных структур при использовании различных премиксов: *а* – альгината натрия и глицерина; *б* – пектинового комплекса и глицерина; *в* – пектинового комплекса, микроцеллюлозы и глицерина

Ниже, в таблице 3, представлен ингредиентный состав гидрогеля на основе полученного пектинового экстракта из измельченной корки столового арбуза, включающий микроцеллюлозу и глицерин.

Таблица 3 – Рецептурный состав гидрогеля на основе арбузного пектинового экстракта

Наименование	Количество, г
Арбузный пектиновый экстракт с концентрацией 1,15%±0,05	920
Pectin NH термообратимый	44
Микрокристаллическая целлюлоза (порошок)	17
Глицерин жидкий (E422)	19
Выход	1000

Следует отметить, что новизна продукта и его уникальность обуславливает проведение дальнейших исследований, которые позволят осуществить рациональное ведение процесса сушки до допустимого интервала влажности биополимерного гидрогеля.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований определения теплофизических, структурно-механических и гигроскопических характеристик гелевой структуры на основе пектинового экстракта, как объекта сушки и ее термодинамический анализ.

В процессе кондуктивно-конвективной сушки из арбузного полуфабриката получается пленочная структура, при этом плотность исходного и конечного материала будет разной, вследствие различного содержания в ней влаги. Поэтому будет достаточно экспериментально определить плотность исходного полуфабриката ($1028 \pm 3 \text{ кг/м}^3$) и конечного продукта ($652 \pm 3 \text{ кг/м}^3$), а значение промежуточной плотности, с допустимой для инженерных расчетов точностью, можно будет найти, если линейно аппроксимировать искомую величину между крайними ее значениями.

Для проведения экспериментальных исследований по нахождению теплофизических характеристик (ТФХ) арбузного полуфабриката применялся зондовый экспресс метод, основанный на учете теплоинерционных свойств термомпары. Метод

позволяет быстро определить коэффициент теплопроводности λ , температуропроводности a и удельной теплоемкости c_M материала непосредственно в процессе его термической обработки. В итоге для арбузного полуфабриката, при его влажности 91%, были получены следующие значения искомым величин (табл. 4).

Таблица 4 – Результаты по экспериментальному определению ТФХ объекта исследования

$W, \%$	$c_M, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$a \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
≈ 91	≈ 3439	$\approx 11,59$	$\approx 0,41$

Дальнейшее исследование ТФХ полуфабриката предполагает выявление их зависимостей от влажности в диапазоне $0.1 \leq W \leq 0.91$ кг/кг. Изменение c_M можно с допустимой точностью принять линейным, что касается λ , которая может быть рассчитана по теоретической формуле, полученной на основе анализа, проведенного М.А. Громовым для жидких пищевых продуктов, и a , которая является комплексной величиной вышеназванных трех, то получить их искомые зависимости целесообразно расчетным путем.

Результаты экспериментов по определению величины c_M калориметрическим способом для объекта исследования представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Значения c_M жидкого полуфабриката при разных влажностях

Влажность образца, %	Удельная теплоемкость $c_M, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
91	3439
80	3393
70	3225
60	3137
50	3113

На рисунке 6 представлена графическая интерпретация полученных математических зависимостей λ и a объекта исследования в интервале температур 273...363°K и влажности от 0,1 до 0,91 кг/кг.

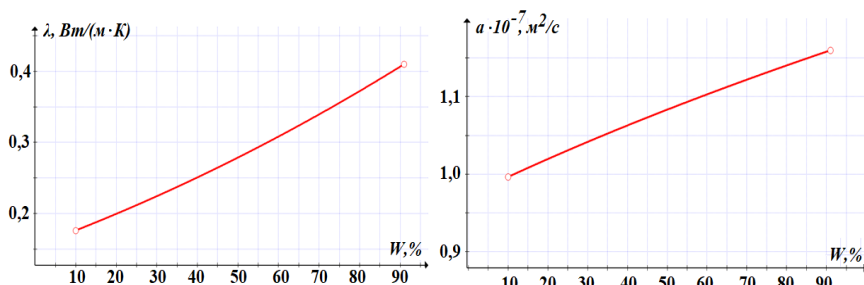


Рисунок 6 – График зависимости коэффициентов λ и a объекта исследования от его влажности, в интервале температур 273...363°K

В любой инженерной задаче, связанной с переносом тепловой энергии, например, при контакте высушиваемого материала с теплоносителем, важное значение имеет расчет коэффициента теплоотдачи α , который преимущественно вычисляется посредством эмпирических соотношений или из критериальных уравнений

для каждого конкретного случая и характеризует интенсивность теплообмена на поверхности твердого тела. В работе было использовано следующее соотношение:

$$\alpha = 4,35 \left(\frac{\rho_{sr} \omega_{sr}}{L} \right)^{0,4} \cdot \frac{\lambda_{sr}^{0,67} \cdot C_{sr}^{0,33}}{\mu_{sr}^{0,07} \cdot D^{0,2}} \cdot \Psi^{0,25}, \quad (1)$$

где ρ_{sr} – плотность теплоносителя, кг/м³; ω_{sr} – его скорость, м/с; λ_{sr} – его теплопроводность, Вт/(м·К); C_{sr} – его теплоемкость, Дж/(кг·К); μ_{sr} – его динамическая вязкость, Па·с; D – высота канала, м; L – определяющий размер, м; $\Psi = \frac{Pr_{sr}}{Pr_s}$.

Учитывая, что целесообразным способом сушки исследуемого полуфабриката является обезвоживание с комбинированным кондуктивно-конвективным энергоподводом, то для получения высококачественного конечного продукта, максимально возможная температура сушильного агента не должна превышать 100°C, при этом его максимальная скорость, после проведения постановочных экспериментов, не может быть выше 2,7 м/с, направленная прямо- или противотоком. Что касается определяющего размера L , то его значение можно ограничить величиной в 0,5 м, т.е. принята характеристика сечения канала, которая соответствует эквивалентному диаметру d_3 , рассчитанному по известной формуле:

$$d_3 = 4S/\Pi, \quad (2)$$

где S – площадь сечения поперечного прямоугольного канала, имеющего ширину 0,5 м и высоту 0,125 м; Π – смоченная часть периметра канала, в нашем случае смоченным периметром не полностью заполненного канала с прямоугольным сечением можно принять его ширину плюс две высоты слоя продукта, причем ввиду теплообмена с тонкой пленкой вторыми двумя слагаемыми можно пренебречь.

Выбор величины L был обоснован при моделировании процесса конвективной сушки путем сопоставления результатов решения модели с использованием полученного коэффициента теплоотдачи и экспериментальных данных по конечной температуре высушенного продукта.

Изучение гигроскопических свойств имеет целью дать характеристику сухому продукту и рекомендации по выбору конечной влажности материала. После реализации серии экспериментов получены изотермы сорбции влаги обезвоженного арбузного полуфабриката, при температурах воздуха 298°K и 323°K, которые представлены ниже (рис. 7а). Проведение логарифмирования облегчает математическую обработку и интерпретацию полученных изотерм (рис. 7а), которые для удобства разбиты на 2 участка (рис. 7б) и аппроксимированы уравнениями.

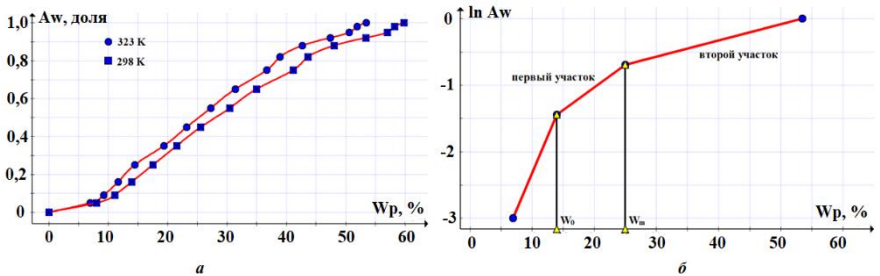


Рисунок 7 – Кривые равновесия сорбции влаги полуфабрикатом (а) и разбивка на участки с разным видом связи влаги с материалом (б): от 0 до W_0 – химическая связь; от W_0 до W_m – адсорбционно связанная влага; от W_m и выше – капиллярно связанная и осмотическая влага

В итоге, для высушенного полимерного материала наиболее целесообразной конечной влажностью является та, которая граничит с адсорбционно-связанным интервалом: $0,24 \leq W_p \leq 0,26$, т.е. наиболее рациональной конечной влажностью является диапазон от 25 до 27%.

Статика процессов взаимодействия материала с водой и анализ изотерм сорбции позволяет установить и количественно оценить характер изменения термодинамических составляющих уравнения Гиббса-Гельмгольца для изобарно-изотермического процесса: $\Delta F = \Delta E - T\Delta S$ (ΔE , ΔS – соответственно изменения внутренней энергии (энтальпии) и энтропии, по влагосодержанию W_p при $P, T = const$), про- дифференцировав которое получим:

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p}\right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p}\right)_{T,P} - T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}\right)_{T,P}, \quad (3)$$

где энтропийная составляющая свободной энергии $T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}\right)_{T,P}$ для большинства продуктов играет значительную роль.

Расчет дифференциальных изменений связанной энергии сорбции для различных температур необходим для выявления величины удельной теплоты образования пара r , (Дж/кг) для различных технологических условий процесса сушки, т.к. при моделировании теплопереноса в объекте исследования зависимость $r = f(W, T)$ входит в дифференциальное уравнение по переносу тепла. Ниже, на рисунке 8, графически представлена полученная зависимость удельной тепловой энергии испарения от равновесной влажности.

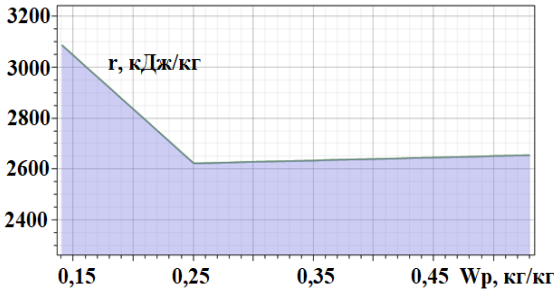


Рисунок 8 – Графическая зависимость r , (кДж/кг) от равновесной влажности в процессе снижения влажности у исследуемого материала.

Следует отметить, что характер зависимости удельной тепловой энергии испарения от равновесной влажности для исследуемого продукта типичен для большинства биополимерных материалов, и обусловлен различными энергетическими формами связи влаги, находящейся в образце, с его сухим остатком.

В четвертой главе представлены результаты исследования кинетики конвективно-кондуктивной сушки арбузного полуфабриката, решения математической модели этого процесса, анализа механизма внутреннего влагопереноса при проведении этой процедуры, а также описана предлагаемая сушильная установка с подробным анализом ее преимуществ перед существующими аналогами.

В результате проведенных экспериментальных исследований (табл. 6) построены кривые конвективной сушки гелеобразного арбузного полуфабриката, часть из которых представлена на рисунке 9. За варьируемые параметры, определяющие скорость обезвоживания объекта исследования от его начальной влажности W_H

(кг/кг) до конечной W_k (кг/кг), были приняты следующие: температура арбузного полуфабриката $T_{вм}$ (°К) и толщина его слоя $h_{вм}$ (м). В качестве не варьируемых параметров приняты следующие: температура сушильного агента $T_{с.а.}$ (°К), его скорость $v_{с.а.}$ (м/с) и направление, а также температура греющей пластины $T_{г.п.}$ (°К).

Таблица 6 – Данные по экспериментальному исследованию процесса сушки на опытной установке

$T_{вм}, ^\circ\text{C}$	$T_{с.а.}, ^\circ\text{C} / v_{с.а.}, \text{м/с}$	$h_{вм}, \text{м}$	$\tau, \text{с}$	$Y, \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$
30	100 / 2,5	0,001	7200	0,514
30	100 / 2,5	0,002	9300	0,796
30	100 / 2,5	0,003	11700	0,949
40	100 / 2,5	0,001	6600	0,562
40	100 / 2,5	0,002	8700	0,851
40	100 / 2,5	0,003	11100	1,000
50	100 / 2,5	0,001	6300	0,587
50	100 / 2,5	0,002	8400	0,881
50	100 / 2,5	0,003	10500	1,058
Дополнительные сведения:		площадь подложки $S=0,002 \text{ м}^2$, плотность полуфабриката $\rho=1028 \text{ кг}/\text{м}^3$.		

При проведении лабораторных экспериментов по исследованию кинетики сушки был рассчитан удельный съём сухого продукта с единицы рабочей поверхности в час Y , кг/(м²·ч) (удельная производительность) (табл. 6).

Анализируя результаты исследования можно сделать вывод о том, что повышение

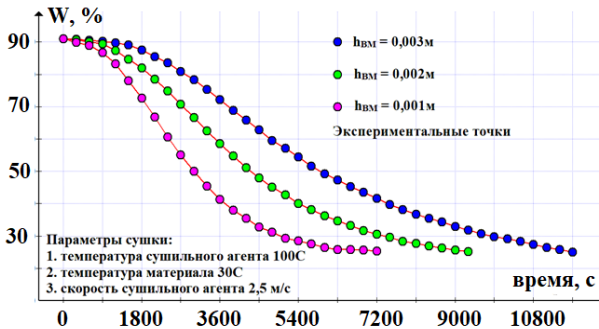


Рисунок 9 – Кривые кондуктивно-конвективной сушки полуфабриката при заданных температурных и скоростных параметрах процесса

температуры исходного арбузного полуфабриката, не смотря на увеличение Y , не целесообразно. Это связано с локальным подгоранием и пересыханием поверхности материала при его влажной сердцеvine, особенно в местах кондуктивного подвода энергии и необходимостью применения дополнительного теплового оборудования, что снижает полученный эффект от этой процедуры. Предварительное повышение температуры влажного материала до значений $T_{г.п.}$ может быть допустимо, но только при переменных осциллирующих режимах кондуктивного энергоподвода, однако это не приведёт, в нашем случае, к сокращению продолжительности процесса сушки, а значит и росту Y .

Таким образом, проведя серию опытов на лабораторной сушилке при различных вариантах значений влияющих факторов установлено, что примерное время сушки продукта, при его начальной толщине слоя в 3 мм составляет 3,3 часа, 2 мм – 2,6 часа, 1 мм – 2 часа, до достижения в нем конечной влажности W_k , равной 25 %.

Анализ механизма внутреннего массопереноса в процессе влагоудаления из арбузного полуфабриката производится на основании функциональной зависимости скорости обезвоживания от влажности продукта (рис. 10), полученной путем математического описания

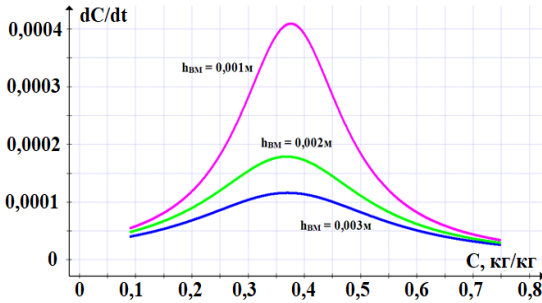


Рисунок 10 – Кривая скорости сушки арбузного полуфабриката при рациональных режимах проведения процесса

математического описания кривых сушки (рис. 9), который показал, что на кривой скорости наблюдаются два характерных периода обезвоживания, что не противоречит основным положениям теории сушки.

Выявление кинетических закономерностей изменения комплекса основных параметров, характеризующих

высушиваемый объект во времени сушки, позволил получить корректную физико-математическую модель тепло-массообменного процесса, которая была реализована на основе положений и допущений, аргументированных в работах профессора И.Ю. Александяна и представляет собой систему уравнений – аналитического уравнения переноса тепла и эмпирического уравнения переноса массы:

$$\frac{\partial T}{\partial C} = \frac{a}{\partial C} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{r\rho}{c_V}, \quad (4)$$

где x – координата толщины слоя материала, м; a – температуропроводность материала, $\text{м}^2/\text{с}$; $\frac{\partial C}{\partial \tau}$ – скорость сушки, $\text{кг}/(\text{кг} \cdot \text{с})$, с учетом допущения, что структура материала изотропна; r – энергия затрачиваемая на фазовый переход и на разрыв связи влаги с материалом, Дж/кг, определенная при термодинамическом анализе механизма внутреннего массопереноса; ρ – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_V – объемная теплоемкость материала, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Решением уравнения (5) при краевых условиях является функция $T = f(C, x)$, поэтому для удобства дифференцирования, при численной реализации модели влажность W была заменена концентрацией сухих веществ C , учитывая формулу их связи $C = 1 - W$.

Граничные условия 2-го рода для теплообмена на поверхности материала, контактирующей с сушильным агентом, связаны зависимостью:

$$\lambda(C) \frac{\partial T}{\partial x} = -\alpha(T_{c.a} - T_{\text{пов}}), \quad (5)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $T_{c.a}$ – температура сушильного агента при заданном давлении в камере, °К; $T_{\text{пов}}$ – температура поверхности материала, °К.

Граничные условия 1-го рода при контакте нагретого продукта с начальной температурой $T = 303^\circ\text{К}$, стремящейся экспоненциально к температуре $T = 353^\circ\text{К}$ более нагретой рабочей греющей поверхности, определяются следующим образом:

$$T_{\text{пов}} = 353 - e^{5(c_{\text{нач}} - c)}, \quad (6)$$

где $T_{\text{пов}}$ – текущая температура продукта, °К; $c_{\text{нач}}$ – исходная и c – текущая доли сухого остатка в образце, $\text{кг}/\text{кг}$.

Реализация математической модели тепломассопереноса при кондуктивно-конвективной сушке гелеобразного арбузного полуфабриката, выполнена в среде специализированного программного обеспечения Mathcad Professional при установленных рациональных режимах. На рисунке 11 графически представлена эволюция полей температур по толщине и концентрации, изменяющейся во времени процесса, полученная посредством разработанной математической модели, для слоя 1, 2 и 3 мм, высушиваемого арбузного полуфабриката.

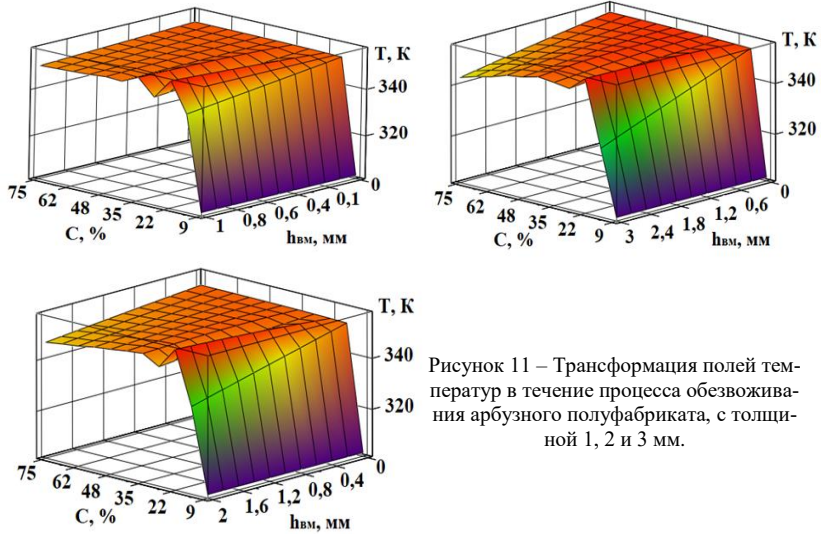


Рисунок 11 – Трансформация полей температур в течение процесса обезвоживания арбузного полуфабриката, с толщиной 1, 2 и 3 мм.

Из полученных графиков (рис. 11) видно, что при любой влажности высушиваемого материала существуют температурные перепады, вследствие инерционности переноса тепловой энергии по объему объекта исследования. Отметим, что на границе контакта материала с предварительно нагретой рабочей поверхностью до $T_{г.п.}$, в начальный момент, наблюдается рост его температуры, стремящийся экспоненциально к температуре $T_{г.п.}$ и впоследствии она принимает ее значения.

Как видно из рисунка 11 рассчитанное распределение температуры не превышало заданных пороговых значений 355°K , необходимых для сохранения пектиновых веществ в высушиваемом арбузом полуфабрикате. Из этого следует, что рекомендованные температурные режимы конвективно-кондуктивной сушки гелеобразной арбузной массы, могут быть рекомендованы для внедрения в производственную практику при производстве съедобных упаковочных материалов.

Учитывая все вышеописанное, а также на основе анализа конструкций установок, предназначенных для сушки геле и пастообразных продуктов, результатов собственных комплексных теоретико-экспериментальных исследований, была разработана конвейерная сушильная установка для получения пленочных структур с рациональными потребительскими свойствами при снижении затрат энергии. Отметим, что предлагаемая установка непрерывного действия (рис. 12), благодаря своим конструктивным особенностям, может быть пригодна не только для осуществления обезвоживания арбузного полуфабриката, но и для сушки подобных продуктов.

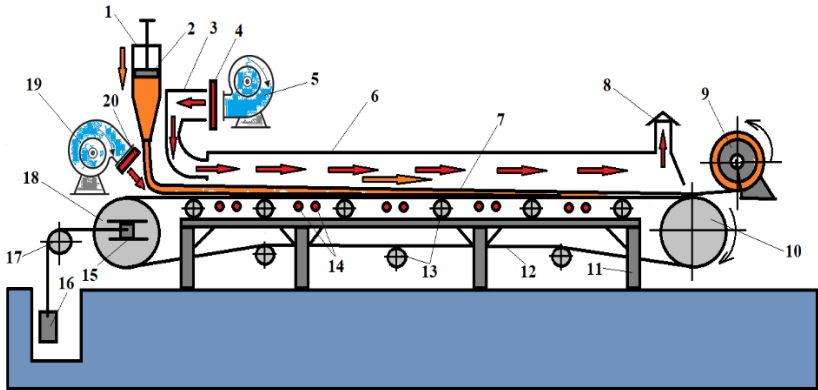


Рисунок 12 – Схема предлагаемой сушильной установки:

1 – приемный бункер; 2 – поршень; 3 – воздухопровод; 4, 20 – калорифер; 5, 19 – вентилятор; 6 – камера сушки; 7 – объект сушки; 8 – воздухоотвод; 9 – барабан-накопитель для готовой пленки; 10 – приводной барабан; 11 – стойки; 12 – конвейерная лента; 13 – ролик; 14 – ТЭНы; 15 – натяжное устройство; 16 – груз; 17 – неподвижный блок; 18 – натяжной барабан

Применение предложенной конструкции для обезвоживания арбузного полуфабриката позволит эффективно проводить процесс сушки, т.к. сушильная поверхность, обладая нагревательными элементами, дополнительно к конвективному, осуществляет кондуктивный энергоподвод к влажному материалу, что значительно уменьшает продолжительность этой процедуры. Влажность готового продукта (пленочного материала) составляет не более 25%, что позволяет хранить его длительное время и использовать в отдельных технологиях пищевой промышленности, где может применяться данный упаковочный материал.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В качестве основных выводов и результатов диссертационного исследования следует отметить:

1. Осуществлен теоретический анализ современного состояния энерго- и ресурсосберегающих технологий процессов и оборудования для получения биоразлагаемых пектиносодержащих пищевых упаковочных материалов из растительного сырья, в частности, из коры арбуза;

2. Обоснована необходимость проведения вспомогательных процедур при получении пектиносодержащего экстракта, введения в него добавок для получения стабильной гелевой основы, а также определены рациональные режимные параметры их проведения в аспекте выработки съедобного пленочного материала;

Основные параметры процесса экстракции:

размер измельченной частицы (кора арбуза) – 2,8...3,9 мм; температура экстрагента (очищенная вода) – $85 \pm 2^\circ\text{C}$; массовое соотношение сырье : экстрагент – 1 : 6; частота ультразвука – $22 \pm 1,65$ кГц; интенсивность ультразвука – ≈ 126 кВт/м²; мощность генератора ультразвука – не более 360 ВА; продолжительность процесса – 4 мин.

Основные результаты процесса экстракции:

концентрация сухих веществ в экстракте – $1,15 \pm 0,05\%$.

3. Определены теплофизические, структурные и гигроскопические параметры полученного арбузного полуфабриката на основе пектинового экстракта, как объекта сушки и проведен ее термодинамический анализ;

4. Обоснован и протестирован оригинальный способ сушки арбузного полуфабриката при конвективно-кондуктивном энергоподводе в рациональном режиме посредством учета степени влияния основных параметров на эффективность операции, получены соотношения для расчета скорости обезвоживания и удельного выхода готовой продукции в сушилке от влияющих параметров;

Основные параметры процесса сушки:

температура подаваемого в сушильную камеру теплоносителя – $100 \pm 2^\circ\text{C}$; температура конвейерной ленты, контактируемой с объектом сушки – $80 \pm 2^\circ\text{C}$; скорость движения воздуха в рабочей камере – $2,5 \pm 0,1 \text{ м/с}$; температура полуфабриката перед сушкой – $30 \dots 50^\circ\text{C}$; начальная влажность полуфабриката – $91 \pm 1\%$; начальная толщина слоя влажного материала – 1; 2 или 3 мм; продолжительность сушки – установлено, что примерное время сушки продукта, при его начальной толщине слоя в 3 мм составляет 3,3 часа, 2 мм – 2,6 часа, 1 мм – 2 часа.

Основные результаты процесса сушки:

конечная влажность арбузного полуфабриката – $25 \pm 1\%$; конечная толщина слоя высушенного материала – 0,35; 0,75 или 1,2 мм.

5. Выявлены специфические особенности формирования внутреннего потока тепловой энергии и массы при кондуктивно-конвективной сушке арбузного полуфабриката, проведено моделирование этого процесса, результатом которого является распределение температуры по глубине слоя в зависимости от его влажности;

6. Выбраны и рекомендованы рациональные конструкции экстрактора и сушилки для практической реализации исследуемых процессов.

Список публикаций по теме диссертации:

Публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Мещерякова, Г.С. Диспергирование арбузных корок, как вторичного сырья, в технологиях пектиносодержащих экстрактов и пленочных структур / Г.С. Мещерякова, А.Х.-Х. Нугманов, И.Ю. Александян, Ю.А. Максименко, Е.В. Соколова // Новые технологии. – 2021. – Т.17, №5. – С. 31-42.
2. Мещерякова, Г.С. Исследование кинетики извлечения водорастворимых компонентов из измельченной коры арбуза столового / Г.С. Мещерякова, А.Х.-Х. Нугманов, И.Ю. Александян, Л.М. Титова, О.В. Золотовская // Индустрия питания. – 2021. – Т. 6, № 4. – С. 16–25.
3. Мещерякова, Г.С. Определение рационального гидромодуля для эффективной трансформации пектиновых веществ из арбузного сырья / Г.С. Мещерякова, А.Х.-Х. Нугманов, И.Ю. Александян, В.Н. Лысова, Н.В. Ширшова // Вестник КрасГАУ. – 2022. – №1(178). – С. 165-172.
4. Нугманов, А. Х.-Х. Термодинамический анализ статических закономерностей влагопоглощения биополимером на базе его гигроскопических характеристик / А. Х.-Х. Нугманов, Г.С. Мещерякова, В.А. Лебедев, И.Ю. Александян, Д.И. Аджей // Известия КГТУ. – 2022. – № 65. – С. 52–65.

Публикации в изданиях, индексируемых БД «Scopus»:

5. Нугманов, А.Х.-Х. Теплофизические параметры арбузного полуфабриката как объекта влагоудаления / А.Х.-Х. Нугманов, Г.С. Мещерякова, В.А. Лебедев, Д.М. Бородулин, И.Ю. Александян, Е.В. Соколова // Техника и технология пищевых производств. – 2021. – Т. 51, № 4. – С. 930-942.

Публикации в иных изданиях:

6. Лебедев, В.А. Зарубежный взгляд на переработку арбузного сырья, как объекта сушки, обогащенного ликопином / В.А. Лебедев, **Г.С. Мещерякова** // *Материалы XLVI-XLVII Международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения»*. – Москва. – 2021. – С. 83-87.
 7. Айсунгуров, Н.Д. Некоторые аспекты в исследовании тепломассообменных процессов пищевого сырья / Н.Д. Айсунгуров, В.А. Лебедев, **Г.С. Мещерякова** // *Материалы VI международной научно-практической конференции «Инновационный дискурс развития современной науки»*. – Петрозаводск. – 2021. – С. 116-120.
 8. **Мещерякова, Г.С.** Оптимальные решения для выбора рационального способа сушки съедобных биополимерных пектиносодержащих гелей / Г.С. Мещерякова, С.В. Мещеряков, А.Х.-Х. Нугманов // *Материалы Международной научно-практической конференции «Междисциплинарность научных исследований как фактор инновационного развития»*. – Уфа. – 2021. – С. 42-45.
 9. **Мещерякова, Г.С.** Особенности пектина из разных растительных отходов / Г.С. Мещерякова, С.В. Мещеряков, А.Х.-Х. Нугманов // *Материалы II Международной научно-практической конференции «Innovation research and strategy»*. – Петрозаводск. – 2021. – С. 91-94.
 10. **Мещерякова, Г.С.** Преимущества производства съедобной полимерной пленки и покрытий из арбузного сырья / Г.С. Мещерякова, С.В. Мещеряков, А.Х.-Х. Нугманов // *Материалы XXVI Международной научно-практической конференции «Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения»*. – Пенза. – 2021. – С. 50-52.
 11. **Мещерякова, Г.С.** Съедобный биополимер из арбузного сырья, как один из путей улучшения экологии / Г.С. Мещерякова, С.В. Мещеряков, А.Х.-Х. Нугманов // *Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Научные исследования – основа современной инновационной системы»*. – Стерлитамак. – 2021. – С. 20-23.
- Свидетельства и патенты:**
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021611624. Программа расчета гигроскопических параметров пищевой продукции и их термодинамический анализ / В.А. Лебедев, А.Х.-Х. Нугманов, Е.В. Фоменко, **Г.С. Мещерякова**, Н.Д. Айсунгуров, И.Ю. Алексанян; заявл. 26.01.2021; опубл. 02.02.2021.
 13. Патент 204304 RU, МПК А23L 3/48. Устройство для сушки ягодного пюре / А.Х.-Х. Нугманов, И.Ю. Алексанян, Л.М. Титова, Н.Д. Айсунгулов, В.А. Лебедев; **Г.С. Мещерякова**. Заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «АГТУ»); заявл. 15.02.2021; опубл. 19.05.2021, Бюл. №14.