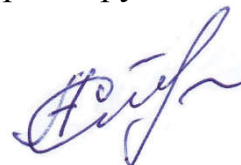


Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Астраханский государственный технический университет»

На правах рукописи



Мещерякова Галина Сергеевна

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

4.3.3. Пищевые системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Нугманов А.Х.-Х.

Астрахань – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
Глава 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНИКИ В ТЕХНОЛОГИИ ПЕКТИНОСОДЕРЖАЩИХ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ НУЖД ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	14
1.1 Анализ существующих классификаций, технологий пленочных структур и их применения в пищевой промышленности	14
1.2 Физико-химические основы пленкообразования пектиновых веществ и перспектива использования арбуза в качестве сырья для производства съедобной пленки	24
1.3 Способы промышленной переработки арбузов в аспекте дальнейшей выработки из них съедобной пленки	32
1.4 Выбор рационального способа сушки, как необходимой процедуры производства съедобной пленки из арбузного сырья и его аппаратурного оформления	44
Глава 2 ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕДУР И ВВЕДЕНИЯ ДОБАВОК С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОЙ ОСНОВЫ ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ПЕКТИНОСОДЕРЖАЩЕГО ПЛЕНОЧНОГО МАТЕРИАЛА	51
2.1 Обоснование применения ультразвука для интенсификации процесса экстракции водорастворимых веществ с учетом степени измельчения исходного сырья	51
2.2 Построение рефрактометрической шкалы оценки доли пектиновых веществ в водном экстракте	61
2.3 Определение рационального соотношения компонентов в гидромодуле для эффективной трансформации пектиновых веществ в водорастворимое состояние	65
2.4 Выявление кинетических закономерностей протекания процесса экстракции водорастворимых веществ из арбузных корок	68
2.5 Обоснование целесообразности использования микроцеллюлозы	

с целью эффективной стабилизации пленочных структур на основе пектиновых экстрактов	75
Глава 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕЛЕВОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ПЕКТИНОВОГО ЭКСТРАКТА, КАК ОБЪЕКТА СУШКИ И ЕЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ	80
3.1 Теплофизические и структурно-механические характеристики арбузного полуфабриката, как объекта сушки	80
3.2 Гигроскопические свойства полученного полуфабриката	96
3.3 Термодинамический анализ статических закономерностей процесса сорбции влаги исследуемым полуфабрикатом	100
Глава 4 ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНО-КОНДУКТИВНОЙ СУШКИ АРБУЗНОГО ПОЛУФАБРИКАТА. ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОЙ УСТАНОВКИ	106
4.1 Исследование кинетики конвективно-кондуктивной сушки полученного арбузного полуфабриката	106
4.2 Анализ механизма внутреннего влагопереноса при сушке объекта исследования	111
4.3 Построение и решение математической модели процесса конвективно-кондуктивной сушки объекта исследования и ее анализ	114
4.4 Описание предлагаемой установки, предназначенной для конвективной сушки арбузного полуфабриката, анализ ее преимуществ перед существующими аналогами	124
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	132
ПРИЛОЖЕНИЯ	154
Приложение А (справочное). Объекты интеллектуальной собственности	154
Приложение Б (обязательное). Акты использования результатов диссертационной работы	156

Приложение В (обязательное). Результаты дисперсного анализа измельченной корки арбуза	158
Приложение Г (обязательное). Результаты экспериментов по построению градуировочного графика, где на оси абсцисс откладывается индекс рефракции	160
Приложение Д (обязательное). Результаты экспериментов по построению градуировочного графика по шкале сахарозы	161
Приложение Е (обязательное). Результат проведенных исследований по выявлению рационального массового соотношения между растворителем и сырьем	162
Приложение Ж (обязательное). Экспериментальные исследования кинетики процесса экстракции	163
Приложение И (обязательное). Результаты экспериментальных исследований по выявлению допустимого общего содержания добавок в пектиновый экстракт	165
Приложение К (обязательное). Результаты экспериментальных исследований по определению плотностных характеристик жидкого полуфабриката и конечного пленочного продукта	166
Приложение Л (обязательное). Результаты экспериментальных исследований по определению теплофизических характеристик объекта исследования	167
Приложение М (обязательное). Результаты экспериментальных исследований по определению теплоемкости объекта исследования при различных влажностях	168
Приложение Н (обязательное). Результаты постановочного эксперимента по определению максимальной скорости сушильного агента	169
Приложение П (обязательное). Экспериментальное изучение гигроскопических свойств объекта исследования	170
Приложение Р (обязательное). Результаты экспериментальных исследований конвективной сушки объекта исследования	172

Приложение С (обязательное). Скриншот программы Mathcad Professional по построению эволюции полей температур по толщине и концентрации, для слоя 1 мм, высушиваемого полуфабриката с конечной толщиной 0,35 мм.

ВВЕДЕНИЕ

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 [126], в этой отрасли существует достаточно нерешенных проблем, влияющих на снижение эффективности промышленной переработки сельскохозяйственного сырья. В этой связи резонна, 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 [73].

Данное направление вызвано интенсивным и спонтанным увеличением использования полимерных упаковочных материалов синтетической природы, что обуславливает перманентный рост отходов, не подлежащих биологической деградации. По этой причине приобретают актуальность задачи разработки и производства современной пищевой упаковки в различных секторах пищевой индустрии, при решении которых уменьшится негативное влияние на внешнюю среду, в частности, посредством существенного падения времени биодеструкции полимерных материалов после их применения. 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 [5]. При этом техническим результатом получения пектино-содержащих пленочных структур является их способность обеспечить ослабление негативного влияния на пищевую продукцию процессов микробиальной порчи, снижение потерь в течение хранения, сохранность показателей качества и безопасности. Следует отметить, что в условиях растущей потребности рынка в пленочных структурах, важным становится вопрос изыскания их новых источников.

В качестве перспективного вторичного ресурса для производства пектино-содержащей 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 [24], а во-вторых, согласно данным Волгоградских ученых [7], 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.

При промышленном производстве пленочных покрытий основной и самой энергозатратной технологической операцией является сушка жидкого биополимера, которая осуществляется при его переработке в готовое изделие и определяет конечные свойства и характеристики итоговой пленочной структуры. Учитывая, что объектом сушки является жидкий биополимер на основе арбузного пектина, то и закономерности процесса сушки следует применять к материалу данной категории.

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 разработанности проблемы.

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 [1], И.М. Литвак [63], Е.В. Сапожникова [121], Л.Б. Сосновский [125], Н.С. Карпович, Л.В. Донченко [34, 35, 44], Г.М. Зайко, М.Ю. Тамова [38, 128], В.А. Компанцев [51], А.А. Кочеткова [54], В.В. Нелина [94, 44], И.А. Ильина [42], Н.В. Сокол [124], З.Н. Хатко [8, 9, 10, 11, 140, 141, 142, 143] и другие. 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, А.С. Mujumdar [176, 181], James R. Couper и W. Roy Penny [156], Gavin P. Towler и Ray K. Sinnott [166] и др. [153, 191,

192]. Среди советских и российских ученых, внесших заметный вклад в развитие теоретических положений и техники сушки растительных материалов это: А.С. Гинзбург [28], А.В. Лыков [64, 65, 66], Г.К. Филоненко [139], П.А. Ребиндер [115], И.Ю. Алексанян [3, 5, 6], А.Н. Остриков [145] и другие.

При изучении и совершенствовании обозначенных процессов и их аппаратного обеспечения основной акцент следует поставить над исследованием и выбором 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 техническое обеспечение недостаточно проработано и обуславливает продолжение исследований в этой области.

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.

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 корки 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 (Приложение А).

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

Методология и методы исследования.

Почти все выводы и рекомендации, приведенные в данной работе, опирают-

ся 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 современные программные продукты, приборную технику и разработанные экспериментальные стенды.

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 (корка арбуза) и их теоретический анализ;
2. результаты выявления специфики механизма тепломассопереноса, исследования статики 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 пози-

циями:

1. удовлетворительной сходимостью ($2 \div 10\%$) данных решения математической модели с результатами натурных испытаний и опытных серий;
2. согласованностью выводов и рекомендаций, приведенных в работе с известными научными положениями и частными научными данными;
3. проведенными опытно-конструкторскими исследованиями, опытом практического тестирования полученных результатов;
4. 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 основном полученные результаты исследований доложены и обсуждены на различных международных конференциях и форумах, в частности: XLVI-XLVII Международная научно-практическая конференция «Технические науки: проблемы и решения: материалы» (Москва, 16 апр. 2021 г.); VI Международная научно-практическая конференция «Инновационный дискурс развития современной науки» (Петрозаводск, 28 июня 2021 года); VI Международная научно-практическая конференция «Fundamental and applied approaches to solving scientific problems» (Уфа, 27 авг. 2021 г.); Международная научно-практическая конференция «Междисциплинарность научных исследований как фактор инновационного развития» (Магнитогорск, 27 авг. 2021 г.); II Международная научно-практическая конференция «Innovation research and strategy» (Петрозаводск, 16 авг. 2021 г.); XXVI Международная научно-практическая конференция «Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения» (Пенза, 25 авг. 2021 г.); Всероссийская научно - практическая конференция «Научные исследования - основа современной инновационной системы» (Тюмень, 06 сен. 2021 г.).

Глава 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНИКИ В ТЕХНОЛОГИИ ПЕКТИНОСОДЕРЖАЩИХ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ НУЖД ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Синтетические полимерные упаковочные материалы имеют сравнительно низкую стоимость и эстетичный внешний вид, но не разлагаются во внешней среде, и по этой причине их полное замещение на экологически безопасную упаковку природного происхождения, в частности, бумажную, маловероятно. До настоящего момента попытки получения и реализации биоразлагаемых полимеров, которые предпринимаются более 3-х десятков лет, не были успешными и в связи с этим появились новые проблемы, для снятия которых необходимо решить ряд сложных научно-технических задач [117, 195]. В частности, съедобные упаковочные материалы и покрытия представляются уникальным типом биологически разлагаемых полимеров, при использовании которых нет необходимости в их сборе и дорогостоящей утилизации. Изначально производство биологически разлагаемых пластиковых материалов предполагалось для вытеснения синтетической полимерной упаковки, и была уверенность в том, что снимут проблему утилизации отходов материалов [117]. По этой причине резонно разрабатывать оригинальные методы выработки высокомолекулярных комплексов при сохранности физико-механических и эксплуатационных параметров известных пластиковых материалов [73, 187, 193].

1.1 Анализ существующих классификации, технологий пленочных структур и их применения в пищевой промышленности

Съедобную биологически разлагаемую субстанцию можно представить, как биополимер, деградируемый, в отличие от микробиального разложения под влиянием грибов или бактерий, под воздействием внутри- и неклеточных ферментных комплексов (экзо- и эндоэнзимов), присутствующих в желудочно-кишечном тракте животных и человека, причем данная субстанция подвергается окислительным и гидролизным реакциям [57].

Обычно съедобная упаковочная продукция имеет форму покрытий, пленок, реже пакетов и листов [154, 163]. Пленки по сравнению с листами имеют иную толщину, так у пленок толщина не превышает 250 мкм, а у листов – больше, чем 250 мкм. К такому виду продукции можно причислить гелевые капсулы мягкой консистенции и покрытия на таблетках твердой консистенции, вырабатываемые из биополимеров [172]. Иногда разницу между покрытием и пленкой не обозначают, подразумевая под ними тонкий слой из съедобного биополимера, нанесенный на пищевой продукт, к примеру, в качестве преграды между ним и внешней средой, и употребляемый в пищу вместе с ним [152, 179]. Обычно в основе классификации съедобной упаковочной продукции, лежит только способ ее производства. Так, сухие съедобные пленки (СП) находятся на поверхности материала или между прослойками ингредиентов материала пищевого назначения. Они могут быть оберткой изделий и служить материалом для изготовления пакетов и даже сумок. Из ряда пленок путем ламинирования может скомпоновать листовый материал. Покрытия в свою очередь наносятся на изделие напрямую из растворов посредством окунания, распыливания или путем намазывания кисточкой, причем они сохнут на изделии. Подобными путями покрытие наносится между прослойками пищевых ингредиентов для исключения их взаимного диффузионного проникновения и сохранности индивидуальных вкусовых ощущений, в частности, в конфетах, пище, пирогах.

Съедобные покрытия, подобно естественным оболочкам плодово-ягодного сырья минимизируют влагопотери, контролируют кислородный и диоксид углеродный обмен, обуславливают стабильность формы продуктов и их качественных параметров. Покрытия, кроме того, обуславливают стерильность продукта и со-

хранность в нем ценных компонентов, особенно летучих субстанций, определяющих аромат пищевой продукции.

В случае применения обозначенных формулировок надо осознавать, что съедобные упаковочные материалы, в основном, являются первичными и преимущественно требуют вторичную операцию упаковывания [17]. Целесообразное применение двойной упаковки может быть проиллюстрировано на естественном опыте, так в апельсине мякоть предохраняется тонкой кожицей и плотной кожурой [178]. В частности, первоначально съедобное покрытие резонно наносить на желированные конфетные и карамельные изделия для исключения их прямого контакта и прилипания к бумажной обертке, которую просто снять в таком случае с изделия.

В современных условиях пленкообразующими субстанциями для выработки СП преимущественно служат полисахариды, такие как крахмал, целлюлозные эфиры, пуллулан, хитозан, камеди, декстрины, альгинаты, пектины, каррагинаны, белки, такие как желатин, коллаген, соевые изоляты, зеин, казеин, глютен, а также липидные вещества, такие как пчелиный, карнаубский воск, пищевой парафин, выработанный из нефтепродуктов, ацетоглицериды, глицериды или их композиции. В отдельных работах [160, 171] рекомендуется замена полисахаридов на расширенную группу гидроколлоидов, к которой кроме полисахаридов, причисляют и гидрофильные полимеры синтетической природы, допущенные к применению в пищевой индустрии, в частности, эфиры на базе полиэтиленоксида. В принципе понятие «гидроколлоиды» – это собирательный термин гидрофильных полимерных комплексов, растворы которых при низкой концентрации и определенных ограничениях имеют гелеобразные характеристики [159]. СП, производимые на базе данных классов химических комплексов, можно классифицировать по ряду признаков. Полисахаридные СП гидрофильны и дают возможность вырабатывать широкий ассортимент композиционных упаковок с учетом того, что в них можно добавить водорастворимые премиксы, к примеру, ароматизирующие и красящие вещества. Они образуют прочные водородные связи с базовым полимером и служат серьезной преградой для кислородного воздействия, однако являют-

ся влагопроницаемыми. Белковые СП тоже гидрофильны и по этой причине, как и полисахариды являются водо- и паропроницаемыми. Липидные СП наоборот являются влагоотталкивающими, но имеют малую механическую прочность [194]. В связи с этим при выработке СП с заданными параметрами резонно применять индивидуальные комплексы для конкретных целей.

С учетом происхождения основных ингредиентов, формирующих СП, вещества можно подразделить на 2 группы: липиды или биополимеры, а также плодовоовощные пюре, мука и др. [150]. Базой СП, содержащих пюре и сок, являются пектиновые компоненты. При выработке СП пищевые ингредиенты изначально обезвоживают путем вымораживания. В частности, в бразильской компании сельскохозяйственных исследований и корпорации Embrapa Instrumentation разработали СП из шпината, гуавы, папайи, помидоров [183], подобные по характеристике пластиковым пленочным материалам.

В аспекте пищевой ценности СП и покрытия делят на усваиваемые, перерабатываемые человеческим организмом в виде питательных субстанций или энергии, и нет, но гигиенически безопасные, которые выводятся из организма совместно с иными шлаками [46]. Усваиваемые СП и покрытия вырабатывают на базе углеводных, белковых и липидных веществ. К неусваиваемым причисляют воск природного происхождения (растительный, минеральный, выделяемый насекомыми и т. д.), растворимые в воде синтетические и натуральные камеди, производные целлюлозы, поливинилпирролидона, поливинилового спирта и т. д. При этом считается, что неусваиваемые покрытия можно съедать в строго лимитированном объеме, приходящемся на 1 кг массы тела в сутки. К примеру, уже в 1980г. пищевой парафин из нефти, был допущен американским управлением по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и лекарственных средств (US Food and Drug Administration, FDA) для получения микрокапсул с ароматом специй для пиццы в замороженном состоянии [186]. По рекомендациям Американской ассоциации производителей плодоовощной продукции при воскообработке 160 тыс. яблок нужно лишь 450 г воска для получения эмульсионного покрытия. Отметим, что отдельные производители упаковочных материалов при ры-

ночной конкуренции, не учитывая негативные последствия, считают СП и покрытия, которые скорей можно причислить лишь к биоразлагаемым, в частности, произведенные на базе воска, шеллака, парафина и т.п. На конгрессе в Брюсселе в 2004г. Еврокомиссия (European Frame-work Regulation) рекомендовала обязать полное информирование потребителей путем маркировки упаковочных материалов, свидетельствующей об их химсоставе. Но множество специалистов посчитало, данное решение [122] приведет не к росту степени безопасности упаковочных материалов, а к нарушению конфиденциальности в плане раскрытия фирменных «ноу-хау».

В этом аспекте для замены шеллака, являющегося смолой природного происхождения, извлекаемой насекомым *Kerria lacca*, и традиционно применяемой для нанесения на шоколадную продукцию для формирования привлекательного глянца, была рекомендована СП на базе масла какао и гидролизованного коллагена. Причем, как выяснилось, данная СП не только усваивается, но и имеет значительную гибкость, является ингибитором кристаллизации сахарозы, что обуславливает рост сроков хранения шоколада [162].

Отметим, что СП и покрытия не должны содержать токсичные и аллергенные ингредиенты, обязаны сохранять устойчивость структуры материала, минимизировать деструкцию при хранении и процедурах транспортировки и обработке, обуславливать полупроницаемость газовой среды, предопределяющей аэробный и анаэробный дыхательный процесс, обеспечивать равновесие газов в упаковочном материале; минимизировать потерю ингредиентов, сохранять питательные, ароматические и органолептические параметры, биохимическую устойчивость материала, предохранять его от загрязнений; улучшать внешнее состояние при технологичном и экономически оправданном производстве.

В 1958г. в США FDA предложило стратегический план, по которому, все без исключения пленкообразующие вещества, применяемые для выработки СП, должны быть безвредными в полной мере, что определяется аббревиатурой GRAS (Generally Recognized as Safe) или в русском контексте ППБ (признанный полностью безвредным). Выдача статуса GRAS осуществляется квалифицированной

экспертной группой или производитель данной продукции самостоятельно осуществляет комплекс исследований, после чего отдает в FDA нужную документацию и ожидает положительного или отрицательного решения. В случае, когда вещество не обладает статусом GRAS, однако производитель в течение продолжительного срока доказал его безопасность, он может претендовать на реализацию данной субстанции на базе самооценки [182]. Основным документом Евросоюза в ареале безопасности пищевых материалов служит Регламент №178/2002 Европарламента и Совета Евросоюза от 28 января 2002 г., которым проводят учреждение Евроагентства по безопасности продовольственной продукции (European Food Safety Agency, EFSA). В РФ данной функцией обладает Госкомсанэпиднадзор.

СП и покрытия из биополимеров, в основном, производят образованием из их водных, а также в смеси с этиловым спиртом, просто в нем или в низкоконтрированной уксусной кислоте, в частности, в случае, когда составе пленкообразующего комплекса есть доля хитозана. В лабораториях СП получают путем нанесения раствора тонким слоем посредством скребка на подложку из стекла, металла или пластика с дальнейшим обезвоживанием [18]. В случае присутствия в комплексе термоплавких субстанций имеется возможность получения СП из расплава.

В промышленных или пилотных аппаратах можно организовать непрерывное формование СП из раствора (solvent casting), в случае, когда раствор сквозь фильеру подается на движущиеся ленту или барабанный узел и далее обезвоживается (dry-spinning, «сухой» способ формования,) или направляется в осадительную емкость с дальнейшей вытяжкой и обезвоживанием («мокрый» способ, wet-spinning), причем возможна отливка СП в формах. Конструктивное исполнение фильеры выбирают с учетом толщины СП и вязкости раствора. Фильеру мажущего типа применяют для растворов с динамической вязкостью 25...35 Па·с, льющего типа – для растворов с вязкостью 12...15 Па·с, а фильерное устройство с валиком – для выработки супертонких СП. При формовке, посредством фильеры [164], важным является метод поступления раствора к ней: под избыточным дав-

лением или самопроизвольно. Преимущественно, отдают предпочтение агрегатам, работающим по принципу формовки текстильного волокна под напором, при этом для СП применяют фильеру не цилиндрической, а щелевой формы. В данном случае присутствует добавочное ориентирование макромолекул полимеры, что обуславливает выработку СП с повышенными механическими свойствами.

Кроме способа фильерной формовки из раствора рекомендуется производство СП посредством экструзии, которая дает возможность более интенсивно и с меньшей энергоемкостью проводить процесс, так как в таком варианте применяют растворы с большей концентрацией, поступление которых проводится посредством одного или двух шнековых узлов [157].

В процессе отливки СП следует учитывать гомогенность формовочных растворов при исключении фазового разделения ингредиентов, кроме вариантов, когда фазовое разделение нужно для образования 3-хслойной СП. Кроме степени гомогенности влияющим параметром служит вязкость и поверхностное натяжение при контакте воздушной среды и раствора [50]. Эти факторы обуславливают сглаживание неровностей, появляющихся на поверхности раствора из-за дефектов выходного фильерного отверстия и присутствия гетерофазных частиц (нерастворенных частиц, твердых премиксов). Следует отметить, что поверхностная гладкость и соотношение поверхностного натяжения и вязкость, влияющие на легкость отделения готовой СП с рабочей поверхности, кроме того существенным в данном аспекте является также соотношение поверхностного натяжения раствора $\gamma_{\text{ж}}$ и подложки $\gamma_{\text{т}}$.

На рисунке 1.1.1 [117, 168] показано влияние $\gamma_{\text{ж}}$ на адгезию СП и рабочей поверхности. В варианте больших величин $\gamma_{\text{ж}}$ при операции нанесении появляется вероятность деструкции непрерывного слоя, что обусловит по завершению обезвоживания пилинг, то есть скатывание или отслаивание готовой СП. Малая величина $\gamma_{\text{ж}}$, при учете, что она снижается при испарении растворителя, тоже не целесообразна, по той причине, что при снижении разницы между поверхностной энергией СП и рабочей поверхности, растет адгезия между ними и усложняется сьем готовой продукции.

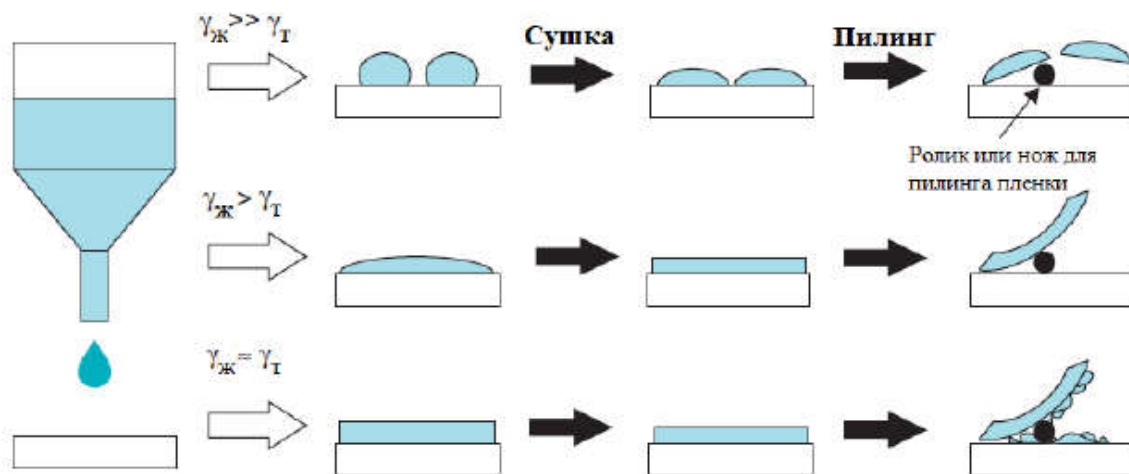


Рисунок 1.1.1 – Влияние поверхностного натяжения раствора ($\gamma_{\text{ж}}$) на адгезию пленки в процессе пленкообразования. $\gamma_{\text{т}}$ – поверхностная энергия плоской твердой подложки такой как барабан или движущаяся лента [117]

Вид подвода тепловой энергии (сухой воздушной средой, перегретой паровой средой, инфракрасное и СВЧ нагревание) тоже существенно влияют на параметры СП. В частности, при обезвоживании СП из белка молочной сыворотки СВЧ излучение не воздействует на паропроницаемость, но обуславливает рост удлинения и прочности СП [173].

В отличие от СП покрытия производят нанесением полимерного раствора на поверхность материала посредством напыления, намазывания кистью, иммерсионным способом с дальнейшим обезвоживанием на поверхности материала.

В процессе выработки композиционных СП или покрытий с заданными барьерными параметрами формовочная среда может одновременно включать гидрофильные полисахариды, белковые комплексы и гидрофобные липидные составляющие. Причем ее подготавливают в форме эмульсии, что сравнительно экономичней, однако снижается прочность СП или производят многослойные покрытия, что удорожает технологию при упрочнении СП. В частности применяют способ «слой за слоем» путем нанесения липидной пленки на белковый или полисахаридный материал. Композитные СП могут производиться путем нанесения белковой пленки на полисахаридную или наслаиванием друг на друга растворов 2-х по разному заряженных полиэлектролитов [184]. Полисахаридные и белковые

комплексы можно смешивать в одном растворителе с дальнейшей формовкой СП из би- или поликомпонентного раствора, где при совместимости полимерных комплексов есть вероятность их распределения на молекулярном уровне друг в друге с формированием истинного раствора, а при исключении термодинамической совместимости, распределение проходит в надмолекулярных структурах [62]. В композициях разнозаряженных макроионов появляется комплексная коацервация, при этом оба компонента взаимодействуют с формированием нерастворимого комплекса и концентрируются в 1-ой фазе.

Двухслойные покрытия рекомендуется применять тогда, когда составляющие СП являются низкоадгезионными по отношению к увлажненной поверхности материала, что свойственно липидам. Двухслойные покрытия снимают данную проблему, однако повышают цену конечного материала. По этой причине применяют бикомпонентные эмульсии с гидрофильной и гидрофобной составляющими, что обуславливает повышение адгезию к материалу для формирования однородного покрытия.

С целью повышения адгезии добавляют пищевые поверхностно-активные вещества, понижающие поверхностное натяжение [161]. Рекомендуется нестандартный подход к нанесению на плодово-ягодное сырье не раствора, а карбоксиметилцеллюлозы в порошковом виде, которая набухает, адсорбируя воду из пор, при этом формируя барьерное покрытие, которое кроме снижения влагопотери, ограничивает кислородное проникновение и варьирование цветовой гаммы материала [104].

Кроме того, в состав комплекса для производства покрытия или СП можно вводить пластификаторы (воду, полиэтилен- или пропиленгликоль, глицерин, сорбитол, кукурузный сироп, сахарозу), и при целесообразности – эмульгаторы (твины, лецитин, (Tweens), спаны (Spans), а также липидные эмульсии (жирные кислоты, съедобные воски), анти- оксидантные и микробные премиксы, вкусовые добавки, витаминные комплексы, красящие вещества и др.

Подчас в комплекс добавляют сшивающие вещества [180]. В частности, в раствор для выработки СП на базе желатина в смеси с глицерином, как пластифици-

котором, добавляют сшивающий агент в виде диальдегидкарбоксиметилцеллюлозы. В итоге растет прочность и термоустойчивость, но снижается степень набухания, удлинения, водопроницаемости ввиду сшивания желатиновых макромолекул. В результате у прозрачных СП появляются барьерные параметры по отношению к ультрафиолетовому излучению. Упаковка материалов в данную СП приводит к росту срока хранения из-за минимизации окислительных реакций по причине воздействия ультрафиолетового излучения.

Более тридцати лет назад впервые опубликована обзорная информация по СП и покрытиям [117, 174], в частности, впоследствии выходят за рубежом монографии [151, 167, 188, 190], защищаются права на интеллектуальную собственность по упаковочным комплексам [117]. В настоящий момент перечень СП на базе полисахаридов [88, 92, 105, 107, 109, 110, 111, 117], белковых комплексов [81, 82, 83, 85, 86, 87, 117], липидных веществ или их композиций [80, 84, 106] достаточно широк.

В современных условиях компании, вырабатывающие СП и покрытия, заполняют ниши, в основном на внутренних рынках и практически не являются друг другу конкурентами.

В России есть привлекательный сырьевой источник – арбуз, который содержит в своем составе большую долю пектина, являющийся основой для производства СП. Пектиновые вещества применяются для выработки СП по причине наличия позитивных параметров, таких как доступность, экономичность и упрощенность технологии переработки.

Итак, из вышеприведенного обзора вытекает, что отдельные биополимеры, в частности пектиновые комплексы, успешно используются в пищевой индустрии для выработки СП и покрытий, что обуславливает актуальность данной разработки.

1.2 Физико-химические основы пленкообразования пектиновых веществ и перспектива использования арбуза в качестве сырья для производства съедобной пленки

Пленкообразование – это операция формирования путем физико-химических преобразований пленочного материала из пленкообразующих субстанций, к которым причисляют моно-, олиго- и полимеры или их комплексы, формирующие пленку, в частности, пектиновые комплексы (ПК), в существенной степени интересные для выработки широкого функционального спектра пленок [142]. К пектинам (*pektos*, с греческого – замерзший, свернувшийся) причисляют класс высокомолекулярных гетерогликанов, присутствующих, как илигнин, целлюлоза и гемицеллюлоза в клеточных оболочках и межклеточных веществ высших растений, а также в соках, растительной природы. Степень водорастворимости ПК растет при росте степени этерификации молекул ПК и снижении молекулярного веса.

Основным параметром, который обуславливает использование ПК в пищевой индустрии, является его способность к гелеобразованию. Гелевая структурная организация пектиновых растворов формируется за счет взаимодействия молекул ПК между собой и обусловлена особенностями их строения – молекулярным весом, уровнем этерификации, характером компоновки карбоксильных групп (рис. 1.2.1). К тому же, на процедуру формирования геля влияют pH и температура среды, а также доля дегидратирующих компонентов.

ПК распространены в природной среде достаточно широко. Они присутствуют в соках и плодах, корнях и стеблях множества растений [12, 142]. Строение пектиновых молекул различных растений могут иметь отличия, обусловленные молекулярным весом, уровнем этерификации, присутствием ацетилированных гидроксильных групп и др.

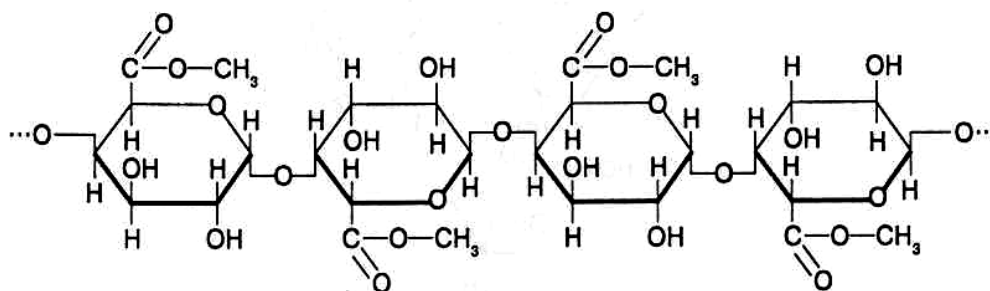


Рисунок 1.2.1 –Молекулярное строение пектина

В современных условиях существует значительный перечень ПК, которые по происхождению можно подразделить на тыквенные, цитрусовые, свекловичные, яблочные и др. [11, 12, 128]. Широко известными иностранными производителями ПК являются: Danisco (Швеция), Cargill (Франция), Pektowin (Польша), Andre Pectin (Китай), Herbstreith & Fox (Германия) [12]. К сожалению, с учетом высокой потребности и функциональных свойств ПК, они до сих пор не вырабатываются в РФ.

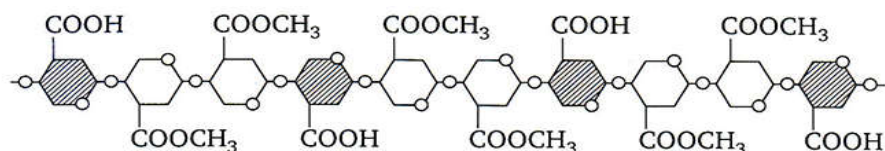
В основном, сырьем для выработки коммерческих ПК, присутствующих в той или иной доле во всех растениях, служат свекловичный жом, а также цитрусовые и яблочные выжимки [60], из которых получают 3-и типа ПК [12, 37] (рис. 1.2.2): высоко- и низкоэтерифицированный (уровень этерификации равен или больше 50% и менее 50% соответственно), амидированный (уровень амидирования не превышает 25%).

Итак, к основным характеристикам ПК можно причислить вязкость, степень растворимости, комплексо- и студнеобразующую способности. Причем степени растворимости и этерификации ПК взаимосвязаны, иными словами при росте последней возрастает первая [12, 37].

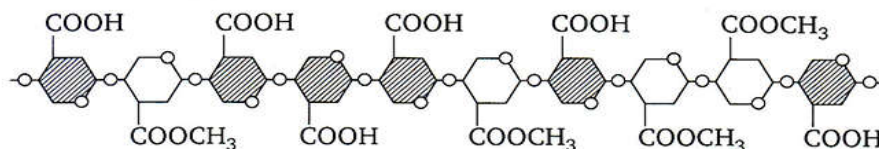
Отметим, что вязкость растворов ПК увеличивается при росте их концентрации [12] и зависит от ряда параметров (уровня этерификации, длины молекулярной цепочки, температуры и способности проводить электроток) [12, 120]. Поэтому ПК используются, как загустители в медицине, пищевой и фармацевтической индустрии и считаются пищевым премиксом E440.

Кроме того, качественным параметром ПК служит их студнеобразующая

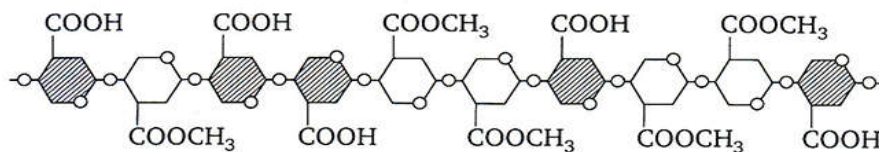
способность, которая обусловлена [9, 10, 12] уровнем этерификации, молекулярным весом, рН и температурой. При большом уровне этерификации ПК могут формировать гели в присутствии кислот и сахаров, однако необходимо обеспечивать условия по значению рН 2,7...3,4 и доле сухого остатка не меньше 50% в гелевой композиции. Необходимо учесть, что при повышении температуры ПК [12] с высоким уровнем этерификации формируют студни интенсивнее.



Высокометоксилированный пектин (более 50% карбоксильных групп этерифицировано метанолом)



Амидированный пектин (менее 50% карбоксильных групп этерифицировано метанолом и менее 25% карбоксильных групп амидировано)



Низкометоксилированный пектин (менее 50% карбоксильных групп этерифицировано метанолом)

Рисунок 1.2.2 – Типы промышленных ПК

Комплексообразующей способностью ПК является возможность связывать и отводить из человеческого организма соли тяжелых металлов, базирующаяся на взаимодействии пектиновых молекулярных структур с ионами тяжелых металлов [12, 14, 21]. Причем, чем больше комплексообразующая способность, тем выше вероятность отвода ПК металлов. Данные параметры ПК [12, 52, 55] обусловлены долей свободных карбоксильных групп и следственно уровнем их метанолом [12, 48, 170].

ПК [12, 142] из свекловичного жома, содержат примерно 10% пектина. Специфическими признаками ПК, выработанных из свекловичного жома, являются низкий уровень этерификации и высокие комплексообразующие характеристики

[12]. В частности ПК, выработанный из корзинок подсолнечника при концентрации раствора 1,5% и pH 1,8...2,0 связывает 28,5% стронция, свекловичные ПК при тех же условиях связывают 36...64% от общей массы введенного стронция [12, 71]. По этой причине ПК целесообразно применять при получении профилактических пищевых материалов [12, 15, 22].

В конце XX столетия были исследованы различные кисломолочные продукты [12] с добавлением в них ПК (свекловичных и тыквенных) и их концентрирования, причем обнаружено, что с увеличением концентрации ПК комплексообразующая способность данных продукта увеличивается. Выявлено, что при увеличении концентрации ПК растет их антибактериальная способность из-за постепенного влияния на микрофлору, ввиду чего рост популяции бактерий замедляется [12, 140, 142].

Выявлена антиоксидантная способность ПК, которая заключается в их возможности препятствовать радикальному окислению высокомолекулярных и органических комплексов, и, таким образом, уменьшать выход [12] продуктов такого окисления: гидроперекисей, спиртов, жирных кислот, кетонов и альдегидов. Антиоксидантный комплекс связывается со свободным радикалом и формирует преграду деструктивному воздействию лишнего электрона [12, 108]. Обосновано, что в течение оксидантного стресса наблюдается изменение клеточных структур в человеческом организме. Подача антиоксидантов с пищевыми материалами, лекарственными препаратами антиоксидантного воздействия, премиксами биологически активного характера может минимизировать оксидативный стресс и существенно уменьшит его влияния на организм, что наблюдается за счет негативного влияния свободных радикалов [12, 91]. Изучена антиоксидантная способность водных растворов яблочных и свекловичных ПК, обнаружено, что она в водной среде больше у высокоочищенных свекловичных ПК по сравнению с яблочными [12]. Отметим, что водные растворы ПК травянистых растений имеют ярко выраженную антиоксидантную способность, которая обусловлена долей в них фенольных комплексов [8, 142].

В связи с этим представляет интерес изучение антиоксидантной способно-

сти различных ПК и их композиций для обоснования применения ПК в разработке СП.

Уже было отмечено, что в России есть привлекательный сырьевой источник – арбуз (*Citrullus Forsk*), который содержит в своем составе большую долю пектина и бывает следующих типов [123]:

- столовый (*C. vulgaris Schrad*);
- кормовой (*C. colocynthoides Pang*);
- пустотелый дикий (*C. colocynthis (L.) Schrad*).

Максимально распространенными типами служат арбуз столовый и далее кормовой. Дикий же привлекателен лишь для решения селекционных задач [16, 17, 123].

В структуре корки эпидермис контактирует снаружи со сплошной кутикулой, под ним находится хлорофиллоносный или бесцветный клеточный слой из 8...10 прослоек, ниже которого располагается панцирь, который всесторонне окружает плод и скомпонован из толстостенных склеренхимных клеток [19, 123]. Еще ниже находится мякоть с семечками.

Столовый арбуз менее массивен по отношению к кормовому и число плетей у него в 3...4 раза меньше. Длина основной плети у кормового арбуза может достигать 10 м. Его мякоть плодов имеет белый цвет, несладкая и практически несъедобная, однако в африканских странах его подчас употребляется в пищу после варки [123]. Для сравнения были взяты два, а именно, столовый и кормовой сорта арбузов (табл. 1.2.1).

Арбузные ягоды являются высоковлажными при влагосодержании 88,0...97,5%. В столовом арбузе доля сахаров достигает 90% к массе сухого остатка мякоти в кормовом – 12...25%.

Из иных составляющих углеводного комплекса в арбузе присутствуют ПК, гемицеллюлоза и клетчатка при малой доле органические кислоты, белковых и липидных веществ.

Таблица 1.2.1 – Арбузный химсостав [123]

Виды арбузов	Вода, %	Общая сахаристость, %	В % на сухую массу			
			Пектины	Геми-целлюлозы	Клетчатка	Сумма геми-целлюлоз и клетчатки
Арбуз столовый	88...92	8...12	0.40...0.68	0.80...0.85	0.51...0.54	1.31...1.39
Арбуз кормовой	96...97.5	2.5...4	13.60...20.0	8.90...8.96	10.85...10.9	19.75...19.81

В основном углеводная составляющая столового арбуза содержит сахара, такие как сахароза, фруктоза и глюкоза (табл. 1.2.2). В ягодах кормового арбуза они отсутствуют или отмечается их незначительное содержание [49, 123]. Интенсивность накопления сахаров в арбузах различна (табл. 1.2.3). Первоначально в столовых сортах формируется в основном глюкоза, а при созревании начинает превалировать фруктоза, а далее и особенно при хранении, растет доля сахарозы [123].

Таблица 1.2.2 – Состав сахаров, % [123]

Виды арбузов	Общая сахаристость	Глюкоза	Фруктоза	Сахароза
Арбуз столовый	5.50...10.60	1.08...2.76	1.15...4.64	0.5...5.4
Арбуз кормовой	1.15...2.60	0.50...1.50	0.35...1.25	0.0...0.4

Надо учесть, что сахаристость бахчевых культур существенно обусловлена воздействием климатических условий с состоянием почвы в ареале их выращивания.

Кроме сахаров в углеводном комплексе содержатся ПК, так в кормовых сортах они являются преобладающей составляющей сухого остатка. Наличием ПК обусловлена вязкость их сока и мякоти, причем сок кормовых сортов интенсивно образует студенистую субстанцию [123].

Таблица 1.2.3 – Интенсивность накопления сахаров при созревании арбуза столового [123]

Возраст плодов в днях	В процентах на массу сока			
	общая сахаристость	глюкоза	фруктоза	сахароза
1	2.59	2.59	0	0
15	3.68	1.69	1.69	0
35	7.16	2.94	4.22	0
50, зрелые	6.53	2.52	3.48	0.73

J.T Rosa в 1928 г. изучил долю ПК на различных этапах созревания ягод столовых и кормовых сортов (табл. 1.2.4) [123, 189]. Как следует из данных таблицы доля ПК в кормовом сорте в 15...20 раз больше, чем в столовом.

Интересными являются данные по доле масла в арбузных семечках, которая варьируется в интервале 48,4...56,0% [39, 123]. Число омыления масла – 189,7, а йодное число – 121,1 [123].

Таблица 1.2.4 – Доля ПК в зависимости от зрелости арбуза, в % на сырую массу [123]

Виды арбуза	Очень незрелый	Незрелый	Зрелый	Перезрелый
Арбуз столовый	0.088	0.084	0.098	0.087
Арбуз кормовой	1.316	1.582	1.686	1.609

Систематизация известных исследований приводит к выводу о том, что переработка столовых сортов мало изучена. Из арбузного сока можно производить патоку, мед, повидло и сироп, а из корки – цукаты. Кормовые сорта преимущественно скармливают скоту, но иногда используют для производства цукатов. Целесообразно принять во внимание то, что посевные площади для арбузов значительны в астраханском регионе. Причем при сравнительной простоте выращивания и большой урожайности арбузы обладают низкой стоимостью, что дает возможность при значительной доле ПК (до 36% на сухой остаток) [123] считать кормовые сорта наиболее перспективным источником ПК.

В процессе переработки столовых сортов скапливается значительное количество корок, которые в современных условиях применяются только для скармливания скоту или как органическое удобрение почвы. Доля ПК в них варьируется в интервале 3,4...3,7% на сухой остаток [123]. При существенных производственных объемах столовых сортов их можно считать одним из перспективных объектов для выработки пектиносодержащих СП.

Как было уже отмечено, ПК причисляют к полисахаридам, и они служат хорошими пленкообразователями, т.к. их молекулы скомпонованы из множества мономерных повторяющихся звеньев, что определяет структуру полимеров (рис. 1.2.2). ПК включают больше 2-х различных мономеров в основные цепочки по

этой причине в аспекте пространственного размещения атомов их причисляют к сополимерам [143]. Важными стадиями формирования полимерного комплекса служат растворение ингредиентного состава, формирование истинного раствора, набухание ингредиентов, формирование геля и его сушка при соблюдении температурных ограничений.

Для формирования полимерного раствора надо выбрать растворитель для формирования коллоидного раствора [12, 40]. Чаще всего для растворения ПК используют водную среду, глицерин и фосфорную кислоту.

Растворение ПК происходит в следующей последовательности. При температурном росте раствора наблюдается набухание ПК, которые оседают в органических средах, к примеру, в спирте [12, 141, 169]. При растворении ПК, наблюдается первоначально набухание, при котором макромолекулы не успевают транспортироваться в водную фазу [96, 99, 142]. Композиция полимерной субстанции и растворителя носит названия геля или студня [12]. Отличительной особенностью гелей по отношению к концентрированным растворам служит то, что в растворах перманентно происходит деструкция и формирование сеток под воздействием теплового движения, т.е. присутствуют колебательные трансформации [12], а в гелях сетки стабильны и не деструктурируют под влиянием теплового движения [12, 142].

Относительно деструкции ПК отметим, то она интенсифицируется при контакте с ионом хлора и росте температуры более 100°C [12, 40]. Водорастворимость ПК снижается при росте уровня полимеризации [142] и увеличивается при росте уровня этерификации. ПК с высоким метоксильным числом и с низкой молекулярной массой легко подвергаются растворению [12, 95, 97].

Качественным параметром ПК служит их способность к формированию гелей, которая зависит от вышеобозначенных параметров и, кроме того, от доли балластных веществ [12]. Полярность ПК обусловлена их структурной организацией, чем больше уровень этерификации пектиновой молекулы, тем меньше ее родство с растворителем и ниже полярность. Данные ПК имеют высокую склонность к ассоциации и потому большую гелеобразующую способность [12, 142].

ПК, как натуральные пленкообразователи способны формировать пленочные структуры при заданных условиях нанесения их на рабочую поверхность и обезвоживания. За базу формирования пленок взяты теоретические положения структурно-фазовых преобразований адсорбционного материала [174, 177]. Пленкообразование из дисперсий ПК в водной среде – это процедура устранения границы между ПК и средой при удалении дисперсионной фазы. Пленкообразующая способность дисперсий повышается при росте степени диспергирования материала и при внесении небольшого объема растворителя, структурообразователя и пластификатора [112, 42].

Итак, определяющими параметрами пленкообразования служат физические, химические характеристики ПК, их комбинирование и долевое соотношение с добавками.

1.3 Способы промышленной переработки арбузов в аспекте дальнейшей выработки из них съедобной пленки

Сотрудники Волгоградского государственного аграрного университета предложили оригинальную безотходную технологию обработки такой бахчевой культуры как столовый арбуз. Урожай арбузов, в значительном количестве (около 15% от всех выращенных), не собранный по причине несоответствия качественным стандартам, вызвал у них особый интерес. Экспертно-аналитическим центром агробизнеса «АБ-Центр» предоставлена информация о том, что в РФ в 2016 г. выращено 924 тыс. тонн арбузов, в 2015 году больше миллиона тонн [7]. Что касается периода 2017...2019г.г., то точных данных найти не удалось, но учитывая спрос на данный вид бахчевой культуры, вероятнее всего уровень выращивания арбузов находится в пределах одного миллиона тонн. Если поверить данным

Волгоградских ученых, то невостребованной продукции остается около 150 тыс. тонн, а это выброшенные ресурсы, используя которые можно получить различные, и при этом, востребованные на рынке пищевые продукты, в том числе, и глубокой переработки, тот же ликопин. Основным плодородным ареалом РФ считается астраханский регион (250 тыс. тонн в 2016 г.), далее идут Волгоградский, Оренбургский, Саратовский, Ростовский, Дагестанский и Краснодарский регионы [7].

Сотрудниками Волгоградского государственного аграрного университета была разработана установка для безотходной обработки арбузного сырья с отделением семечек [103]. Агрегат скомпонован из бункерного узла, находящегося в нем устройство для деструкции плодов и устройства для отделения семечек из диспергированного вороха, резервуара для сока и мякоти, конвейера для сбора и отведения корок, емкости для мойки ягод (рис. 1.3.1).

Переработка арбузов происходит в следующей последовательности. Предварительно арбузы с поля транспортируются к резервуару для приемки и моечной операции ягод посредством водоструйных устройств и далее выгружаются в него.

Водная среда в резервуаре перманентно подвергается очистке посредством водоструйных устройств. Из резервуара арбузы захватываются погружным конвейером лоткового типа, снабженным приводным устройством и поступают в бункерный узел, где находится устройство для деструкции ягод в форме эксцентрикового ножевого барабанного узла. Ножевые элементы режут по вертикали ягоды, а ребра режут их по горизонтали, что обуславливает возможность шнековому протирачному узлу осуществлять отделение от коры семечек, соковой фракции и мякоти, причем они сквозь отверстия решетчатого подбарабанного элемента поступают в перфорированный кожух протирачного шнекового узла для отведения семечек. 2 шнековых узла осуществляют перемешивание диспергированной биомассы и отделяют корку и семечки от соковой фракции, и мякоти. Корка посредством отгрузочного конвейера поступает в тележку для транспортировки корок или на кормовые цели или на последующую обработку. Семечки поступают посредством конвейера в резервуар для их сбора и далее поступают на после-

дующую обработку. Соковая фракция и мякоть направляются в специальный резервуар и перерабатываются на нардок или диетическое питание.

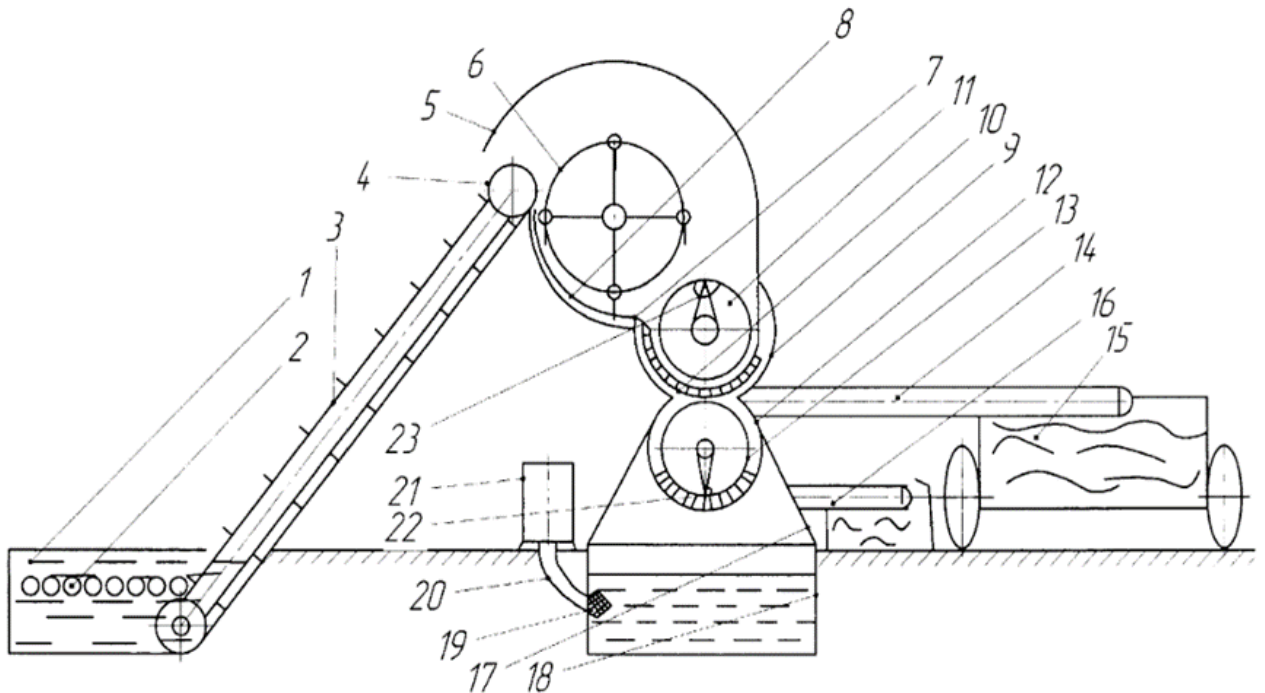


Рисунок 1.3.1 – Установка для безотходной переработки плодов арбузов:

- 1 – емкость для приема и мойки плодов с помощью водоструйных аппаратов;
 2 – водоструйные аппараты; 3 – погрузочный лотковый транспортер; 4 – приводной блок; 5 – бункер; 6 – эксцентриковый ножевой барабан; 7 – ребристое подбарабанье; 8 – ребра; 9, 12 – кожухи; 10 – решетчатое подбарабанье;
 11 – протирающий шнек; 13 – отверстия шнека; 14 – транспортер отгрузки;
 15 – тележка; 16 – транспортер отгрузки семян; 17 – боковины кожуха 12;
 18 – емкость для сбора сока

Наибольший интерес представляет установка, разработанная другими сотрудниками того же аграрного университета для безотходной технологии обработки арбузного сырья [102]. Агрегат представлен на рисунке 1.3.2. Представленное изобретение относится к сельскохозяйственному машиностроению и может быть использовано в установках для получения сока, мякоти, а также цукатов, при этом авторы предлагают корку плодов арбузов использовать в виде корма для животных.

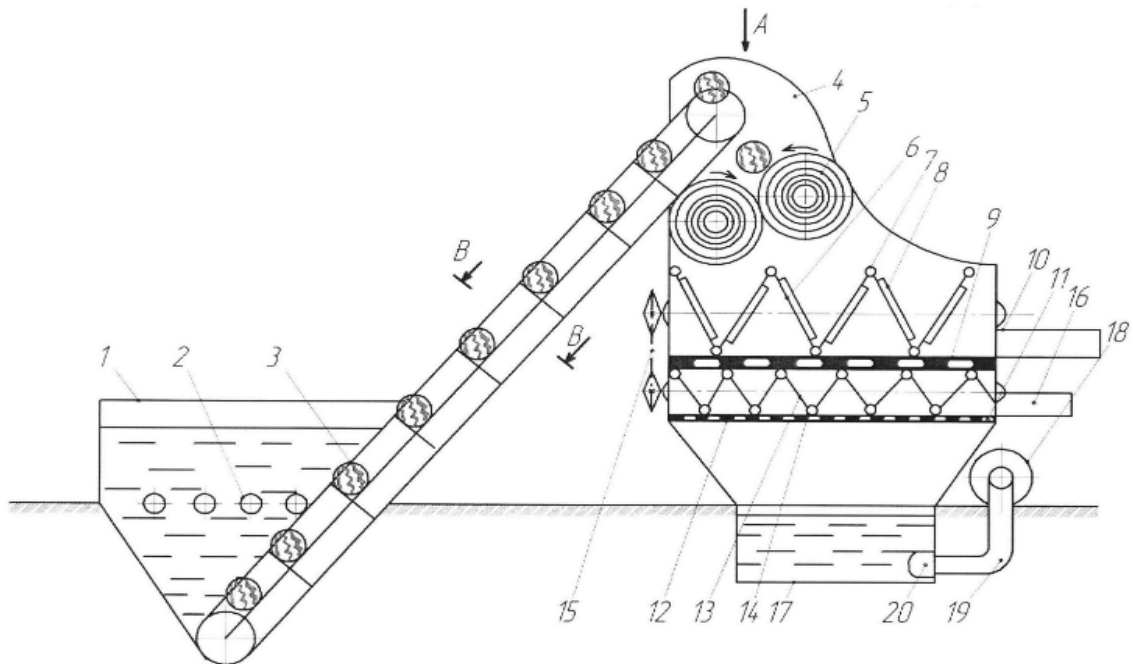


Рисунок 1.3.2 – Установка для безотходной технологии переработки плодов арбузов:

1 – ванна для мойки; 2 – водоструйные аппараты; 3 – лотковый транспортер; 4 – бункер; 5 – приспособление для разрушения плодов; 6 – протирачный шнек; 7, 14 – эластичное покрытие; 8 – очистные лопатки; 9 – кожух; 10 – отгрузочный транспортер; 11 – шнековый транспортер; 12 – решетчатое дно; 13 – наружная кромка витков; 15 – цепная передача; 16 – транспортер отгрузки семян; 17 – емкость со скатными плоскостями; 18 – насосная установка; 19 – всасывающий трубопровод; 20 – фильтр.

Установка для безотходной технологии переработки плодов арбузов, представленная на рисунке 1.3.2, работает в следующей последовательности. Арбузное сырье для обработки транспортируется посредством самосвалов и загружаются в емкость для мойки, водоструйные устройства формируют высоконапорные струи, обуславливающие тщательную процедуру мойки и посредством конвейера лоткового типа поштучно поступают в устройство для деструкции ягод. Посредством, осуществляющих встречное вращение ножевых барабанных узлов проходит димпергирование ягод на куски прямоугольного сечения, которые направляются в кожух шнекового узла для протирки, где осуществляется их перемешивание и отделение от корки соковой фракции, семечек и мякоти посредством очист-

ных лопаток. Шнековые витки обуславливают подачу корки на конвейер для ее отведения. Соковая фракция, мякоть и семечки сквозь перфорации решет боковых и донных стенок шнекового узла для протирки подаются во внутреннее пространство шнекового конвейера. Сквозь перфорации стенок и дна конвейера осуществляется прохождение соковой фракции и мякоти, поступающим по наклонным стенкам в резервуар для их сбора, из которого сквозь фильтр и всасывающую трубу, захватываются насосной станцией и поступают на последующую обработку. Очищенная корка используется для производства цукатов, или скармливается скоту. Семечки посредством конвейера поступают на мойку, высушивание и могут применяться для посева или в качестве сырья для арбузного масла.

Таким образом, используя установку, представленную на рисунке 1.3.2 или 1.3.1, можно реализовать процедуру механического разделения арбузов, не соответствующих по тем или иным показателям контроль качества для продажи в торговых сетях страны, которых как уже было отмечено, скапливается на полях порядка 150 тысяч тонн.

При выработке множества пектиносодержащих материалов осуществляется растворение пектинового порошка, что связано с определенными трудностями по причине высокой гигроскопичности и комкования ПК при взаимодействии с водной средой [35, 123]. Устранить этап растворения ПК возможно путем выработки жидких пектиновых экстрактов.

Экологически безопасная технология пектиновых экстрактов позволяет применять их как готовую продукцию профилактического питания или как полуфабрикат для получения пленочных пектиносодержащих структур.

Данные, проведенные в публикации [17] свидетельствуют о том, что выработка жидких экстрактов должно проходить определенные технологические этапы, обозначенные на рисунке 1.3.3.

По приведенной технологии сырье диспергируется в стружку с размерами 15...20 мм на 0,5...1,0 мм, посредством овощерезок, снабженных дисковым узлом с плоскостями гребенчатых ножевых элементов. Далее сырье подается в агрегат с мешалкой, где оно контактирует с гидролизующей жидкой средой для осу-

ществления гидролиза и экстракции ПК.



Рисунок 1.3.3 –Этапы выработки пектинового экстракта из арбузов [80]

В работе обоснованы [123] наименьшая концентрация лимонной кислоты в гидролизующей жидкой среде, при которой наблюдается высокая доля ПК в экстракте. Для осуществления кислотного термогидролиза рекомендуется поддерживать рН гидролизующей жидкой среды – 2.5, температура – 75°C, длительность операции 150...180 минут при гидромодуле 1:2. При гидролизе и экстракции гидролизную композицию перемешивают после загрузки в агрегат, а также 1...2 минуты через каждые 30 минут при частоте вращения перемешивающего устройства 10 об/мин.

По завершении операции гидролизную композицию охлаждают до 20...25°C и далее гидролизат посредством насоса разделяют на сите и далее на стекателе. Пектиновый экстракт поступает в напорный резервуар и далее на операцию фильтрования, которая осуществляется для удаления механических взве-

сей посредством мешочных фильтров и далее на сепараторе.

По завершении сепарации имеем экстракт с долей ПК 0,45...0,50%, который можно применять для профилактического питания. При применении пектинового экстракта для получения пленочных пектиносодержащих структур проводят его концентрирование. Процесс концентрирования пектинового экстракта до содержания в нем пектиновых веществ 1,0...1,2 целесообразно проводить в вакуум выпарных аппаратах.

Выработанный экстракт является вязкой однородной жидкой средой со вкусовыми ощущениями, ароматом и цветовой гаммой, свойственными исходному сырьевому материалу.

По физико-химическим параметрам (табл. 1.3.1) экстракт сравним с экстрактами из цитрусовых и яблочных выжимок, свекольного жома. Из табличных данных следует, что экстракт из кормового арбуза при низкой доле растворенного сухого остатка (1,7%), обладает сравнительно большим содержанием спиртоосаждаемых ПК (1,0%), что на 40...50% больше по сравнению с экстрактами из свекольного жома и яблочных выжимок.

Таблица 1.3.1 – Физико-химические параметры пектиновых экстрактов [123]

Наименование показателя	Экстракт из кормового арбуза	Экстракт из яблочных выжимок	Экстракт из свеколовичного жома	Экстракт из цитрусовых выжимок
Массовая доля сухих веществ	1.70	2.70	3.00	6.00
Массовая доля спиртоосаждаемого пектина, %	1.00	0.70	0.75	1.50
рН экстракта	3.25	3.25	3.00	2.70
Прочность 2 %-го студня, кПа	60.00	53.00	40.00	53.00
Комплексообразующая способность, мг Pb ²⁺ /г	182.50	34.40	153.00	25.60

Жидкий экстракт, как и сухой из кормового арбузного сорта имеет уникальные характеристики, в частности высокие комплексо- и студнеобразующие способности.

Анализируя вышеизложенную технологию пектинового экстракта из арбузного сырья можно предположить, что продолжительность процесса гидролиз-экстрагирования по способу [123] с наложением ультразвука, даже при мини-

мальном гидромодуле, будет существенно выше, учитывая структурные особенности объекта обработки, что, конечно же, требует экспериментальной проверки.

Следовательно, необходимость проведения исследований по разработке новой усовершенствованной технологии получения пектиновых экстрактов из корок столового арбуза и его аппаратного оформления очевидна, актуальна и имеет важную научно-практическую значимость.

Эффективность применения ультразвукового воздействия обусловлена влиянием ряда параметров, которые приведены на рисунке 1.3.4.



Рисунок 1.3.4 – Эффекты ультразвукового влияния на операцию экстрагирования

Изданных ряда исследователей следует, что в случае применения ультразвукового излучения присутствует существенная интенсификация операции по отношению к иным методам экстракции, что определяется ростом межфазной поверхности и коэффициентов массопередачи и массообмена [114, 135, 146, 147].

В случае применения ультразвукового излучения в жидкости появляется знакопеременный ультразвуковой напор, обуславливающий прохождение жидкой среды в капилляры и трещинки экстрагируемого материала, а также интенсивные течения: кавитационный эффект и звуковой ветер. Рост скорости экстрагирования, также как и диффузионного коэффициента обусловлен величинами амплитуды и частоты вынужденных колебаний жидкой среды.

Под влиянием ультразвуковых волн снижается вязкость полярных жидких сред, пустоты и микротрещины твердой фазы разветвляются и растут их размеры. Представляя гидродинамическую обстановку в среде, отметим, что в единичной трещине (капилляре) наблюдаются 3 характерных участка: с турбулентным перемещением жидкой среды, с вязкой и диффузионной прослойками [146, 149].

У кромки незамкнутой трещины при быстром перемещении жидкой среды наблюдается турбулентность в микроскопических потоках и далее вихревой срыв. В данном случае процедура растворения твердого вещества определяется турбулентным диффузионным коэффициентом. Продвигающиеся из 1-ого на 2-ой участок турбулентные пульсации способствуют массопереносу экстрагируемой субстанции. На 3-ем участке массоперенос и обмен определяется хаотичным перемещением молекул. Поперечные и продольные габариты трещин служат основными параметрами, влияющими на процедуру растворения. При появлении ультразвукового переменного напора ($\pm 5 \cdot 10^5$ Па) в жидкой среде микротрещины наблюдаются тангенциальные колебательные смещения вдоль стенок микроскопических объемов растворителя, которые трансформируются в направленное перемещение жидкости. В общем, происходит замена молекулярной диффузии на интенсивный конвективный перенос вещества.

Мощное ультразвуковое воздействие приводит к существенному росту интенсивности пропитки капиллярно-пористых объектов, что обусловлено увеличением высоты подъема жидкой среды, которая зависит от диаметра сечения капилляра и звукового напора, который при любом положении источника ультразвуковых волн всегда ориентирован по нормали к капиллярному сечению.

Продолжительность продвижения экстрагента обусловлена интенсивностью вытеснения воздуха из клеточного пространства, т.е. величиной капилляропроводности материала, но множество капилляров находятся внутри пачек и фибрилл, не выходя за их пределы. В таком случае воздух удерживается в капиллярах до растворения в экстрагенте, причем часть воздушной среды в пузырьках разной формы остается во внутриклеточном пространстве. Ультразвуковые волны, формируя звукокапиллярный эффект, не только интенсифицируют вытесне-

ние воздушных пузырьков, но и создают предпосылки для растворения воздуха в жидкой среде, создавая разрежение, то есть эффект губки. В итоге длительность замачивания материала под влиянием ультразвуковых колебаний существенно уменьшается. Посредством ультразвукового воздействия при $0...25^{\circ}\text{C}$ отодвигается граница растворимости для труднорастворимых и нерастворимых субстанций, при этом концентрация насыщения может быть больше известных в 5...30 раз [114, 135, 146, 147].

Что касается конструкторских решений по организации непрерывной ультразвуковой экстракции, то на этот счет существует несколько запатентованных полезных моделей. Предлагается экстракционная установка противоточного типа для материалов растительной природы [89], показанная на рисунке 1.3.5.

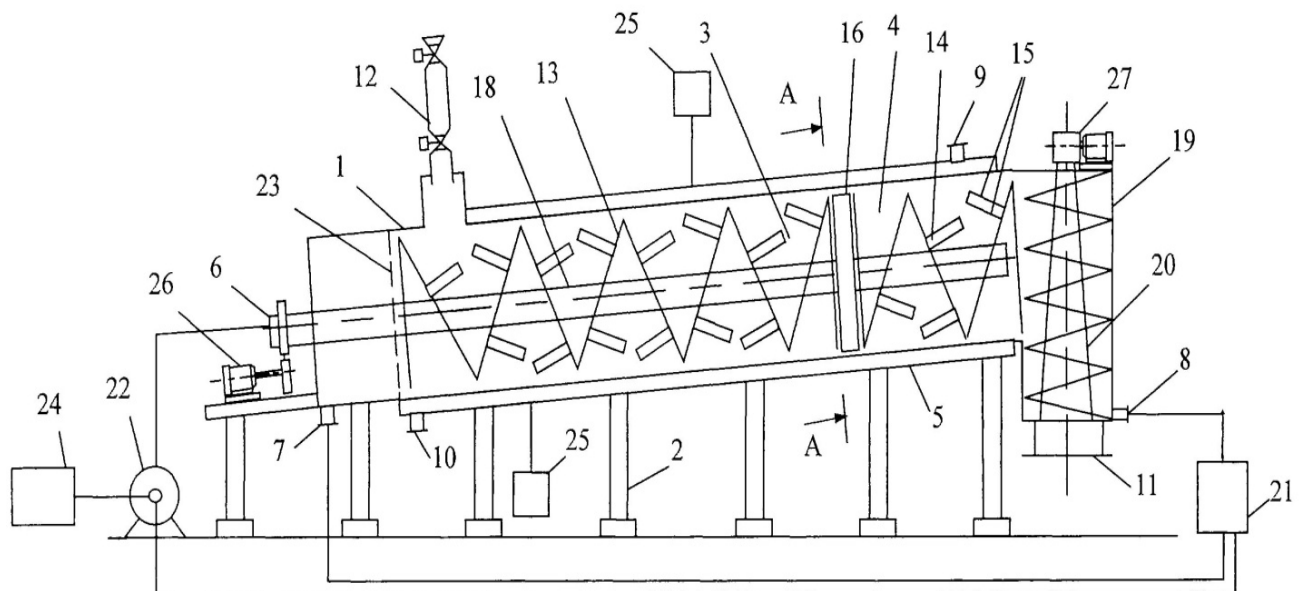


Рисунок 1.3.5 – Схема противоточного экстрактора для растительного сырья:
 1 – корпус; 2 – опоры; 3 – первая секция; 4 – вторая секция; 5 – тепловая рубашка;
 6 – патрубок подачи экстрагента; 7 – патрубок выгрузки первичного экстракта;
 8 – патрубок отвода вторичного экстракта; 9, 10 – патрубки ввода и вывода тепло-
 вого агента; 11 – нижний отсек вертикальной колонны; 12 – дозатор; 13 – шнек;
 14 – лопасти в виде ножей; 15 – боковые режущие кромки; 16 – барботер; 17 – от-
 верстия на барботере; 18 – вал шнека; 19 – вертикальная колонна; 20 – прессую-
 щий шнек; 21 – сборник экстракта; 22 – вакуум насос; 23 – решетчатая перегород-
 ка; 24 – емкость для экстрагента; 25 – генератор ультразвука;
 26, 27 – привода

Посредством шнековых лопастей в форме ножевых элементов с боковыми режущими кромками, имеющих прямоугольное сечение, осуществляется разрыхление и диспергирование композиции, что обуславливает рост выхода готового материала и интенсивности операции экстракции. Рост скорости операции наблюдается по причине увеличения поверхности фазового контакта и уменьшения диффузионного сопротивления, что обуславливает нарушение структуры исходного материала, которое осуществляет полый шнековый узел 1-го отсека с установленным на нем барботажным устройством. Деструкция осуществляется под влиянием, формируемых в композиции экстрагентных струй, выходящих из отверстий барботажного устройства в противоточном режиме к подаваемому исходному материалу и ультразвукового воздействия. Решетчатая переборка в наклонной колонне и прессующий шнековый узел в вертикальной колонне способствуют выработке чистого экстракта.

При сравнительной надежности работы и высокой производительности такого агрегата он обладает большой металло- и энергоемкостью, а также громоздкостью. Удельный выход готового материала данных агрегатов (на единицу массы или объема установки) сравнительно мал, что определяется небольшой интенсивностью обтекания частичек и размером поверхности контакта фаз, который снижается по причине «проскакивания» жидкой чреды и расслоения фаз из-за перемещения твердого вещества в плотном слое в нижнем отсеке корпуса. К тому же для максимально полного извлечения целевых компонентов из растительного материала целесообразно высокоскоростное влияние на него, способствующее на противоточном участке формировать заданные гидродинамические градиенты. В таком исполнении, даже с учетом высокой скорости продвижения ультразвукового фронта, это не наблюдается.

В этом плане интересно устройство [98], которое представлено на рисунке 1.3.6. На участке рабочего пространства данного аппарата между трубой контейнера и его стенками наблюдается наибольшая скорость распространения ультразвукового фронта посредством волнового наложения при многократном отражении волн от внутренних поверхностей камеры и трубы и вращательного движения

контейнера.

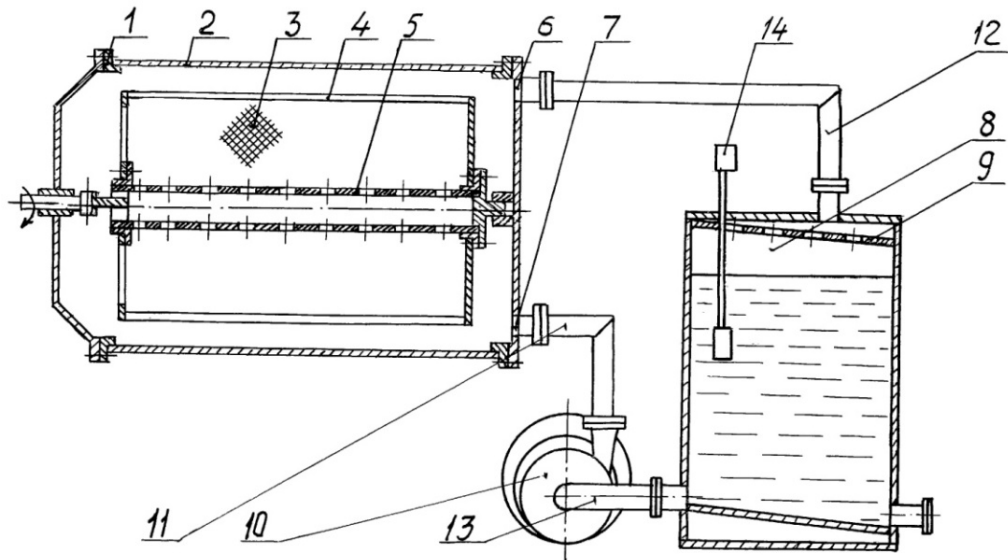


Рисунок 1.3.6 – Схема ультразвукового экстрактора для растительного сырья:
 1 – рабочая камера; 2 – плоский генератор ультразвука; 3 – полый контейнер;
 4 – внешняя цилиндрическая стенка контейнера; 5 – перфорированная труба;
 6, 7 – верхний и нижний патрубки рабочей камеры; 8 – съемная емкость;
 9 – рассекатель жидкости; 10 – насос; 11, 12, 13 – трубопровод; 14 – погружной датчик концентрации конечного продукта

Наружная цилиндрическая контейнерная поверхность, изготовленная из акустически прозрачного материала, практически не поглощает ультразвуковую энергию и, как следствие, снижаются ее потери. При наложении ультразвуковых волн большой интенсивности в жидкой среде формируются районы с развитой кавитационной активностью. Зародыши кавитации спонтанно распределяются в жидкой среде. Пузырьки и их группировки под влиянием акустических потоков и перемещения жидкой среды под напором за счет вращательного движения контейнера, транспортируются со сравнительно высокой интенсивностью. В итоге по всем пространству на большом отдалении от ультразвуковых генераторов поле становится диффузным. Данное конструктивное исполнение дает возможность создать во всем рабочем пространстве диффузное поле такой большой кавитационной активности, что активное сопротивление материала будет сравнимым или больше волнового сопротивления. Причем материал становится чисто активной

нагрузкой, иными словами материал в полной мере поглощает энергию поля, что обуславливает наибольшее влияние на исходный материал и наименьшую продолжительность массообменной процедуры.

Выбор перспективного экстракционного способа по выделению пектиновых веществ из корок арбуза и анализ конструкторских решений для его осуществления показал, что техническое решение, представленное на рисунке 1.3.6, является технологически наиболее подходящим для извлечения из объекта исследования необходимых гелеобразующих компонентов.

Таким образом, в результате технического прогресса конструкций существующих экстракторов наблюдается тенденция, связанная с небольшим, но постоянным повышением интенсивности и удельной производительности процесса экстрагирования. В частности, посредством ультразвукового и кавитационного влияния на материал в агрегате [98], можно не только интенсивно влиять на него, но и уменьшить энергоемкость. Поэтому необходимы дополнительные исследования, которые позволят путем модернизации адаптировать выделенные в обзоре образцы ультразвуковых экстракционных установок к технологии получения пищевого пектинового экстракта из корок столового арбуза.

1.4 Выбор рационального способа сушки, как необходимой процедуры производства съедобной пленки из арбузного сырья и его аппаратного оформления

Максимально энергозатратной операцией в технологии биополимерных гелевых биоразлагаемых продуктов для их упаковки является обезвоживание, рациональное проведение которого обуславливает качественные, абсорбционные, прочностные параметры и, растворимость материала, что определяет целесооб-

разность оценки степени влияния всех варьируемых параметров и, как следствие, экономической эффективности данной операции.

Традиционным и самым распространённым методом влагоудаления из биополимеров служит обезвоживание при конвективном энергоподводе. Эта операция проводится в установках центробежного, пневматического, ударного типа, а с конструктивной точки зрения ленточного, спирально-вихревого, вальцового и комбинированного типа.

При анализе, кроме сушки биополимерного пленочного полуфабриката – гранулята желательнo рассмотреть пути производства пленок посредством перемешивания и плавки. Для выработки гранулята широко используются сушильные установки центробежного типа. Отделение гранул от воды осуществляется под воздействием центробежных сил: ротор, вращающийся с высокой скоростью, лопатками, закрепленными под наклоном, поднимает гранулы к отверстию для выгрузки. Для роста интенсивности операции обезвоживания против перемещения гранулята направляется воздушный поток. В частности, в сушильных установках центробежного типа, выпускаемых компанией Automatik Plastics Machinery серии Centro (рис. 1.4.1) центробежное ускорение, противонаправленное перемещению гранулвоздушный поток и их внутренняя тепловая энергия уменьшают конечную влажность до минимального значения [73].

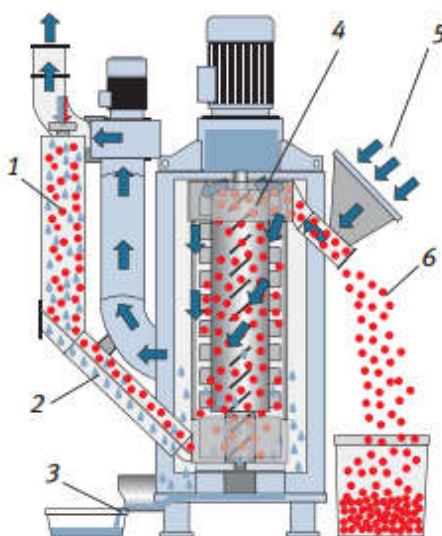


Рисунок 1.4.1 – Центробежная сушильная установка компании Automatik Plastics Machineryсерии Centro

Для мягкого обезвоживания продукта при операции гранулирования разработана сушильная установка *Machineri Aero* ударного типа компанией *Automatik Plastics* (рис. 1.4.2).

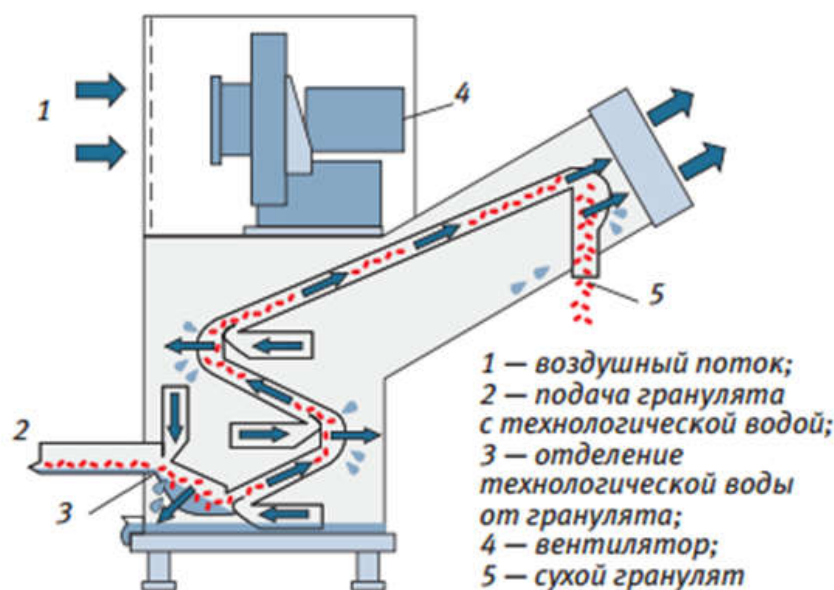


Рисунок 1.4.2 – Сушильная установка ударного типа *Machineri Aero*

В данной установке гранулированный биополимер отводится от охлаждающей водной среды, перемещается и сохнет без использования подвижных элементов. Отведенная водная среда циркулирует по контуру, а внутренняя тепловая энергия гранулята способствует парообразованию остаточной влаги [59, 73].

Для обезвоживания при конвективном энергоподводе полимерного гранулята используют также шахтные установки (рис. 1.4.3) [73, 93] усложненность использования данных аппаратов обусловлена необходимостью дисперсии гранул по габаритам, неоднородностью по длительности их нахождения в зоне сушки, варьированием движущей силы операции по направленности перемещения теплоносителя в слое гранул.

Ясно, что для пленочного продукта в отличие от гранул, целесообразно использовать сушилки другого конструктивного исполнения, которые дадут возможность поддерживать целостность пленочного слоя и достигнуть заданных технические параметры итогового материала.

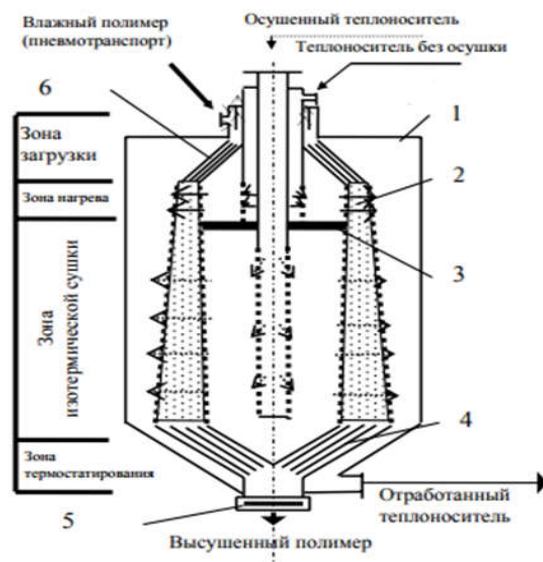


Рисунок 1.4.3 – Шахтная двухзонная сушилка с кольцевым слоем дисперсного материала: 1 – корпус сушилки; 2 – рабочая камера с сетчатыми или перфорированными стенками; 3 – перегородка; 4, 6 – направляющие конусы; 5 – секторный питатель

При обезвоживании пленок надо принимать во внимание то, что высокая влажность продукта и сушка при не соблюдении ее технологии может обусловить:

- мутность прозрачных СП, снижение вязкости;
- ухудшение механических параметров СП;
- наличие дефектов поверхности СП;
- отрицательное изменение физико-механических характеристик, к примеру, при невозможности достичь нужного влагосодержания готового материала, увеличивается вероятность падения удлинения до разрыва пленочной структуры и деструктивного напряжения при растяжении пленки.

Надо учесть, что при желании интенсифицировать операцию обезвоживания, необходимо принимать во внимание то, что это может обусловить неоправданный рост энергоемкости и снижение качественных параметров СП. Операция обезвоживания предполагает отведение влаги из молекулярной полимерной цепи, а не только с поверхности СП.

В современных условиях актуальным является проектирование высокоинтенсивных установок для обезвоживания биополимерного материала с использованием инфракрасного излучения (рис. 1.4.4), но данный энергоподвод при ограниченной пропускательной способности ИК-лучей для обеспечения равномерного прогрева и сушки предопределяет обработку тонкого слоя продукта, что усложняет процесс его нанесения и уменьшает удельный выход сухой продукции [73]. Кроме того, при радиационном энергоподводе сложно контролировать температуру высушиваемого изделия, а также при достаточно больших плотностях падающего теплового потока возможно вспучивание объекта сушки, что недопустимо для выработки пленочных упаковочных структур.

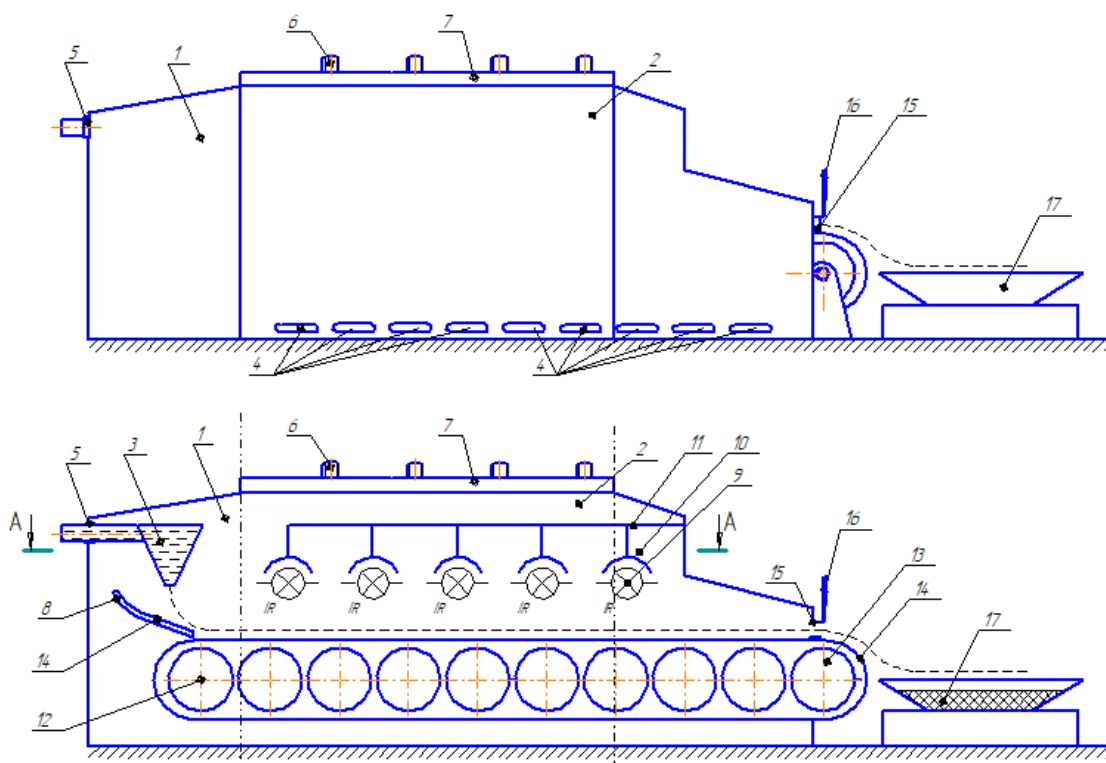


Рисунок 1.4.4 – Установка конвейерной радиационной сушки биополимерного съедобного геля: 1 – сушильная камера, 2 – цилиндрическая часть сушильной камеры, 3 – накопительный желоб, 4 – перфорированные отверстия, 5 – штуцер для ввода исходного материала, 6 – штуцер для отвода воздуха, 7 – съёмная крышка сушильной камеры, 8 – конусообразный желоб, 9 – ИК-излучатели, 10 – отражатели, 11 – стержневые крепежные элементы, 12 – транспортер ленточный, 13 – валки транспортера, 14 – направляющая поверхность, 15 – штуцер для отвода высушенного материала, 16 – нож для отрезки готовой пленки, 17 – накопитель

В нашем случае целесообразно отдать предпочтение конвективному или кондуктивному энергоподводу к высушиваемому пектиносодержащему гелевому раствору, а лучше комбинацию данных видов подвода тепловой энергии, поскольку в таком варианте упрощается конструктивное оформление процесса сушки при двухсторонней энергоподаче. Причем известны промышленные варианты достаточно простых и надежных сушильных вальцовых установок с комбинированным кондуктивно-конвективным энергоподводом для различных пищевых продуктов. К примеру, для сушки гелевых растворов с целью получения пленочных материалов возможно использование известного конструктивного решения [101], при соответствующей незначительной модернизации путем организации конвективного подвода сушильного агента к внешней поверхности обрабатываемого пленочного материала, приведенного на рисунке 1.4.5.

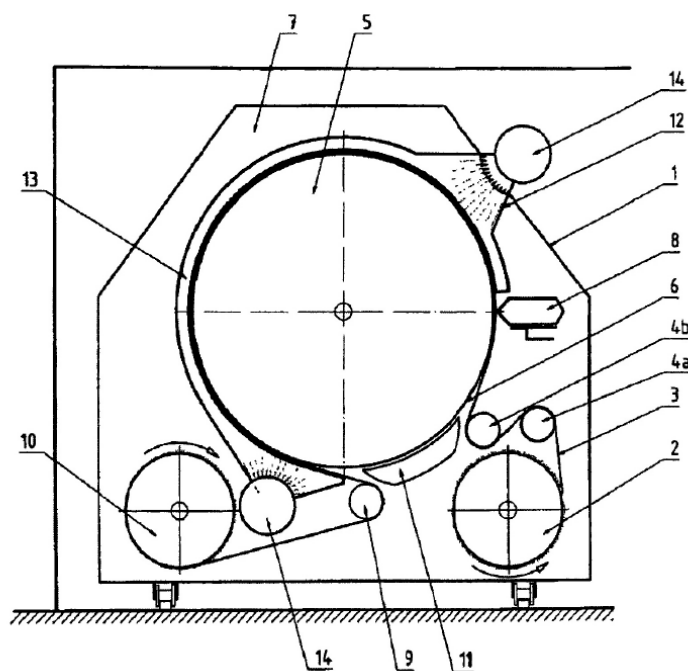


Рисунок 1.4.5 – Схема устройства для сушки жидкой пленки, нанесенной на подложку:

1 – кожух устройства; 2 – подающий ролик; 3 – покрываемая подложка;
4 – натяжные шкивы; 5 – транспортирующий ролик; 6 – транспортирующая поверхность; 7 – камера сушки; 8 – щелевое сопло; 9 – дополнительный натяжной шкив; 10 – ролик; 11 – устройство очистки ролика; 12 – дополнительный кожух;
13 – источник тепла; 14 – всасывающее устройство

Обезвоживание жидкой пленки, которая наносится на поверхность подложки и содержит испаряемую жидкость, согласно изобретению [101] включает в себя этапы перемещения подложки по транспортирующей поверхности вала по направлению к зоне сушки и испарения влаги с помощью источника тепла, имеющего поверхность нагрева, которая размещена на расстоянии 0,1...15,0 мм от поверхности подложки (рис. 1.4.5). Следует отметить, что в данном случае тепловая энергия передается от поверхности нагрева к жидкой пленке путем непосредственной теплопередачи, при этом, на этапе испарения жидкости посредством кондуктивного энергоподвода, поверхность нагрева имеет различную температуру, которая регулируется в зависимости от изменения теплофизических и структурно-механических свойств исходной биополимерной композиции, подвергаемой влагоудалению.

Таким образом, в результате проведенного анализа выявлен перспективный ареал последующего поиска рациональных условий обезвоживания гелей СП при выработке упаковки из арбузного сырья. Определено, что максимально резонной для поставленной цели служит сушка гелей СП при комбинированным кондуктивно-конвективным энергоподводе, т.к. это позволит увеличить интенсивность процесса влагоудаления при использовании сравнительно простых конструкторских решений. При этом уменьшение исходной температуры теплоносителя и по этой причине уменьшение температуры СП даст возможность обеспечить высокие качественные показатели готовой продукции.

Глава 2 ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕДУР И ВВЕДЕНИЯ ДОБАВОК С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОЙ ОСНОВЫ ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ПЕКТИНОСОДЕРЖАЩЕГО ПЛЕНОЧНОГО МАТЕРИАЛА

2.1 Обоснование применения ультразвука для интенсификации процесса экстракции водорастворимых веществ с учетом степени измельчения исходного сырья

В связи с актуальностью проблемы экологичности производства пектиносодержащих пленочных структур в современных условиях рекомендуются технологии экстракции ПК без применения химических реагентных веществ, к примеру, посредством кавитации или путем контакта с электроактивированной водной средой [133]. Однако данные методы экстракции ПК обладают негативными сторонами, не дающими возможности использования их в промышленных масштабах.

В качестве водной электроактивированной среды, как правило, понимается обычная питьевая водопроводная вода, подвергнутая электролизу в аппарате, где анодная и катодная зоны разделены непроницаемой для жидкости перегородкой [148]. После такой обработки катодная вода (католит) приобретает свойства щелочи, а анодная (анолит) – кислоты, причем pH раствора можно изменять в широких пределах. Вода с pH выше 7 (щелочная) получила в обиходе название «живой», а с pH ниже 7 (кислая) – «мертвой».

Известен запатентованный способ получения пектинового экстракта с применением данного вида воды [94], который заключается в следующем. Пектиносодержащие сырьевые материалы (цитрусовые, яблочные, виноградные выжимки, свекольный, тыква и др.) в нативном состоянии промывают 20...40 мин. водной

средой при 30...80°C. В варианте высушенного сырьевого материала его промывание-набухание осуществляют 20...30 мин. водной средой при 30...80°C. В процессе промывания из сырьевого материала экстрагируются растворимые в воде компоненты (крахмал, сахара, красящие вещества и др.), при этом отводятся и минеральные вещества. После чего сырьевой материал подвергается 1,5...2,5 ч экстракции-гидролизу при 75...95°C в при непрерывном перемешивании и соотношении сырьевого материала и гидролизующей среды (электроактивированной воды с pH 1,2...2,5) в долях 1 к 1,5...3,0.

Следует отметить, что электроактивированная водная среда до сих пор не признана в медицинской практике, однако присутствует информация о профилактике и лечении посредством нее болезни Боткина, радикулита, гипертонии, аденомы простаты и др. [148]. Противоречия в признании и «мертвой» «живой» водной среды присутствуют лишь в научном сообществе. Состав вырабатываемых посредством электролиза материалов в основном обусловлено параметрами водной среды, к примеру, ее минерализацией и условиями осуществления процедуры электролиза. Материал электродных элементов, сила тока, температура осуществления операции и набор иных параметров влияют на эффективность проведения данной операции. В частности, если материалом электродных элементов служит легированная сталь, в растворе могут появляться токсичные железные и никелевые ионы и, кроме того, в водную среду поступает и очень токсичный хром.

Таким образом, вследствие непроверенности имеющихся сведений, как с точки зрения технологии, так и в клиническом аспекте, что обуславливает отсутствие нормативных документов, реальное внедрение подобных способов в промышленную практику сомнительно и в настоящий момент не обосновано.

Что касается кавитации, то под этой процедурой подразумевают формирование парогазовых пузырьков при местном падении давления в жидкой среде до давления насыщенного пара. Соотношение доли газовой и паровой фаз в пузырьковой полости может варьироваться, теоретически от единицы до нулевого значения. С учетом доли паровой или газовой сред полости обозначают, как паровые, газовые или парогазовые [134]. Деструкция клеточных мембран при кавитацион-

ном эффекте проходит преимущественно под действием кумулятивных струй и ударных, формирующихся при схлопывании кавитационных пузырьков. На поверхности твердых тел или частичек присутствуют концентраторы напряжений в форме микроскопических трещин, шероховатостей и т.п., на которых формируются кавитационные зародыши. Влиянием звукокапиллярного воздействия и активных микроскопических потоков жидкая среда попадает в трещинки и поры, в которых при схлопывании кавитационных полостей появляется ударная волна, обуславливающая деструкцию продукта. Кумулятивные струи деструктурируют поверхностные слои посредством кинетической энергии жидкой среды. Мелкодисперсные частички вещества, размеры которых сопоставимы с площадью поперечного сечения кумулятивных струек, захватываются ими и усиливают деструкцию частиц в жидкой среде [144].

Основной негативной стороной выделения ПК посредством кавитации служит агрессивное влияние на их молекулы, что обуславливает то, что ряд молекул деструктурируются или деградирует до простых полимерных субстанций, что приводит к падению удельного выхода и качественных параметров ПК [133].

Более рациональным является экстракция ПК посредством помощи кислотного влияния совмещенного с ультразвуковым воздействием материала, что обосновано исследованиями, осуществляемыми на кафедре пищевой биотехнологии Оренбургского государственного университета, в котором была рекомендована технология кавитационно-кислотного выделения ПК из сырья растительной природы (арбуз кормовой и тыква), а также отходов материалов масложировой и сахарной индустрии (корзинки подсолнуха и свекольный жом) Оренбургского региона.

Для создания кавитационного эффекта в данном варианте использовалась ультразвуковая кавитация, дающая возможность осуществлять контроль и регулировку параметров операции, причем источником кавитации являлись пьезокерамические пластинки. С целью кислотного гидролиза применяли для проведения экстракции серную и соляную кислоты. При выборе рациональных значений факторов обозначенных процедур варьировали длительность влияния, pH, темпера-

туру, также амплитуду и частоту ультразвукового излучения.

В работе [133] обосновано, что использование ультразвуковой кавитации для экстракции ПК не дает возможности обеспечить наибольший удельный выход целевых компонентов. К тому же, интенсивное влияние ультразвукового излучения на материал обуславливает, кроме деструкции клеточных мембран, деполимеризацию ПК, что отрицательно влияет на их студнеобразующие параметры. Однако, в результате применения ультразвукового воздействия на сырье одновременно с его солянокислотным гидролизом, удельный выход ПК составляет 94,7% от наиболее вероятного при pH 4,0 (рис. 2.1.1. а). В варианте применения серной кислоты удельный выход ПК при кислотном-ультразвуковом методе экстракции равен 94,6% (рис. 2.1.1. б). При этом студнеобразующая способность 2%-го пектинового экстракта, определяемая по методу Сосновского [34], в основе которой лежит измерение усилия, требуемое для пробивания студня толщиной 10 мм, и регистрация показаний манометра, была не ниже 50 кПа, что гарантирует его высокие потребительские свойства.

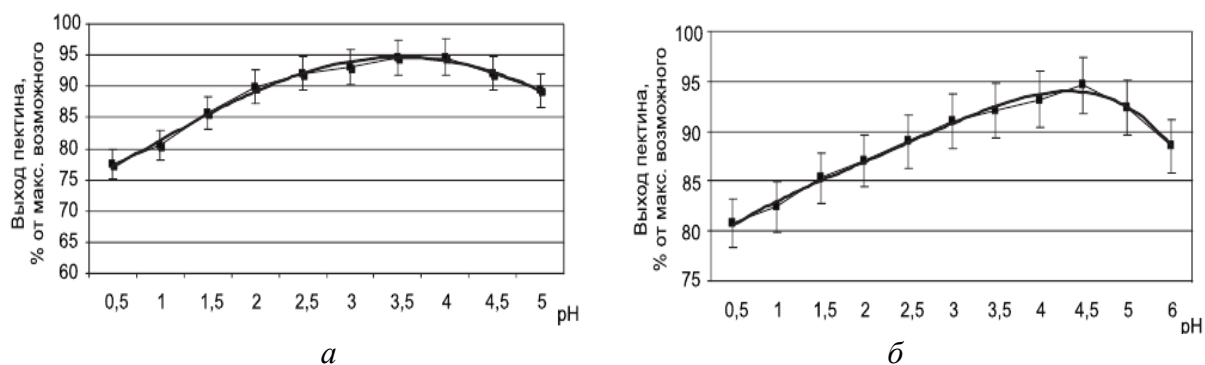


Рисунок 2.1.1 – Выход пектиновых веществ при кислотном-ультразвуковом способе экстрагирования: а – при кислотном гидролизе соляной кислотой; б – при кислотном гидролизе серной кислотой [133]

Таким образом, согласно графикам, представленным на рисунке 2.1.1 и учитывая высокие показатели студнеобразования полученных пектиновых экстрактов, можно рекомендовать комплексную обработку арбузной корки, включающей, кроме операций предварительной подготовки сырья, ультразвуковое воздействие и кислотный гидролиз, причем желательно применять вместо агрессивных серной

и соляной, пищевые кислоты, к примеру, уксусную или лимонную. Данный вариант апробирован в лабораторных и промышленных условиях и может служить базой для проведения дальнейших исследований.

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. Однако, априори понятно, что тем больше степень измельчения, тем выше эффективность процесса, но чрезмерное повышение может привести к дополнительным неоправданным энергозатратам и, как следствие, к росту стоимости реализуемой готовой продукции.

Операцию по измельчению арбузных корок, являющихся не утилизируемыми отходами при комплексной переработке арбузного сырья, проводилось на устройстве, представленном на рисунке 2.1.2, которое позволит на выходе получить диспергированный материал для экстрагирования из него водорастворимых компонентов [100].

Данный выбор обусловлен совмещением операций измельчения и подачи водной среды для создания заданного гидромодуля, кроме того данное устройство отличается простотой конструкции и надежностью в эксплуатации.

Предложенное устройство (рис. 2.1.2) работает следующим образом. Измельчение осуществляется с подачей воды, которая является экстрагентом в последующей операции по экстрагированию растворимых в воде веществ из корки арбуза. Поступающая на измельчение корка попадает в загрузочный люк 2. Далее сырье поступает в рабочую камеру 3, где измельчается в зазоре между неподвижной наклонной дробящей поверхностью, расположенной в ее верхней части и выполненной в виде полого конуса 4, и подвижной измельчающей шарошки 5, установленной на валу 6 и прикрепленной к неподвижному основанию чаши 7. Шарошка 5 приводится в движение с помощью электродвигателя 8.

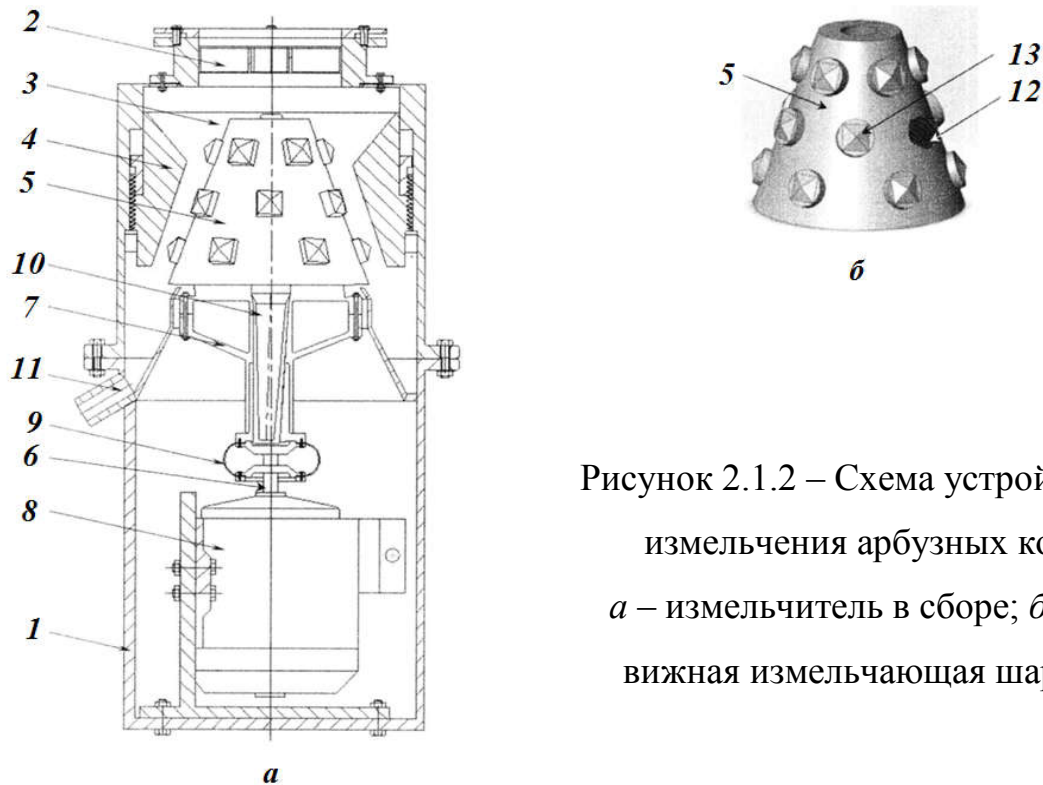


Рисунок 2.1.2 – Схема устройства для
измельчения арбузных корок:
а – измельчитель в сборе; *б* – подвижная измельчающая шарошка

Следует отметить, что устройство снабжено дебалансом 10, необходимым при переработке пищевых отходов в зависимости от их размерности и твердости, который выполнен с возможностью саморегулирования угла наклона подвижной измельчающей шарошки 5.

В итоге, в результате механического воздействия арбузные корки, попадающие в зазор между полым конусом 4 и подвижной измельчающей шарошкой 5, измельчаются до состояния пульпы. Под действием силы тяжести и наличия потока жидкости полученная суспензия выводится из устройства через разгрузочное отверстие 11, соединяясь с экстрагентом в заданном соотношении и одновременно удаляясь из места образования пищевых отходов до места его дальнейшей переработки.

Таким образом, предложенное устройство позволит на выходе получить измельченный материал для последующего экстрагирования из него водорастворимых компонентов (рис. 2.1.2), но для рационального извлечения ценных компонентов необходимо провести исследование по дисперсному составу исходной диспергированной массы.

По ISO9276-1: 1998 размер измельченной частицы определяется как диаметр шара, обладающим такими же физическими свойствами. Это понятие известно, как эквивалентный сферический диаметр. Другими словами, эквивалентный сферический диаметр соответствует диаметру сплошного шарообразного тела, которое обладает теми же свойствами, что и измеряемая частица. Шарообразная частица может быть описана с помощью только одного значения диаметра. На рисунке 2.1.3 наглядно показана идея эквивалентного сферического диаметра, основанная на различных физических свойствах [33, 60].

Очевидно, что если рассматривать измельченную частицу под микроскопом, то наблюдаемая плоская проекция рассматриваемого объекта, будет находиться в плоской проекции, где можно обозначить ряд ее размеров, каждый из которых свойственен данной частичке. Поэтому надо учитывать, что любой способ нахождения размера, базируется на определении разных параметров частички (наибольшая и наименьшая длины, площадь поверхности, объем, и др.). В случае применения разных методов замера итоговые данные будут отличаться.



Рисунок 2.1.3 – Пути преобразования реальных размеров частицы в эквивалентный сферический диаметр

То есть, можно соотносить только замеры для одного материала при идентичности методов замера. Это, приводит к выводу о том, что отсутствуют какие-либо эталонные и стандартные размеры, особенно для частиц диспергированных

материалов растительной природы. Сравнительным эталоном для разных способов замеров частиц может служить только шар, но можно также сравнивать данные, полученных посредством разной приборной техники при идентичном способе измерения.

С целью выявления размерной дисперсии частичек целесообразно применять способы, дающие возможность оценить значительное их число, преимущественно не меньше 200, либо фракционную массу и далее статистически обработать полученные результаты. Такими способами служат: электронная и оптическая микроскопия, седиментационные способы по действии сил тяжести или центробежных сил, а также ситовой анализ и т.д.

В таблице 2.1.1 приведены основные способы дисперсного анализа в зависимости от пределов варьирования размеров частичек.

Таблица 2.1.1 – Экспериментальные методы определения размеров частиц в зависимости от диапазона измеряемых частиц

Название метода дисперсного анализа	Диапазон измеряемых частиц	Примечания
Ситовой анализ	$>50\text{мкм}$	-
Мокрый ситовой анализ	$>5\text{мкм}$	-
Седиментационный анализ в гравитационном поле	$1\div 100\text{мкм}$	-
Седиментационный анализ в центробежном поле	$0,1\div 10\text{мкм}$ $5\div 10\text{нм}$	до 10^3об/мин $>10^5\text{об/мин}$
Оптическая микроскопия	$1\div 100\text{мкм}$	-
Электронная просвечивающая микроскопия	$5\text{нм}\div 5\text{мкм}$	-
Электронная сканирующая микроскопия	$5\text{нм}\div 5\text{мкм}$	-
Методы светорассеяния	$5\div 100\text{нм}$	-
Кондуктометрия	$0,2\div 800\text{мкм}$	применяется счетчик Культера

В качестве эквивалентного диаметра измельченной частицы арбузной корки $d_{\text{экв}}$ резонно выбрать диаметр шара с идентичной площадью поверхности, что обусловлено тем, что размер экстрагируемых частиц и их суммарная площадь поверхности являются важнейшими факторами процесса экстракции, т.к. при снижении размера частиц увеличивается площадь поверхности взаимодействия между материалом и экстрагентом, и потому растет скорость операции. Заметим, что геометрический размер частицы без учета внутренней ее структуры не всегда мо-

жет служить критерием для оценки оптимальной величины экстрагируемого материала.

Вследствие геометрически неправильной формы частичек характерным размером $d_{\text{хар}}$ можно считать диаметр круга с такой же площадью как у них. Тогда, площадь при фазовом взаимодействии в операции обмена массой можно представить в виде суммы идентичных поверхностей частичек не принимая во внимание боковые, а при схематизации фотоснимков представить частицы в форме кругов. Тогда, эквивалентный диаметр определим из соотношения:

$$d_{\text{экв}} = \frac{d_{\text{хар}}}{\sqrt{2}}. \quad (2.1.1)$$

На рисунке 2.1.4 представлены фотографии фрагментов частиц арбузной корки после прохождения этапа измельчения на устройстве (рис. 2.1.2).



Рисунок 2.1.4 –
Фотоснимки диспергированных
фрагментов арбузной корки

На рисунке 2.1.5 представлены микрофотографии и схематичные иллюстрации фрагментов измельченных частиц с учетом вышеуказанных допущений.

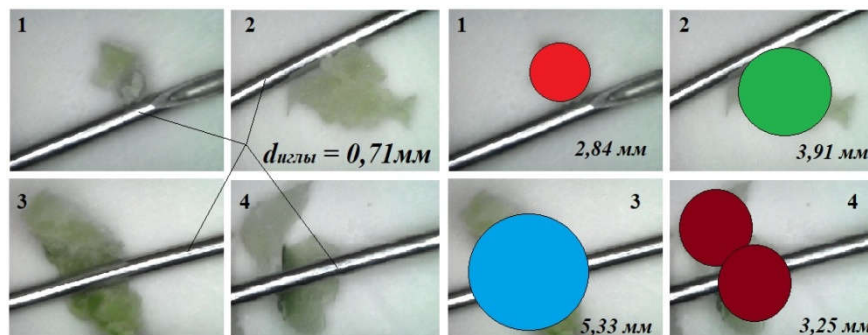


Рисунок 2.1.5 – Микрофотографии и схематизация фрагментов диспергированной арбузной корки

Изучение фотоснимков приводит к выводу о том, что в диспергированном продукте наблюдаются примерно 4 фракции, в которых определяющие диаметры частичек имеют незначительные различия и поэтому при схематизации фрагментов (рис. 2.1.5), они показаны как круги с их усредненными диаметрами внутри фракции, что упрощает математическую гранулометрическую интерпретацию объекта изучения (Приложение В). Данные проведенного анализа приведены в таблице 2.1.2.

Таблица 2.1.2 – Факторы, определяющие гранулометрический состав объекта изучения

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

Из полученных данных следует, что при дисперсном анализе и получении расчетных соотношений можно опираться на три фракции заметной доли в общем количестве частиц, а наиболее крупной фракцией с малозначительным содержанием, можно пренебречь, т.к. это практически не повлияет на расчетную погрешность.

Эквивалентные диаметры частичек оставшихся трех фракций приводят к выводу о том, что основная часть обладает $d_{\text{экв}}$ от 2,01 мм до 2,76 мм и по этой причине с удовлетворительной погрешностью за определяющий размер можно взять некоторую среднюю величину. Следует отметить, что возможны различные способы усреднения размеров частиц, при этом вид усреднения зависит от используемого метода дисперсионного анализа, вследствие чего найденные различными методами значения средних размеров частиц могут не совпадать.

В нашем случае более информативным будет являться сравнение сфер по площади поверхности, т.к. именно она влияет на степень интенсификации процесса экстракции. Площадь поверхности сферы равна πd^2 , поэтому для сравнения образцов на основе площади поверхности, значения эквивалентных диаметров для

трех фракций возведем в квадрат, суммируем, поделим на количество фракций и извлечем квадратный корень, в результате имеем $d_{\text{экв ср}}$, мм.

$$d_{\text{экв ср}} = \sqrt{\frac{d_{1\text{хар}}^2 + d_{2\text{хар}}^2 + d_{3\text{хар}}^2}{3}} = \sqrt{\frac{2,01^2 + 2,76^2 + 2,30^2}{3}} = 2,37. \quad (2.1.2)$$

Следуя официальным статьям Государственной фармакопеи РФ [78], сырьевые материалы растительной природы необходимо диспергировать до заданных оптимальных размеров для лекарственных препаратов. Для сырьевых материалов растительной природы желательным размерным интервалом служит 0,5...3мм [78].

Дисперсный анализ показал, что средний эквивалентный размер у исследуемого измельченного растительного сырья попадает в рекомендованный диапазон ($d_{\text{экв ср}} = 2,37\text{мм}$), поэтому можно принять, что полученные данные адекватны.

2.2 Построение рефрактометрической шкалы оценки доли пектиновых веществ в водном экстракте

Для контролирования качественных параметров материалов и технологических операций в пищевой индустрии используются рефрактометрические способы анализа. Они относятся к одним из самых простых физико-химических методов анализа с затратой очень небольших количеств анализируемого вещества и проводятся за очень короткое время.

Данные методы применяют для анализа доли углеводов, сухих веществ, липидной фракции, сахаров разной природы, спирта в различных материалах пищевой индустрии. В частности, показатель преломления излучения липидами обу-

словливает их чистоту, степень окисления и насыщенность масел, по которым можно определить их природу и качественные параметры.

Рефрактометрический метод анализа основан на измерении показателя преломления анализируемого вещества, значение которого обусловлено длиной световой волны, концентрацией раствора, температурой. Под данным показателем (индексом рефракции) подразумевают соотношение скорости света в вакууме к ней же в объекте исследования (абсолютный показатель). Причем в практических целях находят относительный показатель (n), который определяется соотношением синусов угла падения луча (α) и угла преломления (β) для двух контактирующих веществ. Определение показателя преломления производят с помощью специального прибора, называемого рефрактометром. На практике применяются рефрактометры различных систем.

Не имеет смысла останавливаться на их устройстве и принципе работы, поскольку данная тема подробно рассматривается в курсе физики и многих других работах, посвящённых рефрактометрии [31, 116, 136, 137], следует только отметить, что для анализа массовой доли сухих веществ в водных растворах широко применяются рефрактометры, позволяющие определять преломления с относительно высокой точностью $n \pm 0,0001$, например рефрактометр ИРФ-454 Б2М с подсветкой и дополнительной шкалой. Это наиболее удобный и проверенный на практике прибор, предназначенный для определения показателей преломления неагрессивных прозрачных жидкостей и растворов. Практически все лабораторные методики, требующие использования рефрактометров, ориентируются именно на него, т.к. его диапазон измерений, охватывающий всю шкалу от 0 до 100%, обусловил универсальность его применения.

В рефрактометрической практике применяют 2-а метода определения концентрации растворенных компонентов C (%) путем оценки данного показателю, по 1-му из которых определяют концентрацию по соотношению:

$$C = \frac{n - n_0}{F}, \quad (2.2.1)$$

где F – фактор показателя преломления, который берется из рефрактометриче-

ских таблиц.

Второй способ расчета концентрации связан с рефрактометрическими таблицами или графиками, т.е. измерив, индекс рефракции, по табулированным данным определяют соответствующую ему концентрацию, причем, в случае, когда определенный показатель преломления не приведен, осуществляют процедуру интерполяции.

Нахождение концентрации водорастворимых веществ, включая и пектиновые в арбузном пектиносодержащем экстракте производился по второму способу, по этой причине на данной стадии анализа было необходимо построить рефрактометрическую шкалу оценки доли пектиновых веществ в водном экстракте, используя эталонный раствор. Для построения шкалы оценки использовалась модельная пектиновая субстанция (рис. 2.2.1) выпускаемая промышленно и близкая

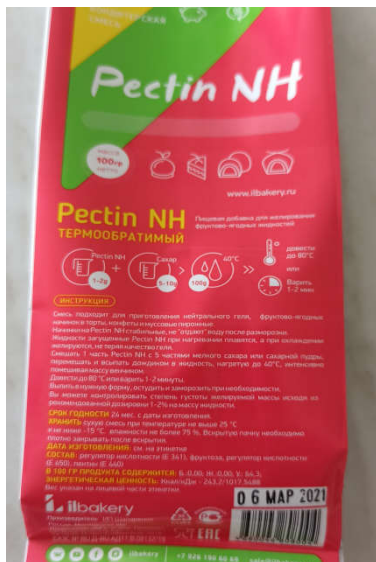


Рисунок 2.2.1 – Модельная субстанция

n . Учитывая линейный характер полученной кривой можно получить простую математическую зависимость концентрации исследуемого экстракта от показателя преломления.

Ниже представлена линейная зависимость концентрации исследуемого экстракта C (%) от показателя преломления n :

$$C = 729.26n - 971.8, \quad (2.2.2)$$

где n – индекс рефракции.

по составу к свойствам пектиновой композиции из арбузных корок, включающая фруктозу и регулятор кислотности (E 341 и E 450) для регулирования уровня pH раствора.

Ниже, на рисунке 2.2.2 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% (Приложение Г), каждой из которых соответствует конкретное значение индекса рефракции

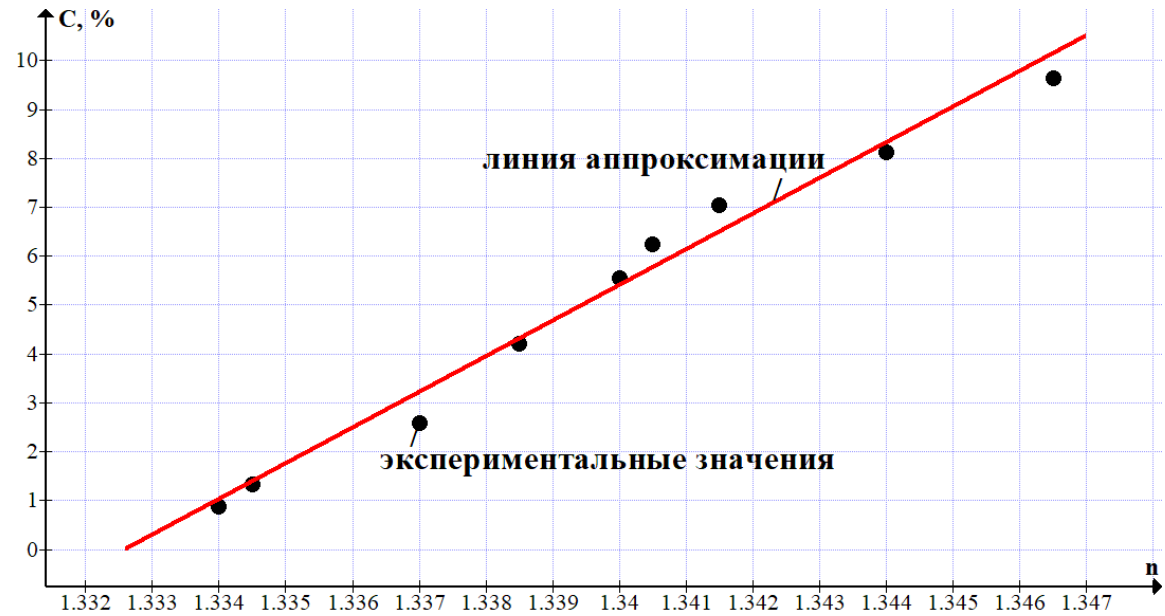


Рисунок 2.2.2 – Градуировочный график для определения концентрации арбузного экстракта

Учитывая, что рефрактометр ИРФ-454 Б2М имеет дополнительную шкалу для измерения процентного содержания сухих веществ в растворах по шкале сахарозы, по которой визуальная оценка концентрации исследуемого образца более удобна, ввиду большего расстояния между нанесенными на шкалу рисками в сравнении со шкалой показателя преломления, имеет смысл построить градуировочный график и для нее.

Ниже, на рисунке 2.2.3 представлен градуировочный график, построенный по тем же девяти экспериментальным точкам (Приложение Д), каждой из которых соответствует конкретное значение содержания сухих веществ в растворах по шкале сахарозы. Учитывая линейный характер полученной кривой, можно также получить простую математическую зависимость концентрации исследуемого экстракта от значений этой шкалы.

Ниже представлена линейная зависимость концентрации исследуемого экстракта C (%) от содержания сухих веществ в растворах по шкале сахарозы:

$$C = 1.056C_c + 0.335, \quad (2.2.3)$$

где C_c – показания по шкале сахарозы, %.

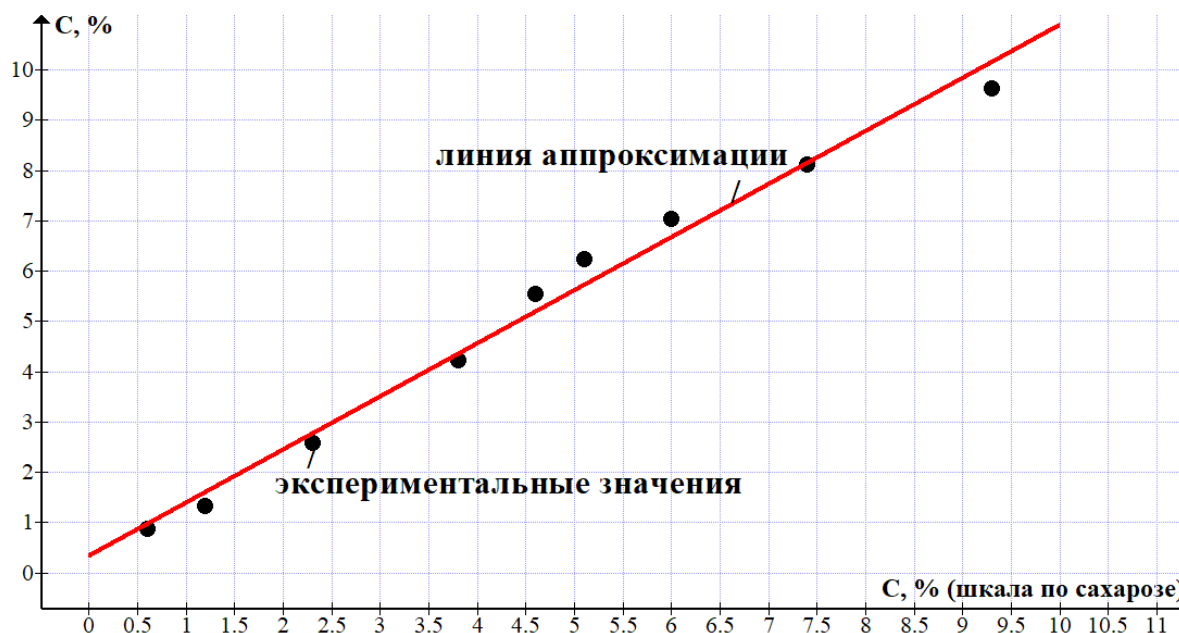


Рисунок 2.2.3 – Градуировочный (дополнительный) график для определения концентрации арбузного экстракта

Применение градуировочных графиков является наиболее точным методом рефрактометрических измерений, но следует отметить, что основные ограничения метода связаны с трудностями визуального оценивания, т.е. если целые, десятые, сотые и тысячные доли можно отсчитывать по шкале, то десятитысячные доли нужно оценивать на глаз.

2.3 Определение рационального соотношения компонентов в гидромодуле для эффективной трансформации пектиновых веществ в водорастворимое состояние

Известно, что на эффективность процесса экстракции, помимо таких параметров как температура и давление, существенное влияние оказывает соотношение общей массы растворителя и объекта экстрагирования. Следует отметить, что,

проводить оценку влияния побочных параметров, в частности температуры, давления и т.п. в данном исследовании нет необходимости, т.к. их рациональные величины были зафиксированы на основе предварительно сделанных теоретических исследований и постановочных экспериментах.

Рациональное соотношение масс экстрагента и объекта экстрагирования определялось эмпирическим путем (Приложение Е), где в качестве целевого критерия была выбрана максимально приемлемая величина выхода водорастворимых веществ, полученная в ходе эксперимента.

Эксперимент проводился двумя этапами следующим образом.

На первом этапе корку, собранную после удаления мякоти и семян из арбузов, которые идут на производство других востребованных продуктов, и измельченную в специальном устройстве (рис. 2.1.2) экстрагируют дистиллированной водой с перемешиванием при 80°C в различном соотношении в течение 300 минут, т.к. постановочные эксперименты показали, что этого времени достаточно для приведения системы экстрагент–сырье в равновесное состояние, после чего проэкстрагированное сырье отделяют от экстракта обычным фильтрованием.

На втором этапе в полученных водных экстрактах определялась концентрация сухих веществ с рефрактометрическим способом, используя основную (рис. 2.2.2) и дополнительную оценочную шкалу (рис. 2.2.3), а также формулы для пересчета 2.2.2 и 2.2.3, по величине которой высчитывался выход водорастворимых веществ из арбузной измельченной корки.

В таблице 2.3.1 представлены результаты экспериментальных исследований по нахождению рационального соотношения масс экстрагента и объекта экстрагирования для эффективной трансформации пектиновых веществ в водорастворимое состояние.

Результаты проведенных исследований по определению рационального соотношения растворителя и растительного сырья показали, что пятый вариант является наиболее подходящим для проведения процесса экстрагирования водорастворимых компонентов из измельченной арбузной корки. Согласно полученным данным (табл. 2.3.1) на 1 грамм подготовленного сырья, приходится чуть меньше

6 грамм дистиллированной воды, т.е. можно принять, что рациональным считается массовое соотношение сырье: растворитель равное 1:6.

Сравнительная оценка соотношения приведенного в литературе количества растворимых пектиновых веществ в зрелом столовом арбузе [123] (табл. 1.2.4), а это третья часть от 0,098% на сырую массу сырья [24], и его массы в результате экстрагирования (табл. 2.3.1) показала, что по предложенной технологии извлекается около 60% от общей массы целевого компонента (табл. 2.3.2). За количество извлеченного растворимого пектина из корки арбуза приблизительно можно считать его выход за минусом растворимых в воде сахаров (5,8 г в 100 г продукта) [43].

Таблица 2.3.1 – Результат проведенных исследований по выявлению рационального массового соотношения между растворителем и растительным сырьем

Вар.	Масса сырья/масса воды, г.	Концентрация по дополнительной шкале, %.	Индекс рефракции.	Концентрация сухих в-в в экстракте, %.	Выход, %.
1	1,0/2,0	1,5	1,3352	1,92/1,91	3,82
2	1,0/2,5	1,3	1,3349	1,71/1,69	4,28
3	1,0/3,5	0,9	1,3343	1,29/1,25	4,52
4	1,0/5,0	0,7	1,3340	1,07/1,03	5,35
5	1,0/6,0	0,6	1,3339	0,97/0,96	5,82
6	1,0/6,5	0,5	1,3338	0,86/0,89	5,59
7	1,0/7,5	0,4	1,3337	0,77/0,81	5,78
8	1,0/9,0	0,3	1,3335	0,65/0,67	5,85
9	1,0/10,0	0,2	1,3333	0,55/0,52	5,50
10	1,0/13,0	0,1	1,3332	0,44/0,45	5,72

Таблица 2.3.2 – Процент извлечения пектиновых веществ из корки арбуза по предложенной технологии

Количество растворимых в воде пектинов на 100г корки [24, 123], г	Количество извлеченных пектиновых веществ по предложенной технологии в пересчете на 100г корки, г	Процент извлечения
0,098/3=0,033±0,002	≈5,82-5,8=0,02	≈60%

Для последующего анализа и расчета продолжительности экстракции пектиновых веществ из арбузной диспергированной корки при рациональных параметрах процесса по предлагаемой технологии необходимо выявление кинетических закономерностей протекания данной процедуры.

2.4 Выявление кинетических закономерностей протекания процесса экстракции водорастворимых веществ из арбузных корок

Кинетика экстракции пектиновых веществ из измельченных частиц арбузной корки определяет не только скорость или интенсивность процесса, но и качество готовой продукции с учетом влияния «жестких» режимов его течения при соблюдении технологических ограничений, влияющих на него. Кроме того, кинетические закономерности чаще всего являются нелинейными с присутствием характерных точек перегиба, поэтому их анализ позволяет оценить эффективность не только процесса в целом, но и отдельных его стадий, что позволяет выявить и проанализировать физико-химический механизм его осуществления. Как было уже отмечено, при изучении кинетики целесообразно использовать метод рефрактометрии, который позволяет достаточно точно и оперативно получить кинетические закономерности исследуемого процесса.

Были проведены экспериментальные исследования с использованием рефрактометра ИРФ-454 Б2М (рис. 2.4.1).



Рисунок 2.4.1 – Проведение исследований на рефрактометре ИРФ-454 Б2М

При пятикратном их повторении, получены средние значения величин показателя преломления n и содержания сухих веществ в растворах по шкале сахарозы C_c соответствующие продолжительности экстрагирования τ водорастворимых

веществ из технологически подготовленных частиц арбузной корки дистиллированной водой, которые представлены в таблице 2.4.5 (Приложение Ж).

Исследования кинетики процесса экстракции проводились при четырех различных вариантах [69], которые представлены в таблице 2.4.1-4.

Таблица 2.4.1 – Условия проведения эксперимента (вариант 1)

Наименование	Параметр
Экстрагент	Дистиллированная вода
Температура экстрагента	$358 \pm 2^\circ\text{K}$
Температура сырья	$293 \pm 2^\circ\text{K}$
Гидро модуль	1/6
Влажность сырья	$\approx 92\%$

Таблица 2.4.2 – Условия проведения эксперимента (вариант 2)

Наименование	Параметр
Экстрагент	Водный раствор лимонной кислоты
Концентрация	17,5 г/л
pH раствора	$\approx 2,5$
Температура экстрагента	$358 \pm 2^\circ\text{K}$
Температура сырья	$293 \pm 2^\circ\text{K}$
Гидро модуль	1/6
Влажность сырья	$\approx 92\%$

Таблица 2.4.3 – Условия проведения эксперимента (вариант 3)

Наименование	Параметр
Экстрагент	Дистиллированная вода
Температура экстрагента	$358 \pm 2^\circ\text{K}$
Температура сырья	$293 \pm 2^\circ\text{K}$
Гидро модуль	1/6
Влажность сырья	$\approx 92\%$
Мощность на устройстве УЗТА-0,4/22-ОМ 90% от максимальной	не более 360 ВА
Частота ультразвука	$22 \pm 1,65 \text{ кГц}$
Интенсивность ультразвука	$\approx 126 \text{ кВт/м}^2$

Таблица 2.4.4 – Условия проведения эксперимента (вариант 4)

Наименование	Параметр
Экстрагент	Водный раствор лимонной кислоты
Концентрация	17,5 г/л
pH раствора	$\approx 2,5$
Температура экстрагента	$358 \pm 2^\circ\text{K}$
Температура сырья	$293 \pm 2^\circ\text{K}$
Гидро модуль	1/6
Влажность сырья	$\approx 92\%$
Мощность на устройстве УЗТА-0,4/22-ОМ 90% от максимальной	не более 360 ВА
Частота ультразвука	$22 \pm 1,65 \text{ кГц}$
Интенсивность ультразвука	$\approx 126 \text{ кВт/м}^2$

Таблица 2.4.5 – Результаты экспериментальных исследований процесса экстракции

Вариант 1								
Продолжительность экстракции τ , мин	0,33	0,67	1,0	1,5	2	3	4	10
Показатель преломления n	1,3331	1,3334	1,3335	1,3337	1,3338	1,3339	1,3340	1,3341
Содержание сухих веществ в экстракте по шкале сахарозы C_c , %	0,1	0,25	0,35	0,45	0,5	0,6	0,65	0,7
Концентрация сухих веществ C_x , %	0,44	0,60	0,70	0,81	0,86	0,97	1,02	1,07
Вариант 2								
Продолжительность экстракции τ , мин	0,33	0,67	1,0	1,5	2	3	4	10
Показатель преломления n	1,3333	1,3335	1,3336	1,3338	1,3339	1,3341	1,3342	1,3343
Содержание сухих веществ в экстракте по шкале сахарозы C_c , %	0,15	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Концентрация сухих веществ C_x , %	0,49	0,65	0,76	0,86	0,97	1,07	1,15	1,29
Вариант 3								
Продолжительность экстракции τ , мин	0,17	0,33	0,67	1,0	1,33	1,67	2	4
Показатель преломления n	1,3333	1,3336	1,3338	1,3338	1,3339	1,3340	1,3341	1,3342
Содержание сухих веществ в экстракте по шкале сахарозы C_c , %	0,2	0,4	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,8
Концентрация сухих веществ C_x , %	0,54	0,76	0,86	0,92	0,97	1,02	1,07	1,15
Вариант 4								
Продолжительность экстракции τ , мин	0,17	0,33	0,67	1,0	1,33	1,67	2	4
Показатель преломления n	1,3334	1,3337	1,3338	1,3339	1,3341	1,3342	1,3342	1,3343
Содержание сухих веществ в экстракте по шкале сахарозы C_c , %	0,25	0,45	0,55	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9
Концентрация сухих веществ C_x , %	0,60	0,81	0,92	0,97	1,07	1,15	1,23	1,29

На основании полученных данных, представленных в таблице 2.4.5 (вариант 1 и 2) 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 (2.2.2 и 2.2.3) построены кривые экстрагирования водорастворимых

веществ (рис. 2.4.2) из измельченной корки столового арбуза дистиллированной водой и водным раствором лимонной кислоты без использования ультразвука.

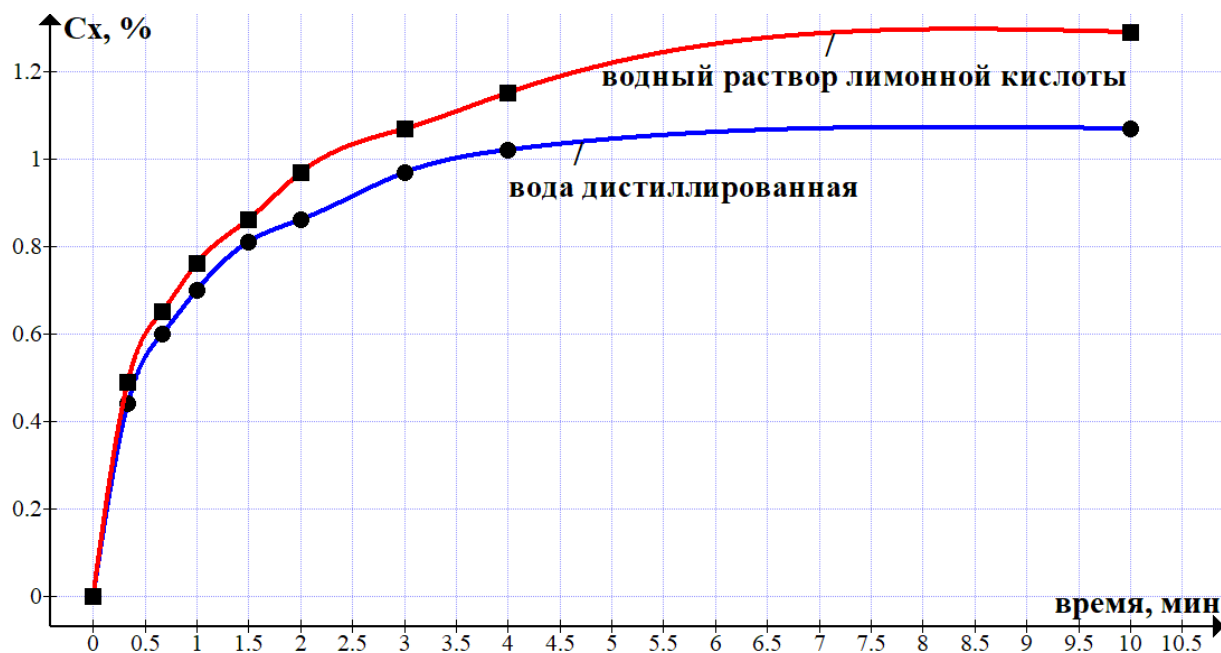


Рисунок 2.4.2 – Кривые экстрагирования без применения ультразвука

Ниже представлены кривые экстрагирования водорастворимых веществ (рис. 2.4.3) из измельченной корки столового арбуза дистиллированной водой и водным раствором лимонной кислоты с использованием ультразвука (табл. 2.4.5, варианты 3 и 4).

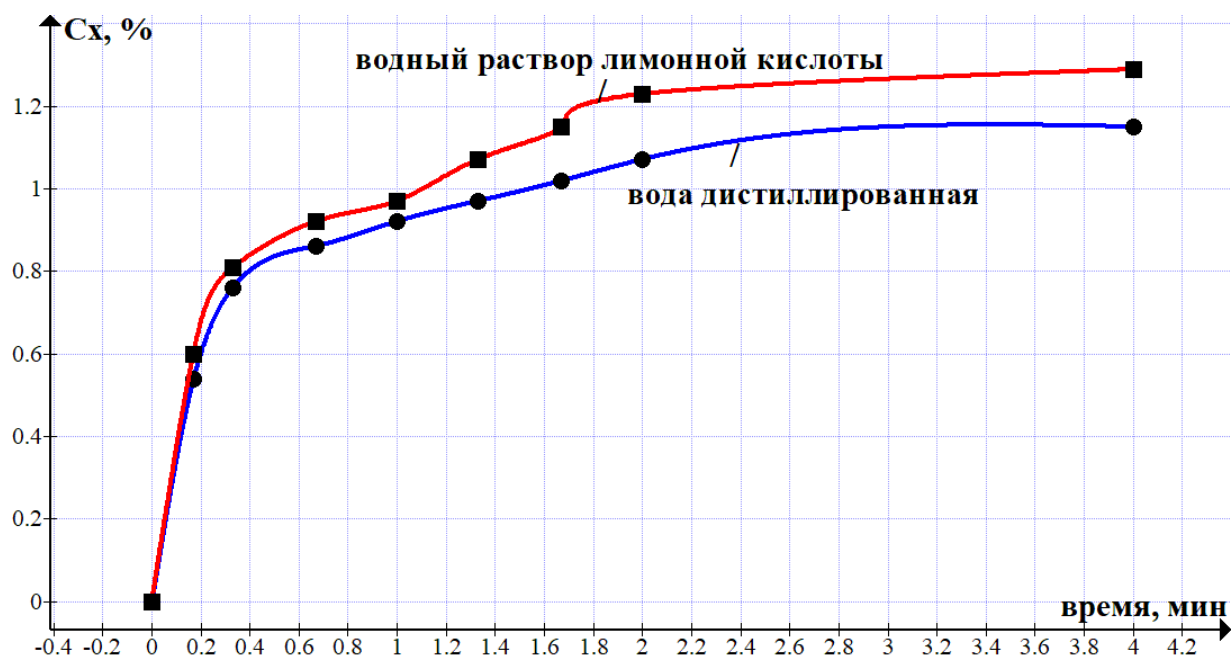


Рисунок 2.4.3 – Кривые экстрагирования с применением ультразвука

Эмпирическое исследование по экстрагированию водорастворимых компонентов из технологически подготовленного арбузного сырья при вышеуказанных условиях проведения процесса (табл. 2.4.5) выявило, что рациональная продолжительность проведения экспериментов составляет не более 4 минут при использовании ультразвукового воздействия на полученную суспензию.

Следует отметить, что, используя в качестве экстрагента водный раствор лимонной кислоты, вследствие кислотного гидролиза, выход водорастворимых компонентов из исходного сырья будет выше на 12%, который в абсолютных числах показывает, что из 1 кг исходного сырья дополнительно извлекается всего 8 грамм целевых веществ (табл. 2.4.5). При этом на получение 6 кг водного раствора лимонной кислоты с pH 2,5 потребуется 105 грамм лимонной кислоты (табл. 2.4.1), стоимость 1 кг, которого на сегодняшний момент составляет примерно 140 руб.[61], следовательно, дополнительные материальные затраты будут равны 14,72 руб. Стоимость же 8 грамм дополнительно полученного пектинового вещества, при условии, что средняя цена 1 кг яблочного пектина составляет 2220 руб.[112], будет равна 17,8 руб.

Таким образом, с экономической точки зрения, можно сделать вывод, что 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 (табл. 2.4.5, 3 вариант).

Анализ механизма массопереноса при экстрагировании водорастворимых веществ из арбузной корки осуществляется на базе зависимости интенсивности экстрагирования от концентрации экстрактивных веществ, полученной посредством математической аппроксимации выбранного варианта эмпирической кривой (рис. 2.4.3) и математически ее аппроксимированной степенным уравнением:

$$C_x = 0.87\tau^{0.2}, \quad (2.4.1)$$

где τ – продолжительность экстракции, мин.

Для удобства математического описания скорости экстракции $\frac{dC_x}{d\tau} = f(C_x)$ были получены обратные зависимости $\tau = f(C_x)$ для двух участков, которые

представлены графически на рисунке 2.4.4.

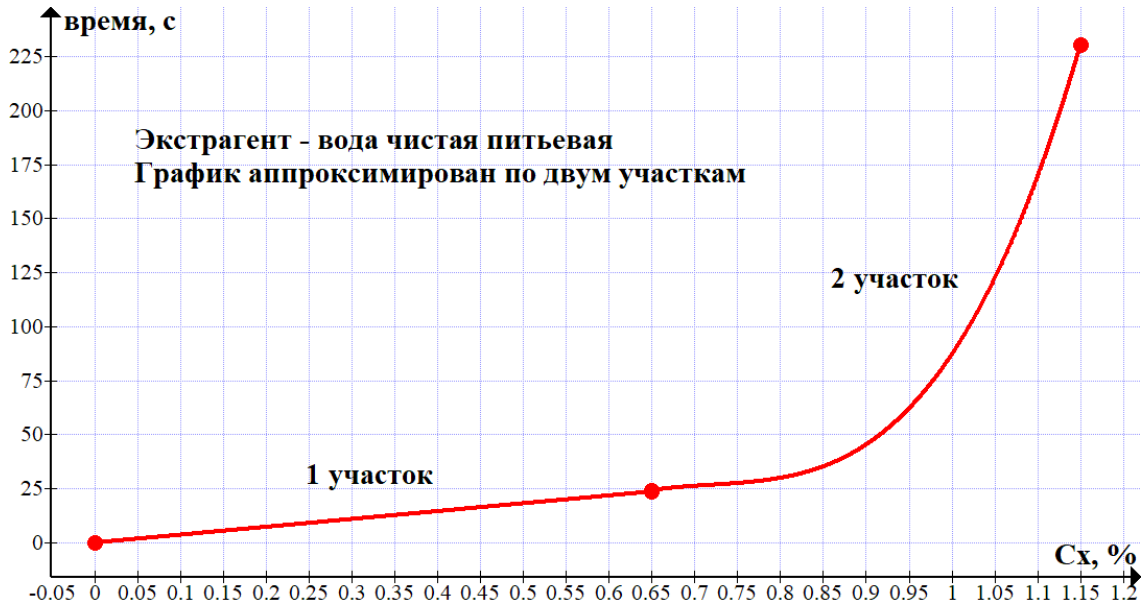


Рисунок 2.4.4 – Аппроксимированная кривая экстрагирования с применением ультразвука

А также в виде математических зависимостей для двух участков, первый из которых находится в интервале от 0% до 0,65% (2.4.2), а второй в интервале от 0,65% до 1,15% (2.4.3):

$$\tau = 36,307C_x, \quad (2.4.2)$$

$$\tau = 2416C_x^3 - 5220C_x^2 + 3779C_x - 891, \quad (2.4.3)$$

где C_x – концентрация сухих веществ в экстракте, %.

После взятия производной от соотношений 2.4.2 и 2.4.3 имеем $\frac{d\tau}{dC_x} = f(C_x)$ и далее получаем соотношения, аппроксимирующие кинетическую экстракцию водорастворимых компонентов из растительного сырья: $\frac{dC_x}{d\tau} = 1/(f(C_x))$, которые представлены графически (рис. 2.4.5) и в виде математических формул 2.4.4 и 2.4.5, при этом равенство 2.4.4 представлено в скорректированном виде.

$$\frac{dC_x}{d\tau} = 0,018; \quad (2.4.4) \quad \frac{dC_x}{d\tau} = \frac{1}{7248C_x^2 - 10440C_x + 3779}; \quad (2.4.5)$$

где C_x – концентрация сухих веществ в экстракте, %.



Рисунок 2.4.5 – Графическая интерпретация $\frac{dC_x}{dt} = f(C_x)$

Изучение полученных эмпирических данных кинетических закономерностей приводит к выводу о том, что показал, что на кинетической кривой присутствуют 3-и характерных участка осуществления операции, что не входит в конфликт теоретическими основами экстракции [2, 32, 45] и последними исследованиями [53, 132].

На первой стадии неизменность интенсивности экстракции можно объяснить тем, что интенсивность внутреннего и внешнего массопереноса равнозначны. То есть интенсивность переноса экстрагируемого вещества изнутри частицы растительного сырья к поверхности раздела фаз, поддерживаемая ультразвуковым воздействием, остается постоянной, лимитируя тем самым скорость переноса экстрагируемого вещества от поверхности фазового контакта и дисперсия его по всему объему экстрагента.

Во второй период экстрагирования повышение скорости экстракции можно объяснить тем, что ультразвуковое воздействие, которое обуславливает на данном этапе окончательное нарушение структуры частиц арбузной корки, способствует переходу протопектина в водорастворимое состояние, и тем самым интенсифицирует 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 влия-

ния 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.

Следует отметить, что выявленные особенности влияют не только на механизм насыщения экстрагента водорастворимыми компонентами, но и на трансформацию полей концентраций в растительном сырье. Все это в итоге предопределяет оригинальные подходы по эффективному проведению процесса экстрагирования водорастворимых пектиносодержащих веществ из арбузного сырья очищенной водой.

2.5 Обоснование целесообразности использования микроцеллюлозы с целью эффективной стабилизации пленочных структур на основе пектиновых экстрактов

Априорная информация о пленочных структурах, представленная в первой главе, свидетельствует о том, что для использования пектинового экстракта в инженерной практике очевидна необходимость повышения в нем концентрации сухих веществ, в частности, путем его упаривания, желательного при пониженном давлении, что является дорогостоящей операцией. Рассматривая возможные варианты повышения концентрации сухих веществ можно сделать вывод о том, что ее рост возможен посредством добавки вспомогательных веществ, что и предусмотрено в рамках рекомендуемой технологии.

Таким образом, автором рекомендуется вместо энергоемкого процесса выпаривания экстракта, введение в него премиксов в виде порошкообразной микроцеллюлозы и глицерина (Е422), который относится к группе стабилизаторов, об-

ладающих свойствами сохранять и увеличивать степень вязкости и консистенции пищевых гидрогелей. Материалы на основе целлюлозы имеют большой потенциал в своем развитии, т.к. обладают важными функциональными параметрами. К подобным продуктам причисляют гидрогелевые полимеры, где основной составляющей является целлюлоза и её производные. В общем-то, получить пленочное покрытие возможно и без микроцеллюлозы, однако, постановочные эксперименты показали, что использование данного компонента дает возможность увеличить прочность пленочного покрытия, особенно, при его использовании как отдельного продукта и улучшить его характеристики для защиты пищевых изделий от воздействия на них внешней среды.

Пробы на базе ПК и целлюлозы, которые подвергаются регенерации в виде гидрогелей, преимущественно низки или нетоксичны, при этом хорошо взаимодействуют с организмом человека. Их преимущественно применяют как нейтральные субстанции и сорбентов в получении оригинальных фармацевтических веществ, однако и перспективность их применения в пищевой индустрии не вызывает сомнений [119].

Процедуры формирования целлюлозных гидрогелей обладают 2-мя векторами, которые обусловлены физическим и химическим сшиванием целлюлозных цепей в растворах. Выработка сшитых химическим путем гидрогелей базируется на применении сшивающих веществ в виде разных бифункциональных молекулярных структур, которые посредством ковалентных взаимосвязей сшиваются и формируют гидрофильные 3-хмерные сетчатые структурные образования. В публикациях [155, 185] обосновано то, что для целлюлозы веществами с наибольшей степенью сшивки служат полифункциональные карбодимиды, карбоновые кислоты, мочевиновые производные альдегиды и эпихлоргидрин. В работе [165] рекомендуется применять в качестве сшивающих веществ, глутаровую кислоту и альдегид, сахарозу и, кроме того, диглицидиловый этиленгликольный эфир, которые интенсивно влияют на поперечное молекулярное сшивание и по этой причине их реализуют, как биосовместимые активаторы, а в нашем случае данную функцию выполняет глицерин.

Полные поровый объем в гидрогелях и площади поровой поверхности с введением в молекулярные структуры сшивающих веществ растут заданных пределах, но интенсивное сшивание молекулярных гидрогелевых структур обуславливает в них неоднородности. По этой причине в работе [158] рекомендуется контроль типов сшивающих веществ и их концентрации в варианте, когда надо выработать однородный по своей структуре гель с изначально определенной пористостью и однородностью. При этом химические активаторы подчас ухудшают совместимость разных участков в молекулярных гелевых структурах, а иногда исключают биodeградацию данных молекулярных структур, что важно учитывать при использовании гидрогелей в фармацевтической и пищевой областях.

Известны различные способы образования целлюлозных гидрогелей, в частности бактериальный синтез, но наиболее подходящим для полученного пектинового экстракта можно назвать синтез гидрогелей, осуществляемый сшивкой растворов эфиров целлюлозы с водными молекулами, причем число и типы катализаторов и сшивающих веществ меняются при варьировании участвующих в синтезе целлюлозных производных [119].

В отношении к ингредиентному составу пектиновой композиции из которой впоследствии предполагается получить пленочную структуру, перед ее сушкой целесообразно опираться на следующие положения. Доля премикса для достижения необходимой консистенции данной композиции должна быть минимальной, но обеспечивать студнеобразование, причем превышение определенного порогового значения содержания премикса может вызвать трудности при нанесении гидрогеля на рабочую поверхность сушилки и съема сухого материала без его растрескивания и разрушения пленочной структуры. В результате проведения опытной постановочной серии экспериментов (рис. 2.5.1) выявлено, что допустимое общее содержание добавок в пектиновый экстракт не должно превышать 9% к общей массе полученной композиции, а соотношение между отдельными добавками было определено с учетом технологической и экономической целесообразности их использования (Приложение И). Сделанные выводы хорошо согласуются с известными литературными данными [9, 12, 73, 119, 142].

В итоге, постановочные эксперименты позволили предложить рациональное соотношение ингредиентов в пектиновой композиции для обеспечения определенных условий проведения процесса обезвоживания и потребительских характеристик готовой пленочной продукции.



Рисунок 2.5.1 – Результат постановочных экспериментов:

а – пленочная структура при использовании альгината натрия и глицерина;
б – пленочная структура при использовании пектинового комплекса (рис. 2.2.1) и глицерина; *в* – пленочная структура при использовании пектинового комплекса (рис. 2.2.1), микроцеллюлозы и глицерина

Ниже, в таблице 2.5.1, представлен ингредиентный состав гидрогеля на основе полученного пектинового экстракта из измельченной корки столового арбуза, включающий микроцеллюлозу и глицерин.

Таблица 2.5.1 – Рецептурный состав гидрогеля на основе пектинового экстракта из столового арбуза

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

Таким образом, базируясь на проведенные и представленные во второй главе исследования, разработан рецептурный состав гидрогеля на базе ПК, служат натуральными пленкообразователями, выработанными из вторичной ресурсной базы, ориентированный на решение задач по выработке экстракта ПК посредством глубокой обработки основных сырьевых материалов и создание оригинальной СП.

Глава 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕЛЕВОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ПЕКТИНОВОГО ЭКСТРАКТА, КАК ОБЪЕКТА СУШКИ И ЕЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Все преимущества пленочных структур полученных как из растительного, так и животного сырья в значительной степени определяются их структурно-механическими характеристиками, прогнозирование которых возможны при изучении воздействия внутреннего переноса тепловой энергии и влаги на скорость их обезвоживания, а также на процессы формо- и структурообразования. Поэтому при проведении тепло-технологических исследований процесса, в частности, конвективной сушки гелевой структуры на основе пектинового экстракта (арбузный полуфабрикат), на первой стадии экспериментальных исследований получают данные об ее структурных, теплофизических, и гигроскопических параметрах. И только потом проводят исследования процесса в опытной сушильной установке при изменении режимных параметров и рекомендуемых методах воздействия на кинетику и интенсивность процессов тепломассообмена.

3.1 Теплофизические и структурно-механические характеристики арбузного полуфабриката, как объекта сушки

Одним из важных параметров пищевого продукта служит плотность ρ , которую для влажных материалов, подобных гидрогелям в пределах варьирования температуры (T) от 273 до 363К можно считать неизменной и по этой причине можно осуществить единичный опыт пикнометрическим способом [26, 41, 77].

В процессе конвективной сушки из жидкого арбузного полуфабриката получается пленочная структура, причем плотность в течение обезвоживания варьируется по причине варьирования влажности W материала. В таком варианте можно найти данный параметр только в начальном и итоговом состоянии объекта сушки, а промежуточной величины с достаточной погрешностью определить путем линейной аппроксимации в диапазоне между ними.

На рисунке 3.1.1 представлены фотографии жидкого арбузного полуфабриката, имеющего концентрацию сухих веществ 9% и полученной пленочной структуры из него влагоудалением с влажностью 10%.

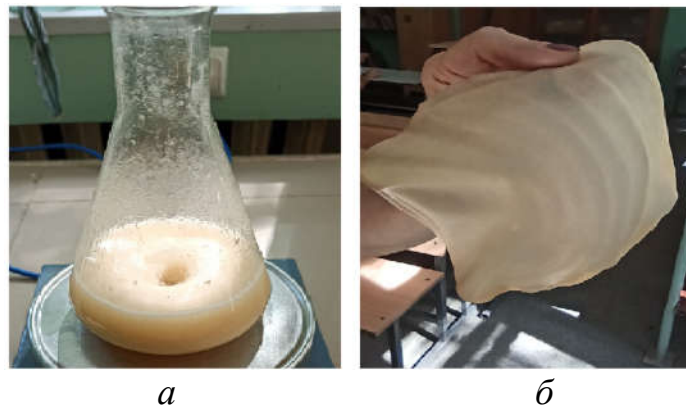


Рисунок 3.1.1 – Фотографии арбузного полуфабриката (а) и полученной из нее пленочной структуры (б)

Эмпирические данные по нахождению плотностных характеристик жидкого полуфабриката и конечного пленочного продукта представлены в таблице 3.1.1 и Приложении К.

Таблица 3.1.1 – Плотность жидкого полуфабриката и сухой пищевой пленки

Наименование	Плотность ρ , кг/м ³
Арбузный полуфабрикат, полученный из пектинового экстракта, концентрация сухих веществ 9%	1028±3
Полимерный материал, полученный методом конвективной сушки арбузного полуфабриката, концентрация сухих веществ 90%	652±3

На рисунке 3.1.2 показана закономерность варьирования физической ρ материала в пределах варьирования T 273÷363°K и W от 0,1 до 0,91 кг/кг. Преимущественно ρ обусловлена химсоставом продукта и W .

Данные, показанные на рисунке 3.1.2 аппроксимированы в пределах варьирования $0.1 \leq W \leq 0.91 \text{ кг/кг}$ и T от 273 до 363°K :

$$\rho = 4,64W + 605,6. \quad (3.1.1)$$

В работах [56, 79] предложен способ нахождения комплекса теплофизических характеристик (ТФХ) жидко- и пастообразных, а также тонкодисперсных продуктов, опирающийся на термоинерционные параметры термодатчика.

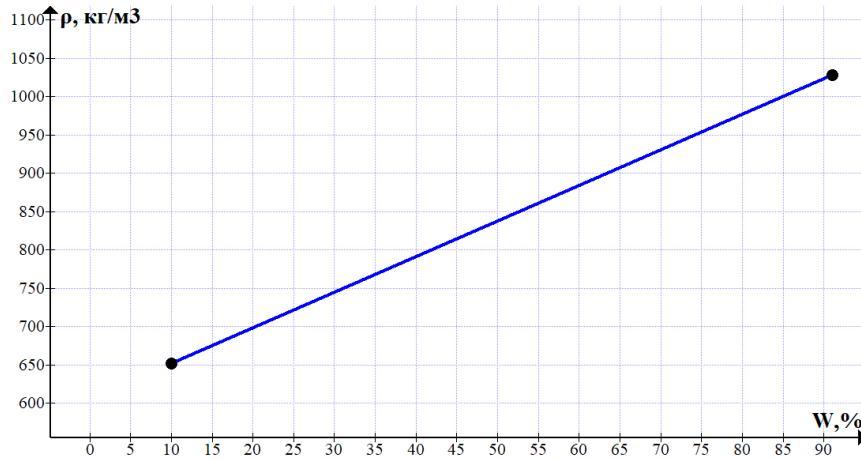


Рисунок 3.1.2 – Зависимость ρ объекта изучения от W , в пределах варьирования T $273 \div 363^\circ\text{K}$

Данный подход дает возможность оперативно находить удельную теплоемкость c_M , коэффициент тепло- λ и температуропроводности a образца в течение его термообработки, что исключается в иных способах [30].

Известные опытные данные [56, 79] приводят к выводу о том, что, интенсивность повышения T термического датчика, оперативно введенного в пробу, обусловлен его параметрами, что и легло в основу приведенного способа нахождения ее ТФХ, причем интенсивность повышения T термического датчика находят их формулы [142]:

$$\theta_{(\tau)} = \frac{T_c - T_{2(\tau)}}{T_c - T_0} = \frac{2K}{\pi} \int_0^\infty \frac{\exp(-u^2 Fo) u^2 du}{(u^2 - K)^2 + u^2 K^2}, \quad (3.1.2)$$

где $\theta_{(\tau)} = \frac{T_c - T_{2(\tau)}}{T_c - T_0} - T$ в безразмерном виде; Fo – число Фурье; $K = mc_1\rho_1$ – критерий, обуславливающий соотношение объемных c пробы и датчика; $m = \left(\frac{c_2\rho_2}{3}\right)^{-1}$ – его константа, $((\text{м}^3 \cdot \text{K})/\text{Дж})$; $c_1\rho_1$ и $c_2\rho_2$ – объемные c для пробы и датчика,

(Дж/(м³·К)).

В исследованиях, проведенных авторами [56] обосновано, что по интенсивности повышения T датчика можно судить как о величине λ , так и о значениях a и $c_1\rho_1$ [144]. Для этих целей можно применить разложение $\theta_{(\tau)}$ в ряд при высоких величинах Fo , в итоге получим [56]:

$$\theta_{(\tau)} = \frac{1}{2K\sqrt{\pi}\sqrt{Fo^3}} \left\{ 1 + \frac{3(2-K)}{2K} \cdot \frac{1}{Fo} + \frac{15[(K-2)^2-1]}{4K^2} \cdot \frac{1}{Fo^2} + \right. \\ \left. + \frac{105(K-2)[(K-2)^2-2]}{8K^3} \cdot \frac{1}{Fo^3} + \dots + R_n(Fo) \right\}. \quad (3.1.3)$$

Для остаточного слагаемого $R_n(Fo)$ погрешность, приемлемая при представлении ряда ограниченной суммой, по модулю менее, чем ее не исключенное последнее слагаемое. По этой причине, оставив лишь три слагаемых, имеем соотношение для нахождения Fo и K :

$$\theta_{2(\tau)} \approx \frac{1}{2K\sqrt{\pi}\sqrt{Fo^3}} \left\{ 1 + \frac{3(2-K)}{2K} \cdot \frac{1}{Fo} + \frac{15[(K-2)^2-1]}{4K^2} \cdot \frac{1}{Fo^2} \right\} \quad (3.1.4)$$

с максимальной относительной ошибкой:

$$\delta_{max} \leq \left| \frac{15[(K-2)^2-1]}{4K^2} \cdot \frac{1}{Fo^2} \right|. \quad (3.1.5)$$

Соотношение 3.1.4 для $1 < K < 2$ в координатной сетке $y = \theta_{2(\tau)}(Fo)\sqrt{Fo^3}$ и $x = 1/Fo$ имеет параболический тип с пиком при Fo_{max} . Эмпирически это обосновывается для разных продуктов в публикации [56].

Согласно необходимому условию функциональной экстремальности 3.1.4 имеем:

$$\frac{1}{Fo} = -\frac{1}{5} \cdot \frac{(2-K)K}{[(K-2)^2-1]}, \quad (3.1.6)$$

$$\theta_{2(\tau)}\sqrt{Fo^3} = -\frac{1}{2K\sqrt{\pi}} \left[\frac{0.15(2-K)^2}{(K-2)^2-1} - 1 \right]. \quad (3.1.7)$$

Впоследствии, приведя эмпирические данные в графической форме $\theta\sqrt{\tau^3} = f\left(\frac{1}{\tau}\right)$, находим θ_{max} и далее из соотношения:

$$\theta_{max} \sqrt{\left\{ -\frac{(2-K)K}{5 \cdot [(K-2)^2 - 1]} \right\}^{-3}} = \frac{1}{2K\sqrt{\pi}} \left[\frac{0.15(2-K)^2}{(K-2)^2 - 1} - 1 \right], \quad (3.1.8)$$

выведенного из 3.1.6 и 3.1.7 находим K и из 3.1.7 Fo_{max} , соответствующий K .

Итоговые соотношения получаем в виде:

$$a = \frac{Fo_{max} R^2}{\tau_{max}}; \quad (3.1.9) \quad c_M \rho_M = \frac{K}{m}; \quad (3.1.10) \quad \lambda = \frac{Fo_{max} R^2}{\tau_{max}} \cdot \frac{K}{m}; \quad (3.1.11)$$

где R – эквивалентный радиус зонда, м.

Проведение экспериментальных исследований по изысканию ТФХ арбузного полуфабриката по приведенному способу осуществлялось посредством электронного термометра «ЛТ-300». В нем воспринимающим элементом служит пленочный термодатчик из платины, покрывающий керамическую поверхность. Данный элемент длительно стабилен и хорошо воспроизводит варьирование T . На рисунке 3.1.3 показана схема опытного стенда.

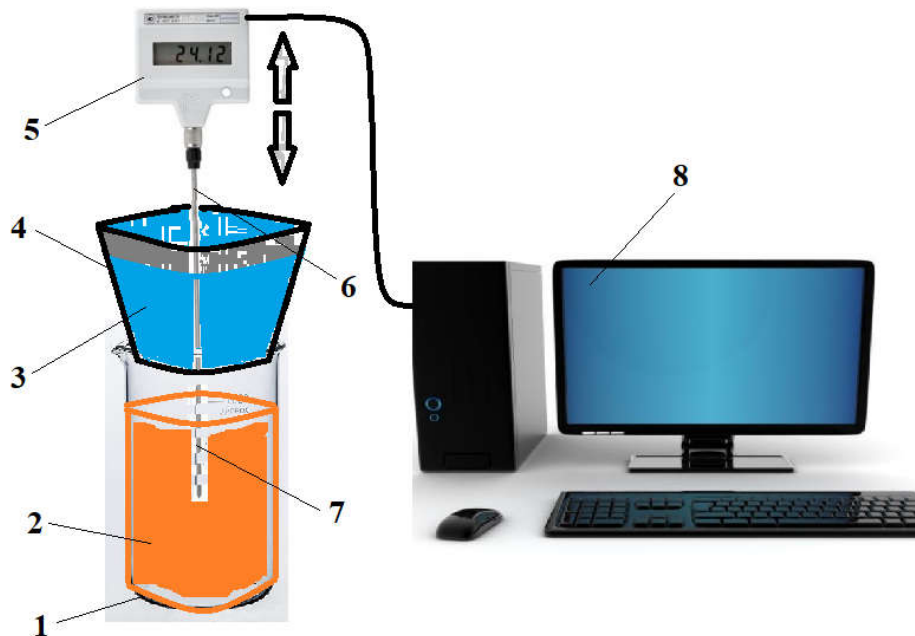


Рисунок 3.1.3 – Схема экспериментальной установки: 1 – стакан для исследуемого материала; 2 – материал, имеющий комнатную температуру; 3 – вода со льдом для поддержания низкой температуры, близкой к 0°C ; 4 – бумажный стакан; 5 – ЛТ-300; 6 – щуп измерительный в начальном положении; 7 – щуп измерительный в конечном положении; 8 – ЭВМ с программой ThermoChart

Порядок проведения эксперимента следующий. Собирается установка, согласно схеме, представленной на рисунке 3.1.3. Доводится T водолеяной композиции в емкости из бумаги до $1...4^{\circ}\text{C}$ и далее активизируется программный продукт ThermoChart на компьютере, который воспринимает T с помощью «ЛТ-300» и представляет ее на мониторе.

Образец с комнатной T загружается в емкость для анализа, на которой устанавливается емкость из бумаги с водолеяной композицией и термическим щупом. Далее при соединении датчика с компьютером на монитор выводится T оперативно зондом протыкается дно емкости из бумаги, и он погружается в зону замера T образца. Программный продукт отражает варьирование T .

Опыт как минимум пятикратно дублируется, полученные результаты табулируются и по способу [56] осуществляется определение ТФХ. Подробно расчет представлен в Приложении Л к диссертационной работе. Полученные в итоге данные для арбузного полуфабриката, при его влажности 91%, представленные в таблице 3.1.2.

Таблица 3.1.2 – Результаты по экспериментальному определению ТФХ объекта исследования

Влажность $W, \%$	Удельная теплоемкость $c_m, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	Температуропроводность $a \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	Коэффициент теплопроводности, $\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$
≈ 91	≈ 3439	$\approx 11,59$	$\approx 0,41$

Впоследствии проводят оценку ТФХ в зависимости от W при $0.1 \leq W \leq 0.91$ кг/кг. Изменение теплоемкости при варьировании влажности пищевых продуктов можно с допустимой точностью принять линейным, поэтому информация о величине этого параметра в нескольких, как минимум в двух точках, дает возможность получить аппроксимирующую зависимость его влажности в заданном диапазоне, используя методы экстра- или интерполяции. Что касается коэффициента теплопроводности, которая может быть рассчитана по теоретической формуле 3.1.15, полученной на основе анализа, проведенного М.А. Громовым для жидких пищевых продуктов, и коэффициента температуропроводности, которая является комплексной величиной вышеназванных трех, то получить искомые зависи-

мости для этих характеристик целесообразно расчетным путем [29, 30].

Информация о величине коэффициента теплоемкости арбузного полуфабриката при фиксированных значениях его влажности была получена экспериментальным путем на опытной установке, представленной на фотографии (рис. 3.1.4). Так как высокоточный способ адиабатического калориметра непригоден для биополимеров [129], появляется целесообразность применения калориметрического способа [90].



Рисунок 3.1.4 – Экспериментальная установка для определения теплоемкостипищевых материалов

Данный способ реализуется посредством нахождения калориметрической константы K , точно учитывающей теплотери, чувствительной схемы для замеров, дающей возможность за несколько минут проводить оценку малых (около 2°K) величин T .

Опытный стенд (рис. 3.1.4) скомпонован из 2-х секций – термической и измерительной, первая из которых является термосом, куда загружаются изучаемые пробы, а вторая в свою очередь, тоже скомпонована из 2-х схем – питания и замера разности электрических потенциалов и силы тока в нагревательном отсеке и замера T и ее фиксирования в течении опыта [75]. Схема экспериментального стенда показана на рисунке 3.1.5.

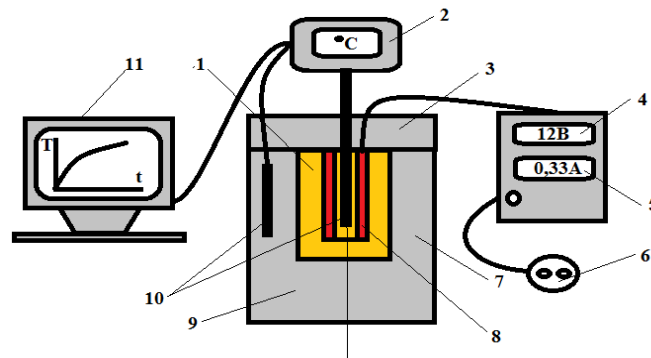


Рисунок 3.1.5 – Принципиальная схема опытной установки для определения теплоемкости материалов: 1 – исследуемый материал; 2 – дисплей термодатчика; 3 – крышка калориметра; 4 – вольтметр; 5 – амперметр; 6 – источник питания; 7 – калориметр (термос); 8 – электрона-греватель; 9 – теплоизоляционный материал; 10 – термопары; 11 – ЭВМ.

Массовая удельная теплоёмкость находится следующим образом:

$$C_m = \frac{Q_{\text{пол}}}{M_{\text{обр}} \cdot \Delta T} \quad (\text{Дж/кг} \cdot \text{К}), \quad (3.1.12)$$

где $Q_{\text{пол}}$ – полезное тепло, подведенное к пробе, Дж; $M_{\text{обр}}$ – ее масса, кг; ΔT – разность T в ней, °К.

Из 3.1.12 ясно, какие параметры подлежат замеру, причем по закону Джоуля-Ленца:

$$Q_{\text{пол}} = U \cdot I \cdot \Delta t \quad (\text{Дж}), \quad (3.1.13)$$

где U – разность электрических потенциалов в нагревательном отсеке, В; I – сила тока в нем, А; Δt – продолжительность прохождения тока, с.

Поместить изучаемые пробы биополимерных материалов в герметичные резервуары и, следовательно, использовать высокоточные адиабатические калориметры не представляется возможным, поэтому в нашем варианте резонно минимизировать теплотери, организовав хорошую теплоизоляцию пробы.

Калориметрическая постоянная, которую находят из табулированных значений водной теплоёмкости, обладает, также, как и этот параметр, зависимостью T , которую опытным путем при варьируемой в определенных пределах T в термостате. Результаты данной опытной серии при 25...40°C приведены в публикации

[74], а по причине несущественного изменения калориметрической постоянной в данных пределах изменения T можно с приемлемой погрешностью считать ее равной 15,3 Дж.

Итоговое соотношение для арбузного полуфабриката выглядит следующим образом:

$$C_m = \frac{U \cdot I \cdot \Delta\tau - K}{M_{\text{обр}} \cdot \Delta T},$$

где K – калориметрическая постоянная, Дж.

Эмпирические данные по нахождению C_m для объекта исследования представлены в таблице 3.1.3 и в Приложении М к диссертационной работе. Дальнейшее изменение теплоемкости полуфабриката было получено, используя методы экстра- или интерполяции.

Таблица 3.1.3 – Значения коэффициента теплоемкости жидкого полуфабриката при разных влажностях

Влажность образца, %	Удельная теплоемкость C_m , Дж/(кг·К)
91	3439
80	3393
70	3225
60	3137
50	3113

На рисунке 3.1.6 приведена аппроксимированная зависимость C_m от W при 273...363°К и W в интервале от 0,1 до 0,91 кг/кг.

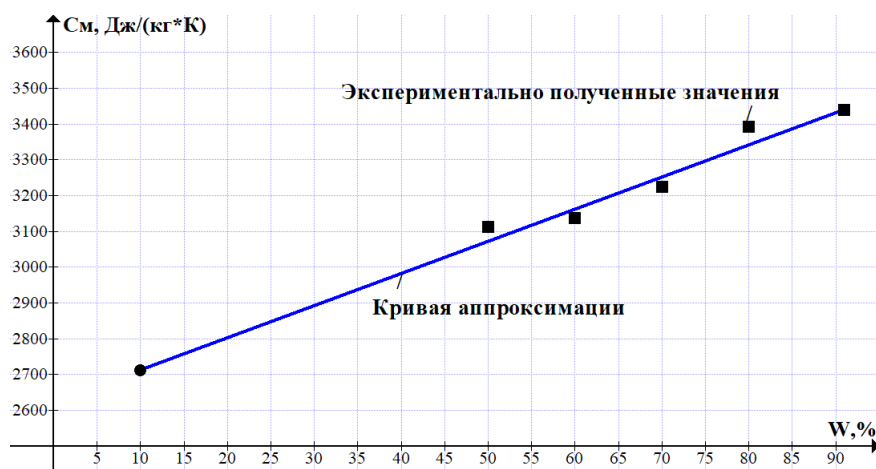


Рисунок 3.1.6 – График зависимости теплоемкости объекта исследования от его влажности, в интервале температур 273...363°К

Графическая зависимость 3.1.6 описана соотношением:

$$c_M = 8,97W + 2622. \quad (3.1.14)$$

λ в отличие от C_M не подчиняется правилу аддитивности и по этой причине его можно найти по эмпирической формуле 3.1.15, предложенной авторами справочника по ТФХ пищевых продуктов [30].

$$\lambda = \frac{B}{\alpha} \rho, \quad (3.1.15)$$

где B – константа, обусловленная типом жидкой среды и ее W [30]; ρ – для экстракта, кг/м^3 ; α – параметр, обусловленный степенью ассоциации [30].

В соотношении 3.1.15 B является обобщенный для жидких биополимеров показателем, который нуждается в корректировке для конкретного объекта, в частности, арбузного полуфабриката, путем введения поправочного показателя $B_{\text{поп}}$, путем соотношения опытного и рассчитанного значения по 3.1.16 при идентичных W [30].

$$B_{\text{поп}} = \frac{A_T \cdot c_M \cdot \rho^{\frac{1}{3}}}{M^{\frac{1}{3}}}, \quad (3.1.16)$$

где $A_T = 0,428 \cdot 10^{-7}$ – инвариант, обусловленный T жидкой среды и не обусловлен ее типом [30]; $M = 18$ – молярная масса жидкой основы полуфабриката.

Подставив зависимость 3.1.16 в уравнение 3.1.15, получим:

$$\lambda = \frac{A_T' \cdot c_M \cdot \rho^{\frac{1}{3}}}{\alpha} \rho, \quad (3.1.17)$$

где $A_T' = \frac{0,428}{18^{1/3}} \cdot 10^{-7} = 0,1633 \cdot 10^{-7}$ – инвариант, который определяется температурой жидкости и зависит от ее вида.

Зная значения λ , c_M и ρ для влажности полуфабриката, равной 91%, найдем из уравнения 3.1.17 величину характеризующую степень ассоциации, т.е. α :

$$\alpha = \frac{A_T' \cdot c_M \cdot \rho^{\frac{1}{3}}}{\lambda} \rho = \frac{0,1633 \cdot 10^{-7} \cdot 3439 \cdot 1028^{\frac{1}{3}}}{0,41} 1028 = 1,4211.$$

Определив величину α , запишем математическую зависимость искомой теплофизической характеристики λ от ее влажности W в следующем виде:

$$\lambda(W) = \frac{A_T' \cdot c_M(W) \cdot \rho(W)^{\frac{1}{3}}}{\alpha} \rho(W) \quad (3.1.18)$$

или

$$\lambda(W) = A_T'' \cdot c_M(W) \cdot \rho(W)^{\frac{1}{3}} \cdot \rho(W), \quad (3.1.19)$$

где $A_T'' = A_T' / \alpha = 0,1149 \cdot 10^{-7}$.

На рисунке 3.1.7 приведена зависимость $\lambda(W)$.

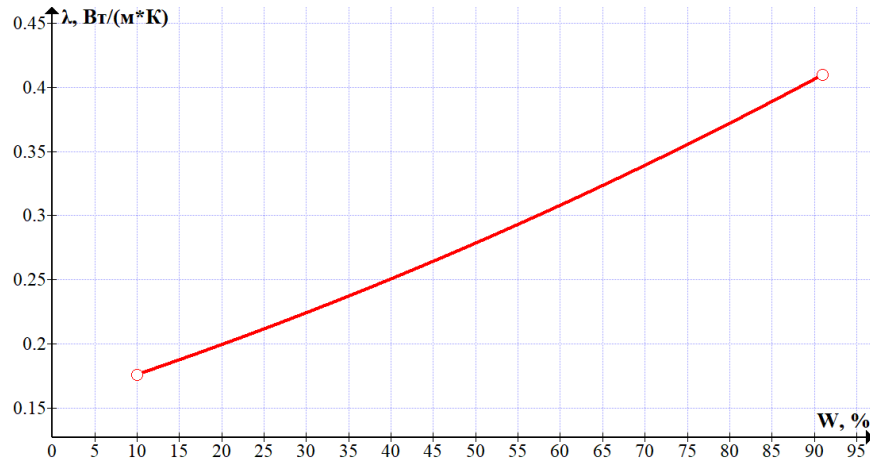


Рисунок 3.1.7 – График зависимости коэффициента теплопроводности объекта исследования от его влажности, в интервале температур 273...363°K

a для определенных пределов варьирования W исследуемого гидрогеля от 0,1 до 0,91 кг/кг определяется, как зависимость $a(W) = \frac{\lambda(W)}{c(W)\rho(W)}$, которая приведена на рисунке 3.1.8.

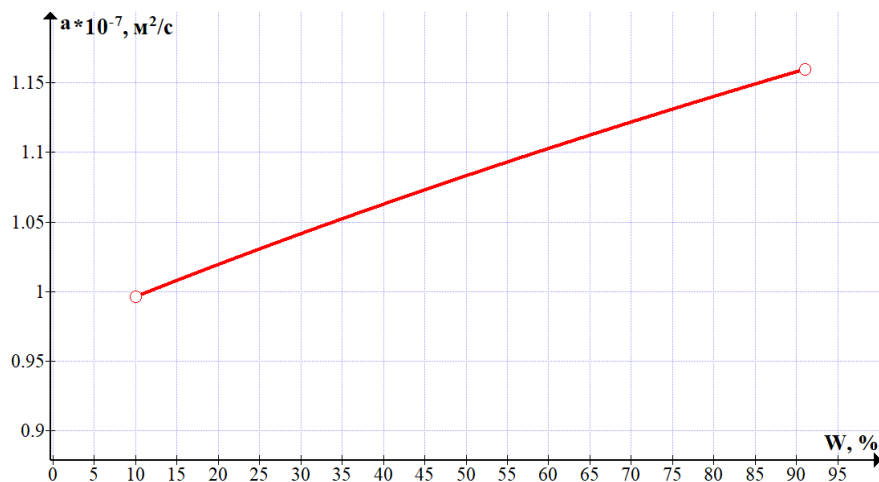


Рисунок 3.1.8 – График зависимости коэффициента температуропроводности объекта исследования от его влажности, в интервале температур 273...363°K

Надо иметь в виду, что при нахождении режимных параметров обезвоживания арбузного полуфабриката и габаритов сушилок необходимо определение расходных соотношений продукта и теплоносителя с учетом условий организации плотного, взвешенного слоев и др. [13, 36]. Причем для этих целей служат материальные и тепловые балансовые соотношения, кинетические и статические закономерности, базирующиеся на 3-х термодинамических принципах [5, 45, 66, 68]. В эти соотношения включают коэффициенты тепло- α и массоотдачи β . Несмотря на множество отечественных и иностранных исследований задача их нахождения до сих пор однозначно не решена [45]. Минимальные величины $\alpha = 10 \dots 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ присутствуют при теплообмене с газовыми средами, а далее с жидкими средами – $\alpha = 200 \dots 10000$.

В наиболее приемлемых рекомендованных вариантах сушки исследуемого полуфабриката предполагается обезвоживание его слоя на поверхности вальца или плоского транспортера. В том и другом случае с теплофизической точки зрения рассматривается вариант комбинированного энергоподвода путем конвекции с внешней стороны слоя и кондукции с внутренней его стороны при контакте с нагретой конвейерной лентой или поверхностью вальца (рис. 3.1.9), поэтому для расчета теплотехнических параметров сушки, в частности, коэффициента теплоотдачи, можно использовать апробированную методику, изложенную в работе [76].

Ниже приведены критериальные уравнения, описывающие конвективную теплоотдачу в зазоре между двумя плоскими поверхностями, изображенном на рисунке 3.1.9, в условиях вынужденного движения среды в нем.

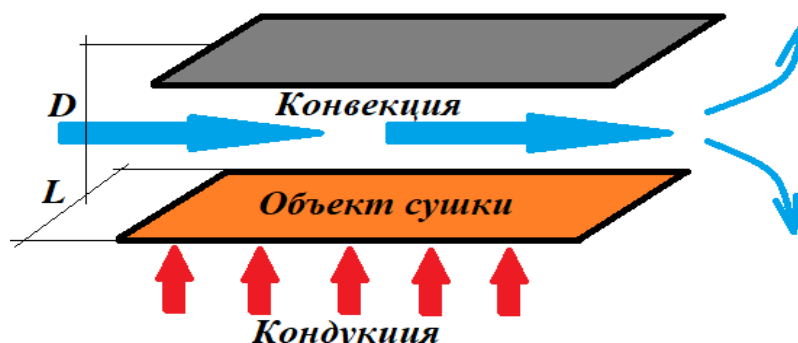


Рисунок 3.1.9 – Плоский зазор между объектом сушки и верхней частью сушильной камеры

Зазор образован двумя параллельными плоскостями с определяющим размером L в направлении движения потока среды, и расстоянием D между плоскостями.

В работе было использовано следующее критериальное уравнение:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda_{sr}} = 0.037 \cdot Re_L^{0.8} \cdot Pr_{sr}^{0.43} \cdot \left(\frac{Pr_{sr}}{Pr_s} \right)^{0.25}, \quad (3.1.20)$$

где L – определяющий размер, м; λ_{sr} – коэффициент теплопроводности сушильного агента, Вт/(м·К); $Re_L = \frac{\rho_{sr} \omega_{sr} L}{\mu_{sr}}$ – критерий Рейнольдса; Pr_{sr} , Pr_s – критерии Прандтля, которые вычисляются при определенной температуре, равной температуре сушильного агента на входе в зазор и при средней температуре на поверхности объекта сушки ($Pr = \frac{\nu}{a}$); ω_{sr} – интенсивность перемещения теплоносителя, м/с; ρ_{sr} – его плотность, кг/м³; μ_{sr} и ν – его коэффициенты динамической и кинематической вязкости, Па·с и м²/с; a – коэффициент температуропроводности сушильного агента, м²/с.

Следует отметить, что представленный в работе процесс двустороннего комбинированного нагрева продукта, изменяющего по мере движения свои тепловые характеристики, может быть представлен как движение вдоль греющей поверхности, так и как движение по каналу. В этих двух случаях определяющие размеры будут разными – в первом случае – длина L , во втором случае некоторая характеристика, к примеру, размер сечения канала L^* . Однако на настоящий момент, хотя решение этого вопроса неоднозначно, определяющим размером принято считать в случае конвективного теплообмена длину участка обдуваемой поверхности от исходной точки до точки стабилизации теплообмена, а значит и величины α . На сегодня методики теоретического или эмпирического корректного определения длины данной зоны не существует, поэтому величина определяющего геометрического размера продольно обтекаемых теплообменных поверхностей выбирается в разумных технико-экономических пределах при проектировании и конструировании теплообменных аппаратов.

Учитывая, что наиболее целесообразным способом сушки исследуемого по-

луфабриката 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 $2,7 \text{ м/с}$ (Приложение Н), направленная прямо- или противотоком. Следует отметить, что превышение порогового значения скорости сушильного агента приводят к деформации поверхностного слоя, а также вероятности уноса геля (сдувание) с рабочей поверхности сушилки, причем такие величины скорости рекомендуются для промышленных ленточных и вальцовых конвективных сушилок [28, 47, 65, 70, 118, 127]. Что касается определяющего размера L^* , то его значение можно ограничить величиной в $0,5 \text{ м}$ [130], т.е. принята характеристика сечения канала, которая соответствует эквивалентному диаметру $d_э$, рассчитанному по известной формуле:

$$d_э = 4S/\Pi, \quad (3.1.21)$$

где S – площадь сечения поперечного прямоугольного канала, имеющего ширину $0,5 \text{ м}$ и высоту $0,125 \text{ м}$; 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.

Данный выбор определяющего размера 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.

В результате упрощения и представления в более компактной форме зависимости (3.1.20) проведем его математическое преобразование, а также коррекцию численного коэффициента в нем и получим следующее выражение для расчета α .

$$\alpha = 4,35 \left(\frac{\rho_{sr} \omega_{sr}}{L^*} \right)^{0,4} \cdot \frac{\lambda_{sr}^{0,67} \cdot C_{sr}^{0,33}}{\mu_{sr}^{0,07} \cdot D^{0,2}} \cdot \Psi^{0,25}, \quad (3.1.22)$$

где ρ_{sr} – плотность теплоносителя, кг/м³; ω_{sr} – скорость теплоносителя, м/с; C_{sr} – теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К); μ_{sr} – коэффициент динамической вязкости теплоносителя, Па·с; D – высота канала, м; $\Psi = \frac{Pr_{sr}}{Pr_s}$.

В таблице 3.1.4 представлены сведения для расчета максимального значения безразмерного комплекса Re_L .

Таблица 3.1.4 – Значения величин ω_{sr} , L^* , ρ_{sr} и μ_{sr} для расчета критерия Рейнольдса [138]

$t, ^\circ\text{C}$	$\omega_{sr}, \text{м/с}$	$\mu_{sr}, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\rho_{sr}, \text{кг/м}^3$	$L^*, \text{м}$
100	2,7	$21,9 \cdot 10^{-6}$	0,946	0,5

Величина D в уравнении 3.1.22, т.е. расстояние между поверхностью объекта сушки и верхней внутренней поверхностью корпуса сушильной камеры, в аспекте уменьшения габаритов сушилки должна быть минимальной, но не менее 125 мм, согласно техническим рекомендациям по проектированию агрегатов для обезвоживания [47, 118, 127]. В этой связи рекомендуемое значение D , равное 125 мм, обусловленное минимизацией возможного загрязнения внутренней поверхности рабочей камеры, было принято, как исходное при проведении исследований и проектирования технологического оборудования. Что касается скорости теплоносителя в сушильной камере, то при очевидности роста интенсивности влагоудаления в случае ее увеличения, целесообразно при определенном запасе, ввиду возможного варьирования этого параметра, принять ее величину равной 2,5 м/с.

Расчет симплекса Ψ в уравнении 3.1.22 связан с выявлением средней температуры на поверхности объекта сушки, которая, как и температура теплоносителя является важным параметром процедуры обезвоживания, т.к. влияет на интенсивность этого процесса в любом из его периодов. Влияние температуры обусловлено, во-первых, тем, что с ее повышением возрастает сушильный потенциал воздуха (психрометрическая разность температур), а во-вторых, резко увеличивается скорость внутреннего переноса влаги, т.к. возрастает коэффициент потенциалопроводности материала [28, 65].

Известно, что результаты экспериментальных исследований процесса суш-

ки пищевых материалов могут быть представлены в виде зависимостей средних значений температуры объектов обезвоживания от его продолжительности, при этом их характер для большинства высоковлажных материалов типичен [113]. Анализ выводов, обоснованных в классических работах [65, 113] показывает, что для большинства промышленно реализуемых процессов сушки пищевых материалов характерно отличие температуры сушильного агента от температуры объекта сушки на 15...20%.

Таким образом, с допустимой для инженерных расчетов точности, можно принять, что среднее значение температуры на поверхности объекта сушки, которая является важным параметром процедуры обезвоживания, будет меньше температуры сушильного агента на 20%, т.е. ориентировочно составлять 80°C. Такое заключение позволяет вычислить значение симплекса Ψ , а в таблице 3.1.5 представлен результат расчета и данные для его вычисления (кинематическая вязкость ν и коэффициент температуропроводности a сушильного агента).

Таблица 3.1.5 – Данные для расчета симплекса Ψ и результат расчета [138]

$t, ^\circ\text{C}$	Наименование	$\nu, \text{м}^2/\text{с}$	$a, \text{м}^2/\text{с}$	Ψ
100	Сушильный агент	$23,13 \cdot 10^{-6}$	$33,6 \cdot 10^{-6}$	0,986
80	Арбузный полуфабрикат	$21,09 \cdot 10^{-6}$	$30,2 \cdot 10^{-6}$	

В соотношении 3.1.22 значения практически всех величин, входящих в него, уже известны (табл. 3.1.4,5) кроме коэффициентов теплоемкости C_{sr} и теплопроводности λ_{sr} сушильного агента. Ниже, в таблице 3.1.6 представлены эти параметры и, кроме того, сам результат расчета коэффициента теплоотдачи α .

Таблица 3.1.6 – Значения величин C_{sr} и λ_{sr} для расчета коэффициента теплоотдачи [138]

$t, ^\circ\text{C}$	$C_{sr}, \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$\lambda_{sr}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
100	1009	0,0321	26,53

Для наглядности и удобства использования, при исключении математических операций, на рисунке 3.1.10 представлен график зависимости коэффициента теплоотдачи α от скорости сушильного агента (воздух) ω_{sr} в случае искусственной конвекции и традиционно применяемой температуре теплоносителя ($\approx 100^\circ\text{C}$)

в контакте с поверхностью пищевого продукта ($\approx 80^\circ\text{C}$).

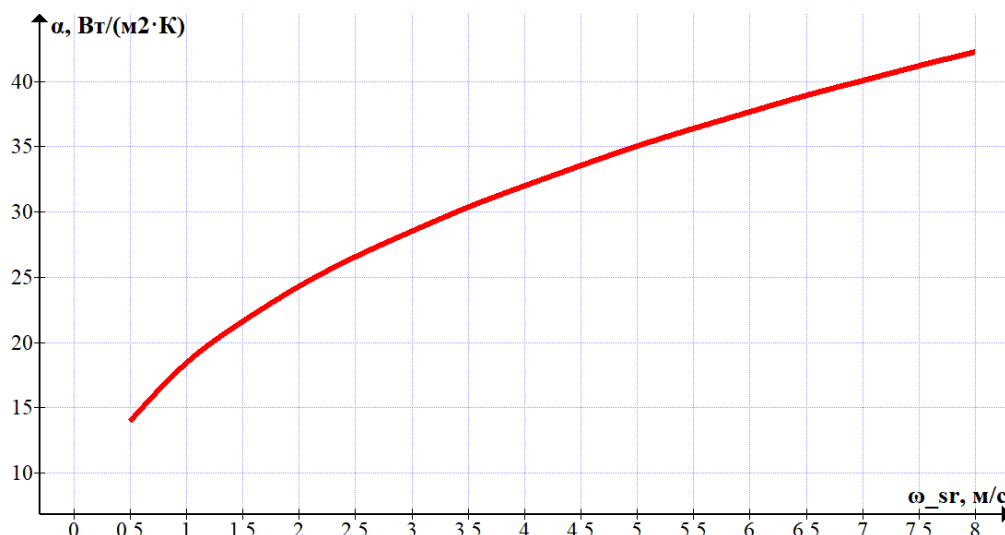


Рисунок 3.1.10 – График зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости сушильного агента при его температуре 100°C

Таким образом, была скорректирована и модифицирована критериальная зависимость (3.1.20) в (3.1.22) для определения α с учетом известных литературных данных и авторских тестирующих экспериментов, что дает возможность рассчитать искомый коэффициент в зависимости от варьирования влияющих на него физических параметров.

3.2 Гигроскопические свойства полученного полуфабриката

С целью эмпирического нахождения гигроскопических параметров (ГП) и построения сорбционных изотерм (ИС) применяются статические и динамические методы, 2-ой из которых заключается в продолжительной выдержке навесок до достижения равновесного состояния в среде с определенными относительной влажностью и T , а по 2-му способу нахождение среднеобъемной влажности навески осуществляют при равновесном состоянии внешней среды с поверхностью

материала. Данный подход осуществляется также и посредством хроматографии среды, проходящей сквозь слой вещества или над ним [113].

В нашем варианте нахождение ГП арбузного полуфабриката осуществлялось тензометрическим способом Ван Бамелена [5, 131], по которому навески материала с определенной W подвергались выдержке в эксикаторной емкости с раствором различно концентрированной серной кислоты. Причем каждая концентрация сернокислого раствора при определенной T обуславливает фиксированное парциальное давление паров воды, т.е. фиксированную величину относительной влажности паровоздушной среды φ [27, 72]. Для навески, взвешенной с точностью до 0,001 г, при окончании варьирования ее вес вступает в состояние динамического равновесия.

Влажность W_p в состоянии равновесия (Приложение II) находится следующим образом:

$$W_p = \frac{G_2 - G_1(1 - W_{обр})}{G_2}, \quad (3.2.1)$$

где $W_{обр}$ – исходная для навески, кг/кг, G_1 – ее исходная масса; G_2 – ее в равновесном состоянии, кг;

Эмпирическая оценка ГП проводится, в том числе, для выбора итогового для хранения W материала. При построении ИС допускают [5, 28, 72], что величина активности водной среды A_w и φ идентичны по причине того, что паровое парциальное давление над поверхностью образца и в ядре паровоздушной среды в эксикаторной емкости не отличаются друг от друга. В результате опытной серии построены ИС арбузного полуфабриката, при T , равных 298 и 323°K (рис. 3.2.1).

Согласно классификации [64, 65, 66, 67] среди всех влажных веществ можно выделить ряд подгрупп с учетом их коллоидно-физических параметров: коллоидные, капиллярно-пористые, и комплексные. Данная группировка часто используется при обобщении эмпирических данных. Сухая пленочная структура (рис. 3.1.1) представляет собой капиллярно-микропористое вещество с множеством пор и капилляров, сквозь которые может перемещаться водяной пар.

Использование теоретических положений полимолекулярной адсорбции по-

звалили С. Брунауэру, Л. Демингу, В. Демингу, Р. Эммету и Б. Теллеру [20, 72] классифицировать вещества по виду ИС.

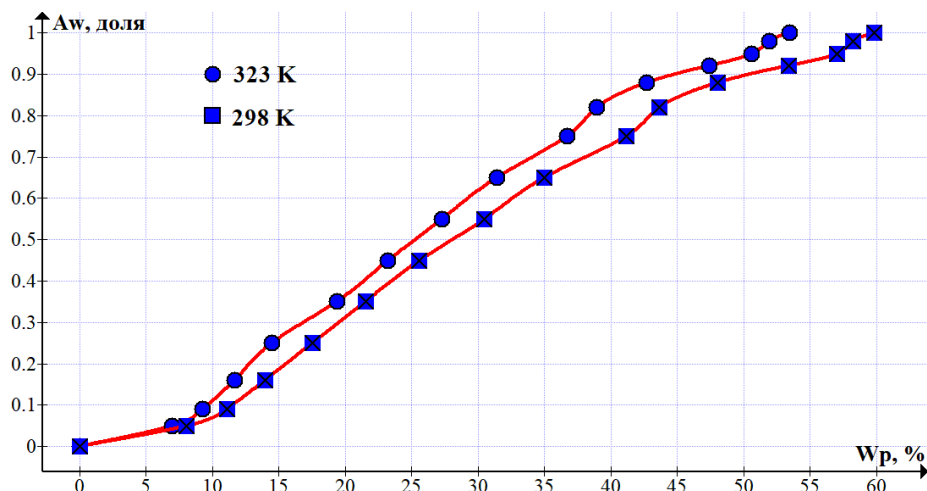


Рисунок 3.2.1 – Кривые равновесия при сорбции влаги сухим полуфабрикатом

На данные ИС присутствуют 3-и зоны, которые более отчетливо видны при полулогарифмической интерпретации ИС (рис. 3.2.2).

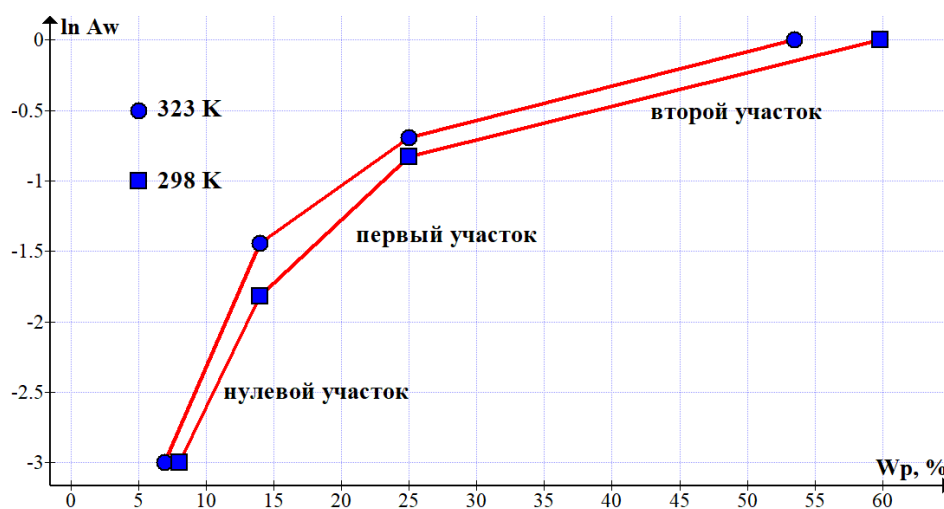


Рисунок 3.2.2 – Кривые равновесия, построенные в полулогарифмических координатах

В нашем варианте ИС целесообразно причислить ко к II-му виду [20]. Это объясняется тем, что при осуществлении сорбционной процедуры при перманентном росте φ изотермы II-го вида показывают полимолекулярную адсорбцию для более сильного взаимодействия адсорбат – адсорбент, а III-ий тип изотерм так же указывает на полимолекулярную адсорбцию, но здесь вклад взаимодействий

адсорбат – адсорбат выше.

Г.К. Филоненко [139] рекомендовал математическую интерпретацию ИС в виде 2-х соотношений. С этой целью ИС (рис. 3.2.2) разделяют на 2 зоны: первая из которых наблюдается от W_0 до W_m , а 2-я – от W_m и выше. Точка W_0 на ИС обуславливает трансфер от моно- к полимолекулярной адсорбции и появляется на пересечении нормали из первой характерной точки к оси абсцисс. Обычно, в промышленных условиях обезвоживания мономолекулярный слой влаги не отводится и по этой причине зона на ИС от 0 до W_0 не подлежит аппроксимации. Точка W_m обуславливает трансформацию полимолекулярной влаги в осмотически и капиллярно связанную и характеризуется пересечением нормали из второй сингулярной точки на изотерме к оси абсцисс (рис. 3.2.3). Следуя этому подходу, на изотермах, представленных на рисунке 3.2.3 можно эти участки выделить: участок от W_0 до W_m , характеризует адсорбционно-связанную влагу и участок от W_m и далее – структурную, в частности осмотическую, и капиллярную влагу.

Итак, на ИС оставляют 2 зоны, 1-я из которых отсчитывается от момента окончания превалирования сильносвязанной мономолекулярной влаги, причем W при которой рекомендуется, как итоговая для хранения 25 до 27%.и находится на границе с зоной превалирования адсорбционно-связанной влаги $0,24 \leq W_p \leq 0,26$,

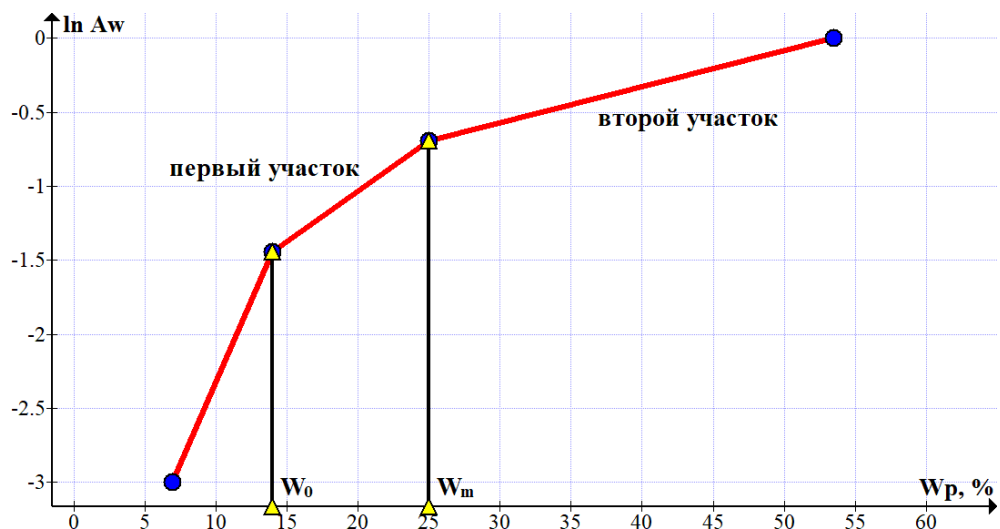


Рисунок 3.2.3 – Разбивка на участки с разным видом связи влаги с материа-

лом: от 0 до W_0 – преобладает химическая связь; от W_0 до W_m – преобладает адсорбционно связанная влага; от W_m и выше – капиллярно связанная и осмотическая влага

Выше обозначенные 2-е зоны (рис. 3.2.3) описаны соотношениями, приведенными ниже. Погрешность аппроксимации составила около 3%.

Соотношения 3.2.2 и 3.2.3 для изотермы сорбции, построенной при температуре 323°K.

Участок 1: $0,14 \leq W_p \leq 0,25$:

$$\ln A_W = 6,827W_p - 2,416. \quad (3.2.2)$$

Участок 2: $0,25 \leq W_p \leq 0,54$:

$$\ln A_W = 2,451W_p - 1,320. \quad (3.2.3)$$

Аппроксимированные уравнения 3.2.4, 3.2.5 для изотермы сорбции, построенной при температуре 298°K.

Участок 1: $0,14 \leq W_p \leq 0,25$:

$$\ln A_W = 9,024W_p - 3,092. \quad (3.2.4)$$

Участок 2: $0,25 \leq W_p \leq 0,54$:

$$\ln A_W = 2,392W_p - 1,431. \quad (3.2.5)$$

По причине того, что операция обезвоживания арбузного полуфабриката осуществляется и в гигроскопическом ареале, резонно осуществить анализ статических закономерностей трансфера тепла и вещества с термодинамической точки зрения для понимания и определения степени влияния вида связи воды с сухим остатком на качественные параметры итогового материала.

3.3 Термодинамический анализ статических закономерностей процесса сорбции влаги исследуемым полуфабрикатом

Поскольку при обезвоживании наблюдается влагоперенос в образце резонно использовать потенциал переноса массы Θ , который применяется в термодинами-

ческом анализе для определения трансфера энергии материала. Согласно классическим термодинамическим положениям посредством его энергию, затраченную на трансформацию изучаемой системы можно определить математически, причем исключается надобность исследования молекулярной структуры объекта.

В гигроскопическом ареале потенциалом переноса паров во влажной воздушной среде служит химический потенциал μ , взятый по модулю [5, 72]:

$$|\Theta| = |\mu| = RT \ln A_w, \quad (3.3.1)$$

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

Величина μ в определенный момент обусловлена выбором нулевой точки отсчета, которая соответствует для гигроскопического ареала при постоянной $T\varphi = 1$, т.е. μ_0 для воды в свободном состоянии. Поэтому при любой φ движущая сила сорбционной процедуры будет $\Delta\mu = \mu - \mu_0$.

Согласно [72], рациональным способом определения конкретного типа связи влаги с сухим остатком и классификации данных форм связи служит применение величина энергии связи — работы изотермического обратимого отрыва 1 моля воды для данного влагосодержания и без изменения состава вещества:

$$\Delta\mu = E = \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right)_T = RT \frac{p_s}{p_u} = -RT \ln A_w, \quad (3.3.2)$$

где E является свободной энергией 1 моля адсорбированной субстанции; p_s — давление насыщенного пара свободной воды над плоской поверхностью, Па; p_u — давление водяных воды в равновесном состоянии при такой же T над образцом с определенной W , Па.

Таким образом, используя соотношение 3.3.2 можно математически представить варьирование свободной энергии по W в гигроскопическом ареале для 3-х зон.

Для 1-ой зоны:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} &= -RT \ln A_w = -RT(6,827W_p - 2,416), \\ \frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} &= 6489 - 18333W_p. \end{aligned} \quad (3.3.3)$$

Для 2-ой:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} &= -RT \ln A_W = -RT(2,451W_p - 1,320), \\ \frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} &= 3546 - 6581W_p.\end{aligned}\quad (3.3.4)$$

Используя соотношение Гиббса-Гельмгольца при постоянной T и P [5]: $\Delta F = \Delta E - T\Delta S$ ($\Delta E, \Delta S$ – варьирование энтальпии или внутренней энергии) и взяв производную по равновесной W_p при $P, T = \text{const}$ получим:

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p}\right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p}\right)_{T,P} - T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}\right)_{T,P}, \quad (3.3.5)$$

где энтропийное слагаемое в соотношении для свободной энергии $T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}\right)_{T,P}$ для большинства продуктов имеет существенное значение.

Получим, взяв производную (3.3.5) по T :

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p}\right)_{T,P} = - \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}\right)_{T,P}. \quad (3.3.6)$$

Согласно 3.3.2, для определения дифференциального энтропийного варьирования влаги в связанном состоянии имеем:

$$\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}\right)_{T,P} = \frac{-\partial(RT \ln A_W)}{\partial T} = -R \frac{\partial(T \ln A_W)}{\partial T}. \quad (3.3.7)$$

Для корректной оценки дифференциального варьирования связанной энергии от W , принимая во внимание (3.3.7), нужно иметь зависимость $\ln A_W$ от T , что возможно при построении ИС той же субстанции при иной T , допуская, что смещение ИС при варьировании T является линейным. В таком варианте обобщенная зависимость $\ln A_W = f(W_p, T)$ выглядит следующим образом:

$$\ln A_W = (aT + b)W_p + (cT + d), \quad (3.3.8)$$

для криволинейного:

$$\ln A_W = (aT + b)W_p^3 + (cT + d)W_p^2 + (eT + f)W_p + (gT + k). \quad (3.3.9)$$

Взяв производные от (3.3.8) и (3.3.9) по T и получив их произведение, а также $\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}$ и T определим энергетическое варьирование.

При 323 и 298°K, находим коэффициенты сначала для 1 участка, решив для этого ряд систем уравнений:

$$\begin{cases} 323a + b = 6.827 \\ 298a + b = 9.024 \end{cases} \text{ и } \begin{cases} 323c + d = -2.416 \\ 298c + d = -3.092 \end{cases}$$

<i>a</i>	-0,088
<i>b</i>	35,219
<i>c</i>	0,027
<i>d</i>	-11,148

Далее находим $T \frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}$ для 1-ой зоны в процессе сорбции материалом влаги.

$$T \frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} = 57910W_p - 16959. \quad (3.3.10)$$

Находим коэффициенты для 2 участка, решив для этого ряд систем уравнений:

$$\begin{cases} 323a + b = 2,451 \\ 298a + b = 2,392 \end{cases} \text{ и } \begin{cases} 323c + d = -1,320 \\ 298c + d = -1,431 \end{cases}$$

<i>a</i>	0,002
<i>b</i>	1,688
<i>c</i>	0,004
<i>d</i>	-2,751

Далее для 2-ой зоны находим для нее варьирование $T \frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}$ в процессе сорбции материалом влаги.

$$T \frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} = -8631W_p - 297. \quad (3.3.11)$$

Учитывая соотношение (3.3.5), находим $\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p}$.

Для 1-ой зоны:

$$\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p} = 39577W_p - 10470. \quad (3.3.12)$$

Для 2-ой зоны:

$$\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p} = 3249W_p - 15212. \quad (3.3.13)$$

Опираясь на (3.3.3, 3.3.4, 3.3.10...13), построены зависимости варьирования различных типов энергий от W образца, показанные на рисунке 3.3.1.

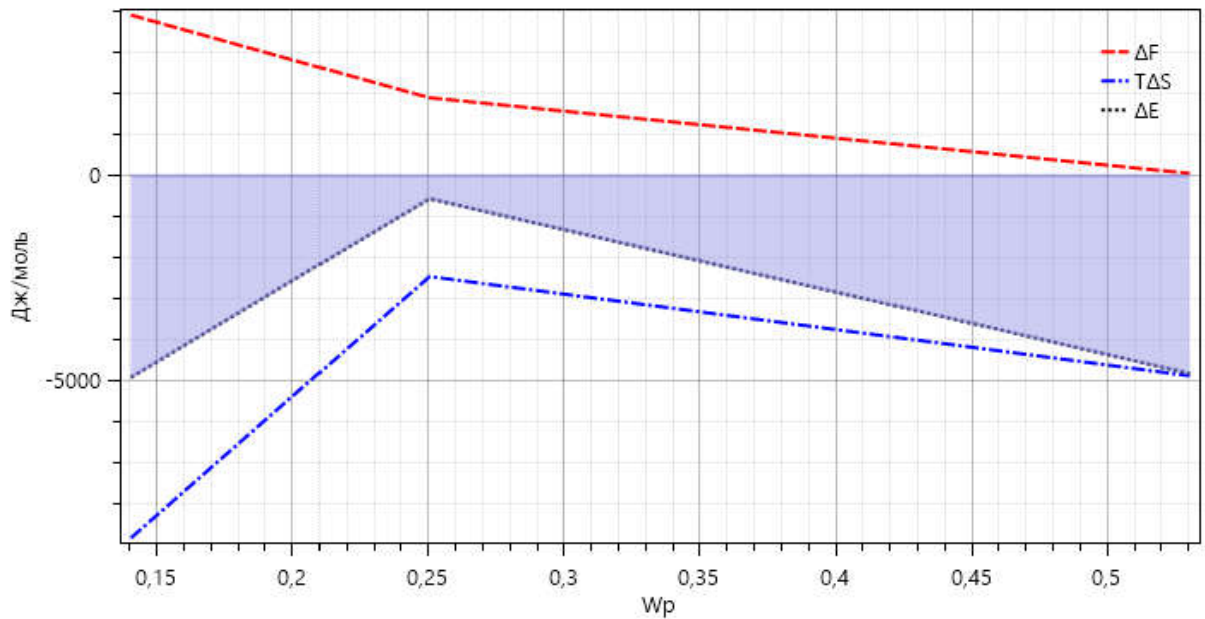


Рисунок 3.3.1 – Изменение свободной $\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p}$, связанной $T \frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}$ и внутренней $\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p}$ энергии в зависимости от влажности материала

Оценка обозначенных энергетических варьирований при процедуре сорбции нужен для определения общей удельной тепловой энергии парообразования r , (Дж/кг) и адаптации и решения математической модели обезвоживания, поскольку $r = f(W, T)$ включена в соотношения для трансфера тепла [3].

r [3] определяется суммированием теплоты образования пара из воды в свободном состоянии, r' , тепловой энергии $r_{\text{см}}$ и энтропийной составляющей $r_{\text{энт}}$, соотношения Гиббса-Гельмгольца.

$$r = r' + r_{\text{см}} + r_{\text{энт}}. \quad (3.3.14)$$

r' находит из соотношения линейного типа зависимости от T в пределах варьирования $T = 323 \dots 298$, полученного из известных табулированных данных [25]:

$$r' = 3118,458 \cdot 10^3 - 2286T. \quad (3.3.15)$$

$$r_{\text{см}} = \left| 55,556 \cdot \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right)_{T,P} \right|. \quad (3.3.16)$$

$$r_{\text{энт}} = \left| 55,556 \cdot T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} \right|. \quad (3.3.17)$$

Итак, для 323°K, принимая во внимание (3.3.15...17) имеем $r = f(W_p)$ и:

$$r' = 3118,458 \cdot 10^3 - 2286 \cdot 323 = 2380080 \text{ Дж/кг.} \quad (3.3.18)$$

Для первого участка:

$$r_{\text{см}} = |360486 - 1018520W_p|, \quad (3.3.19)$$

$$r_{\text{энт}} = |3217274W_p - 942161|. \quad (3.3.20)$$

r для 1 участка:

$$r = 2380080 + |360486 - 1018520W_p| + |3217274W_p - 942161|. \quad (3.3.21)$$

Для второго участка:

$$r_{\text{см}} = |197003 - 365632W_p|, \quad (3.3.22)$$

$$r_{\text{энт}} = |-479495W_p - 16490|. \quad (3.3.23)$$

Для 2 зоны:

$$r = 2380080 + |197003 - 365632W_p| + |-479495W_p - 16490|. \quad (3.3.24)$$

На рисунке 3.3.2 показана закономерность варьирования r от W_p .

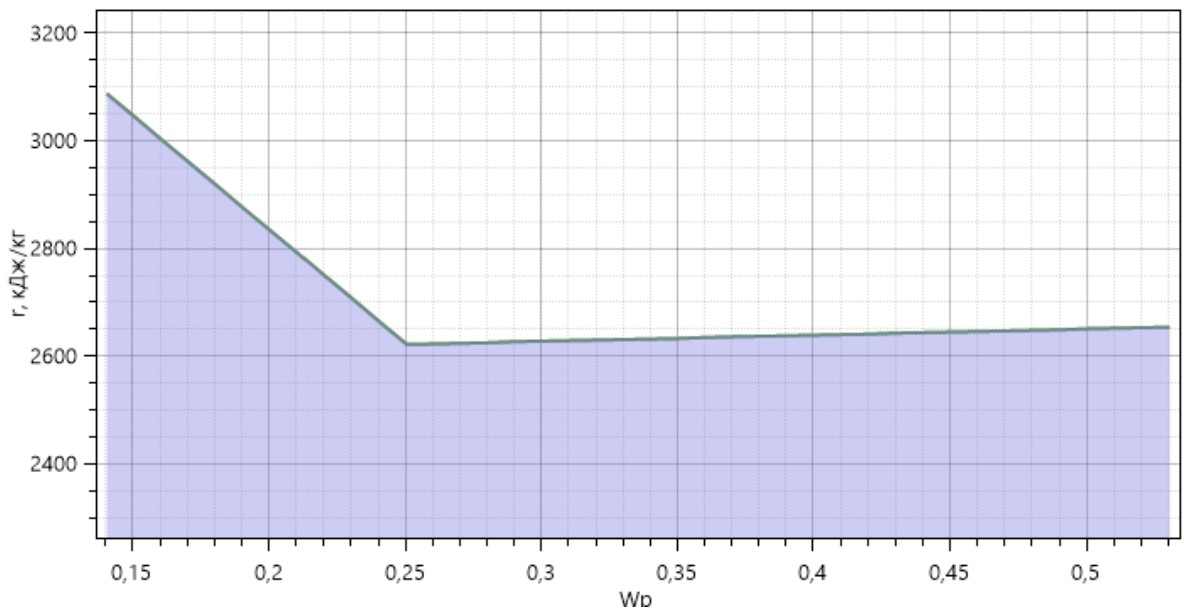


Рисунок 3.3.2 – Графическая зависимость удельной тепловой энергии испарения от равновесной влажности в процессе снижения влажности у исследуемого материала

Характер зависимостей (3.3.21 и 3.3.24) для объекта данного исследования не противоречит известным данным для биополимеров и определяется варьированием формы и энергии связи влаги с сухим веществом.

Глава 4 ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНО-КОНДУКТИВНОЙ СУШКИ АРБУЗНОГО ПОЛУФАБРИКАТА. ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОЙ УСТАНОВКИ

4.1 Исследование кинетики конвективно-кондуктивной сушки полученного арбузного полуфабриката

Из анализа, приведенного в 1-ой главе, вытекает, что в нашем случае целесообразно отдать предпочтение конвективному или кондуктивному энергоподводу к высушиваемому арбузному полуфабрикату, а лучше комбинации данных видов подводов тепловой энергии, поскольку в таком варианте упрощается конструктивное оформление процесса сушки при двухсторонней энергоподаче, что в итоге позволит увеличить интенсивность процесса влагоудаления при использовании сравнительно простых конструкторских решений. При этом следует отметить, что падение исходной T теплоносителя и T объекта обезвоживания обуславливает улучшение качественных показателей готовой продукции.

Для рационализации конвективно-кондуктивного обезвоживания необходимо подобрать такие режимные параметры, которые позволят не только провести удаление влаги из арбузного полуфабриката в относительно простом сушильном аппарате, но и существенно сократить время на этот процесс. Причем для адаптации к объекту изучения и решения модели трансфера тепла и влаги и выявления его механизма, необходимо иметь информацию о кинетических закономерностях процесса влагоудаления.

Для этих целей используют теоретические, эмпирические и комбинированные способы [3, 28, 118, 139]. Кинетические закономерности удаления влаги из

арбузного полуфабриката анализировали посредством вероятностно-статистических подходов к планированию и обработке опытных результатов, где для обеспечения потребительских свойств конечного продукта необходимо соблюдение технологических и временных ограничений.

Схема экспериментального стенда показана на рисунке 4.1.1.

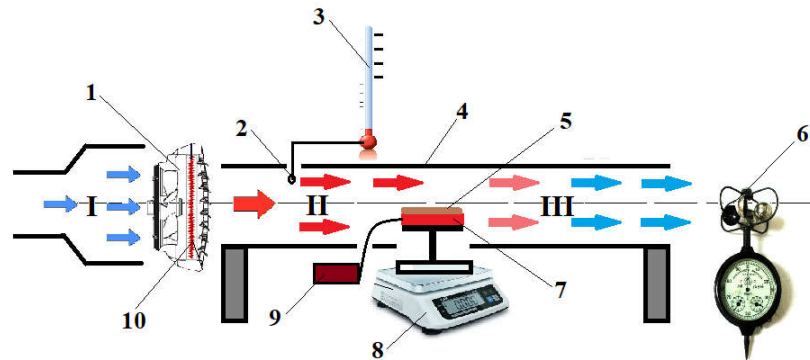


Рисунок 4.1.1 – Принципиальная схема конвективной опытной сушильной установки: I – потоки холодного воздуха; II – поток сушильного агента с заданной температурой и скоростью; III – поток отработанного сушильного агента; 1 – вентилятор; 2 – температурный датчик; 3 – термопара; 4 – корпус сушилки; 5 – объект суши; 6 – электронный анемометр; 7 – греющая пластина; 8 – весы; 9 – источник питания; 10 – калорифер

Данный стенд дает возможность регулирования влияющих факторов (T сушильного агента и греющей пластины, скорости сушильного агента, высоты слоя) в необходимых диапазонах. Температура сушильного агента ограничивается 100°C , а греющей пластины – 80°C , т.к. при более высоких температурах появляется вероятность перегрева продукта, скорость сушильного агента не может быть выше $2,5 \text{ м/с}$, т.к. превышение этого значения приводит к деформации поверхностного слоя, а также вероятности уноса геля (сдувание).

Опытный стенд дает возможность получить эмпирические данные для решения при адаптации к объекту изучения математической модели с целью выявления рациональных режимов обезвоживания арбузного полуфабриката. Принимая во внимание тот факт, что при удалении влаги из его тонкого слоя определить варьирование W по его глубине эмпирически не представляется возможным, то по

этой причине для выявления кинетических закономерностей влагоудаления их объекта резонно построить и математически описать интегральные кривые обезвоживания сушки, иными словами зависимость средней по высоте W от времени сушки.

К влияющим на интенсивность высушивания от исходной W_H до итоговой W_K (кг/кг) факторам, можно причислить: T арбузного полуфабриката T_{BM} (°K) и высоту его слоя h_{BM} (м). В качестве неварьируемых параметров приняты следующие: температура сушильного агента $T_{с.а.}$ (°K), его скорость $v_{с.а.}$ (м/с) и направление, а также температура греющей пластины $T_{г.п.}$ (°K). Уровни варьирования влияющих параметров и величины неварьируемых показаны в таблицах 4.1.1 и 4.1.2.

Таблица 4.1.1 – Влияющие факторы процесса обезвоживания арбузного полуфабриката

W_H , кг/кг	T_{BM} , °C	h_{BM} , м	W_K , кг/кг
0,91	30	0,001	0,25
	40	0,002	
	50	0,003	

Таблица 4.1.2 – Неварьируемые параметры процесса обезвоживания арбузного полуфабриката

W_H , кг/кг	$T_{с.а.}$, °C	$v_{с.а.}$, м/с	$T_{г.п.}$, °C	W_K , кг/кг
0,91	100	2,5	80	0,25

За целевую функцию взят выход сухого продукта отнесенный к площади рабочей поверхности и продолжительности операции Y , кг/(м²·ч), иначе удельная производительность:

$$Y = \frac{M}{\tau \cdot S}, \quad (4.1.1)$$

где M – масса полуфабриката, подвергаемого влагоудалению, кг; τ – продолжительность сушки, час; S – площадь подложки, (м²).

В итоге получены (Приложение Р, табл. 4.1.3) эмпирические данные и построены кривые комбинированного обезвоживания арбузного геля, часть из которых показана на рисунке 4.1.2.

Таблица 4.1.3 – Данные по экспериментальному исследованию процесса сушки на опытной установке

$T_{\text{вм}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{с.а.}}, ^\circ\text{C} / v_{\text{с.а.}}, \text{м/с}$	$h_{\text{вм}}, \text{м}$	$\tau, \text{с}$	$Y, \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$
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 $\rho=1028 \text{ кг/м}^3$.		

Следует отметить, что экспериментальное исследование сушки при параметрах: $T_{\text{с.а.}} = 100^\circ\text{C}$, $T_{\text{г.п.}} = 80^\circ\text{C}$ и $v_{\text{с.а.}} = 2,5 \text{ м/с}$ выявило, что удельная производительность при $h_{\text{вм}} = 0,001 \text{ м}$ имеет низкие показатели, а при $h_{\text{вм}} = 0,003 \text{ м}$ – высокие, несмотря на большую продолжительность проведения операции высушивания арбузного полуфабриката, т.е. порядка 3-х часов. Величина $T_{\text{вм}}$, которая варьировалась от 30°C до 50°C , незначительно оказывала влияние на снижение продолжительности сушки, в среднем на 6...7%, что объясняется только уменьшением времени на сам прогрев влажного материала до температуры, близкой к температуре мокрого термометра, который реализуется как за счет конвективного так и кондуктивного энергоподвода.

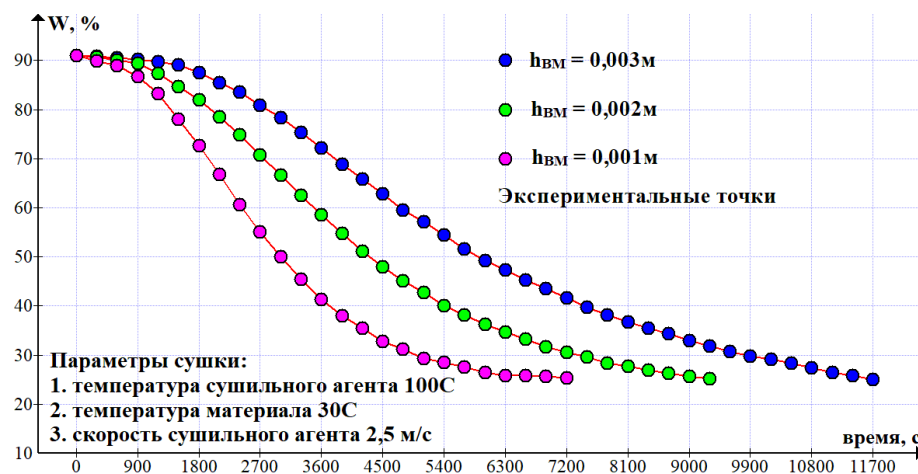


Рисунок 4.1.2 – Кривые конвективной сушки арбузного полуфабриката при заданных температурных и скоростных параметрах исследуемого процесса

Сравнение кривых (рис. 4.1.2) с данными иных подобных исследований, приведенные, к примеру, в [73], свидетельствует о том, что авторские результаты не противоречат известным данным.

На основе результатов расчетов (табл. 4.1.3) получена аппроксимирующая зависимость производительности от начальной температуры влажного материала и толщины его слоя:

$$Y = (85T_{\text{вм}}^2 - 6500T_{\text{вм}} + 54000)h_{\text{вм}}^2 + (-0,265T_{\text{вм}}^2 + 20,9T_{\text{вм}} + 87)h_{\text{вм}} + (6,5 \cdot 10^{-5}T_{\text{вм}}^2 - 1,55 \cdot 10^{-3}T_{\text{вм}} + 0,091), \quad (4.1.2)$$

где $T_{\text{вм}}$ – температура влажного материала, °C; $h_{\text{вм}}$ – толщина его слоя, м.

На рисунке 4.1.3. показана графически математическая зависимость 4.1.2, из которой видно, что увеличение как температуры влажного материала, так и толщины его слоя до определенных границ, обусловленных технологическими ограничениями, ведет к перманентному росту удельной производительности.

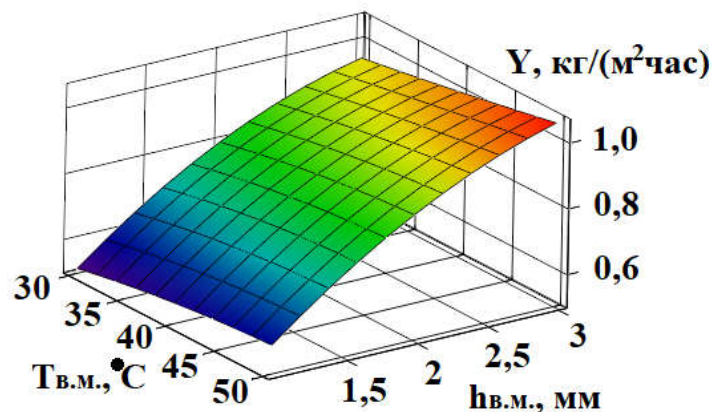


Рисунок 4.1.3 – Поле значений удельной производительности при сушке исследуемого арбузного полуфабриката

Изучая полученные результаты можно сделать вывод о том, что повышение температуры исходного арбузного полуфабриката с учетом малозаметного роста удельного выхода, не резонно, что определяется в первую очередь вероятность подгорания и пересушкой поверхности материала при его влажной сердцевине, особенно в местах кондуктивного энергоподвода, а во-вторых необходимостью применения дополнительного теплового оборудования для предварительного нагрева полуфабриката, что снижает полученный эффект от этой процедуры. Пред-

варительное повышение температуры влажного материала до значений $T_{г.п.}$ вполне может быть допустимо, но только при варьируемых режимах кондуктивного подведения тепловой энергии, однако это не обусловит в нашем варианте существенное падение длительности операции удаления влаги.

При изменении высоты слоя надо принять во внимание, что ее рост обуславливает не только увеличение массы готового материала, но приводит к росту длительности операции, то есть существует какой-то оптимум при увязке этих факторов. Рекомендована оптимальная высота начального слоя, равная 3 мм, которая вследствие десорбционной усадки в итоге принимает значение от 1,2 до 1,5 мм, при $Y = 0,949 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, а время высушивания до $W = 0,25 \text{ кг}/\text{кг}$ составит 195 мин. При снижении высоты до, к примеру, 1 мм. Время операции падает ориентировочно на треть, что дает возможность снизить габариты сушильного аппарата, к примеру, длину транспортера при уменьшении удельного выхода.

Таким образом, выявлено, что ориентировочная длительность операции обезвоживания материала, 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 % (рис. 4.1.3).

4.2 Анализ механизма внутреннего влагопереноса при сушке объекта исследования

Выявление механизма внутреннего трансфера влаги осуществляется традиционно на базе кинетических закономерностей варьирования интенсивности высушивания от W его объекта математически аппроксимированных путем обработки кривых обезвоживания (рис. 4.1.2). Для упрощения аппроксимации кривых обезвоживания для получения кинетических зависимостей $\frac{d(1-W)}{d\tau} = f(1-W)$ по-

лучены зависимости $\tau = f(C)$, где $C = 1 - W$ – доля сухого остатка в продукте, которые показаны на рисунке 4.2.1.

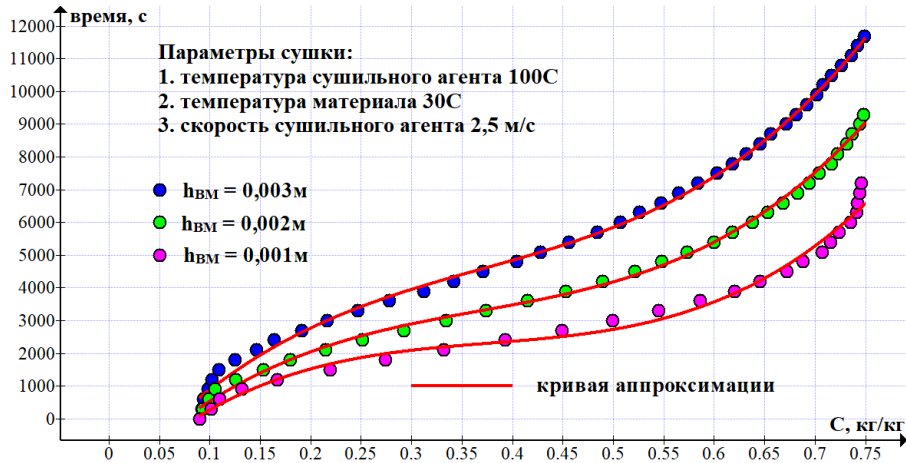


Рисунок 4.2.1 –Кривые обезвоживания арбузного полуфабриката при рациональных режимах проведения процесса после аппроксимации

Кривые сушки (рис. 4.2.1) были аппроксимированы полиномом третьей степени и с погрешностью менее 3,5% математически их описывают.

При $h_{BM} = 0,003$ м:

$$\tau = 6,92 \cdot 10^4 C^3 - 7,69 \cdot 10^4 C^2 + 3,71 \cdot 10^4 C - 2130. \quad (4.2.1)$$

При $h_{BM} = 0,002$ м:

$$\tau = 6,53 \cdot 10^4 C^3 - 7,22 \cdot 10^4 C^2 + 3,22 \cdot 10^4 C - 2035,8. \quad (4.2.2)$$

При $h_{BM} = 0,001$ м:

$$\tau = 6,44 \cdot 10^4 C^3 - 7,27 \cdot 10^4 C^2 + 2,98 \cdot 10^4 C - 2052. \quad (4.2.3)$$

В уравнениях 4.2.1...3 τ – продолжительность сушки, с.

После взятия производной от $\tau = f(C)$, имеем: $\frac{d\tau}{dC} = f(C)$, далее осуществив математическую трансформацию имеем $\frac{dC}{d\tau} = 1/(f(C))$, которые представлены графически (рис. 4.2.2) и в виде математических зависимостей (4.2.4...6).

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{1}{20,76 \cdot 10^4 C^2 - 15,38 \cdot 10^4 C + 3,71 \cdot 10^4}. \quad (4.2.4)$$

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{1}{19,59 \cdot 10^4 C^2 - 14,44 \cdot 10^4 C + 3,22 \cdot 10^4}. \quad (4.2.5)$$

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{1}{19,32 \cdot 10^4 C^2 - 14,54 \cdot 10^4 C + 2,98 \cdot 10^4}. \quad (4.2.6)$$

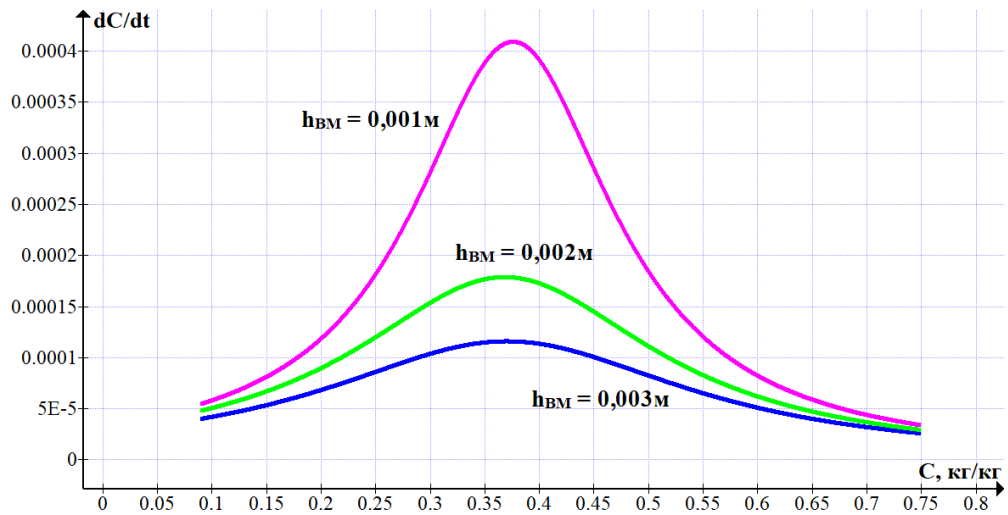


Рисунок 4.2.2 – Кривая скорости сушки арбузного полуфабриката при рациональных режимах проведения процесса

Из полученных закономерностей вытекает, что на кинетических кривых присутствуют 2 зоны, что не конфликтует с основами теории обезвоживания [5, 28, 65, 68, 73, 139].

В 1-ой зоне интенсивность сушки увеличивается до пика (рис. 4.2.2) по причине отведения в основном воды в свободном состоянии из поверхностного слоя образца. Ввиду интенсивного образования пара снижается вероятность перегрев материала, присутствует малозаметное снижение его объема, которое можно не учитывать и при росте доли сухого остатка уменьшается промежуток между мицеллами дисперсной фазы, что обуславливает структурную организацию будущего высушенного материала. В данной зоне при комбинированном высушивании тонкого слоя на условия осуществления процедур трансфера тепла и вещества могут воздействовать процедуры формирования капиллярно-пористого вещества, что обуславливает варьирование интенсивности и T арбузного геля. По завершении 1-ой стадии W поверхности геля достигает гигроскопической величины. Далее активизируются процедуры отведения адсорбционной влаги, что обуславливает интенсификацию нагревания геля при незначительной его усадке.

На 2-ой стадии (рис. 4.2.2), после пика интенсивности и до итоговой W , по причине увеличения несоответствия расходов испаряющейся с поверхности влаги и продвигающейся изнутри слоя наблюдается углубление фронта образования па-

ра внутрь материала [3, 28, 65, 113, 118, 139]. T по глубине слоя растет при стремлении к T теплоносителя и появляется вероятность образования трещин в поверхностной прослойке по причине объемного порообразования. Трансфер паровой фазы внутри «закрытой поры» с точки зрения термодинамики идентичен трансферу жидкой фазы. На пленке или мениске варьируется T при варьировании P , что определяет высокую скорость парообразования по отношению к интенсивности конденсации, то есть отведение энергии с одной поверхности пленки, ее подведение с другой.

Итак, вид кривой обезвоживания по сути соответствует материалам, содержащим пленкообразующие компоненты, в частности пектину и микроцеллюлозе, но имеет специфические особенности, обусловленные физико-химическими свойствами объекта исследования, представляющий собой гелеобразную массу, с внесёнными в нее специальными добавками (табл. 2.5.1).

4.3 Построение и решение математической модели процесса конвективно-кондуктивной сушки объекта исследования и ее анализ

Выявление кинетических закономерностей изменения параметров объекта влагоудаления во времени сушки позволит получить корректную физико-математическую модель тепло-массообменного процесса, а для того чтобы оценить температуру исследуемого полуфабриката в результате влагоудаления при температуре теплоносителя равной 100°C необходимо ее решить.

Теоретически определить T внутри слоя арбузного полуфабриката можно посредством решения системы соотношений для трансфера влаги и тепла в частных производных, но имеется упрощенная возможность ее решения посредством лишь соотношения для переноса тепловой энергии, используя эмпирические

кинетические закономерности сушки [151, 152, 172].

При таком подходе модель трансфера тепла и вещества решена способом конечных разностей посредством допущений, обоснованных в трудах [3, 5] и является системой соотношений для трансфера тепловой энергии и эмпирических кинетических закономерностей обезвоживания (4.3.1). Соотношение для определения скорости трансфера тепловой энергии при комбинированно энергоподводе, в одномерном варианте выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial C} = \frac{a}{\frac{\partial C}{\partial \tau}} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{r\rho}{c_V}, \quad (4.3.1)$$

где x – координата высоты слоя, м; $\frac{\partial C}{\partial \tau}$ – интенсивность обезвоживания, кг/(кг·с) при допущении изотропности структурной организации продукта, остальные характеристики описаны выше.

Решением (4.3.1) при определенных исходных и граничных условиях служит функционал $T = f(C, x)$, для чего W была заменена долей сухого остатка $C = 1 - W$.

Условия 2-го рода на границе раздела фаз при обмене тепловой энергии определяются по соотношению:

$$\lambda(C) \frac{\partial T}{\partial x} = -\alpha(T_{c.a} - T_{пов}), \quad (4.3.2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); $T_{c.a}$ – для теплоносителя при заданном давлении в камере, °К; $T_{пов}$ – температура поверхности материала, °К.

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

$$T_{пов} = 353 - e^{5(c_{нач} - c)}, \quad (4.3.3)$$

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

Способ конечных разностей (Приложение С), посредством которого решена модель обуславливают замену функционалов, заданных в определенном ареале

сеточным вектором, а дифференциалы заменяются их разностными аналогами [4, 6].

Идея метода конечных разностей (метода сеток) известна давно, с соответствующих трудов Эйлера, однако практическое его применение широко стало применяться с появлением быстродействующих компьютеров. К тому же он является одним из наиболее эффективных при решении различных задач математической физики.

Основой метода является описание дифференциалов в следующей последовательности [4]:

1. создание в рассматриваемом ареале сетки с n узлами;
2. замена дифференциалы разностными аналогами;
3. использование измененного соотношения для численной связи соседних узлов.

В нашем случае обозначен прямоугольный ареал в координатной сетке $x - c$ (рис. 4.3.1). Путем разложения в ряд Тейлора решаемой модельной зависимости от 2-х независимых варьируемых аргументов можно частную производную обозначить как центрально разностное соотношение:

$$\frac{\partial t}{\partial x} \approx \frac{f(x_{i+h}, c_j) - f(x_{i-h}, c_j)}{2h}, \quad (4.3.4)$$

где h – приращение x к числу в точке i .

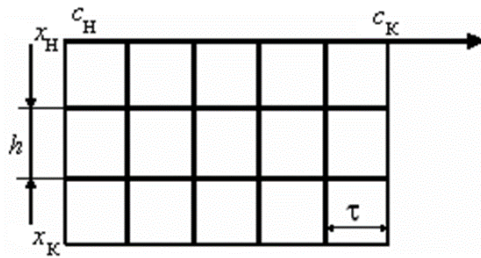


Рисунок 4.3.1 – Построение сеточной области

Заменим $t(x_{i+h}, c_j)$ на $t_{i+1,j}$, при этом после разложения в ряд получим:

$$\frac{\partial t}{\partial x} \approx \frac{t_{i+1,j} - t_{i-1,j}}{2h}; \quad \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \approx \frac{t_{i+1,j} - 2t_{i,j} + t_{i-1,j}}{h^2}; \quad \frac{\partial t}{\partial c} \approx \frac{t_{i+1,j} - t_{i,j}}{\tau},$$

где τ – шаговое приращение c к значению в точке j .

$t_{i,m}$ – функционалы в узлах, располагающихся рядом с центральной $t_{i,j}$.

Покажем нахождение параметров при $t_{i,m}$ и $t_{i,j}$ в форме расчетных диаграмм (шаблонов), определяющих вклад узлов в определенный дифференциал. Сеточные ячейки могут быть не только квадратными, но и при $h \neq \tau$. Сложение дифференциалов осуществляют посредством шаблонной суперпозиции (рис. 4.3.2). При применении любого шаблона в каждом из n узлов получим систему n соотношений линейного типа.

$$\begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial c} &\approx \frac{1}{2h} \left\| \begin{array}{c} (-1) \leftrightarrow (0) \leftrightarrow (+1) \\ i,j \end{array} \right\|; & \frac{\partial t}{\partial c} &\approx \frac{1}{h} \left\| \begin{array}{c} (0) \leftrightarrow (+1) \\ i,j \end{array} \right\| \\ \frac{\partial t}{\partial x} &\approx \frac{1}{2h} \left\| \begin{array}{c} (+1) \\ \updownarrow \\ i,j \quad (0) \\ \updownarrow \\ (-1) \end{array} \right\|; & \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} &\approx \frac{1}{h^2} \left\| \begin{array}{c} (+1) \\ \updownarrow \\ (-2) \\ \updownarrow \\ (+1) \end{array} \right\| \end{aligned}$$

Рисунок 4.3.2 – Расчётные шаблоны

В процессе решении соотношения параболического типа, как и в случае переноса тепловой энергии, используют явные, неявные и с повышенным порядком аппроксимации схемы.

Вариант явных схем относительно прост, но они стабильны лишь при $\gamma = \frac{\tau}{h^2} \leq 0,5$. Они получили название, как схемы с условной стабильностью при малозначительном h . Кроме того, перемещение решения y_i^j незначительно по причине ограничения γ сверху по оси c , что обуславливает существенное увеличение в полуполосе вычислительного объема.

Остальные схемы обладают безусловной стабильностью при любом соотношении шагов по x и c . Чаще для решения одномерной задачи выбирают неявные схемы.

Одномерное параболическое соотношение выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial t}{\partial c} = a(x, c, t) \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + b(x, c, t) \frac{\partial t}{\partial x} - c(x, c, t)t + f(x, c, t),$$

при этом в некоторых технологических вариантах проведения тепловых процес-

сов, переменные $b(x, c, t)$ и $c(x, c, t)$ могут быть приравнены к нулю.

Решение при $D \equiv \{\alpha \leq x \leq \beta; c_H \leq c \leq c_K\}$, осуществляется при краевых условиях:

$$\left. \begin{aligned} t(x, c_H) &= \varphi(x) \quad \alpha \leq x \leq \beta \quad c_H \leq c \leq c_K \\ \omega_1 t(\alpha, c) + \rho_1 \frac{\partial t}{\partial x}(\alpha, c) &= \varphi_1(c) \\ \omega_2 t(\beta, c) - \rho_2 \frac{\partial t}{\partial x}(\beta, c) &= \varphi_2(c) \end{aligned} \right\},$$

где приведены ограничения: функционалы $a(x, c)$, $b(x, c)$, $c(x, c)$, $f(x, c)$, $\omega_1(\alpha, c)$, $\omega_2(\beta, c)$, $\rho_1(\alpha, c)$, $\rho_2(\beta, c)$, $\varphi_1(c)$, $\varphi_2(c)$ – являются непрерывными в рассматриваемой области, при этом

$$a(x, c) > 0; c(x, c) \geq 0; |\omega_1| + |\rho_1| \neq 0; |\omega_2| + |\rho_2| \neq 0.$$

Разностный сетчатый вектор в ареале D выглядит следующим образом:

$$\overline{\delta_{h\tau}} = \left\{ \begin{aligned} x_i &= \alpha + ih; c_k = k\tau; i = 0, 1 \dots N; k = 0, 1 \dots N_0. \\ h &= \frac{\beta - \alpha}{N}; \tau = \frac{c_H - c_K}{N_0} \end{aligned} \right\},$$

где N , N_0 – число участков разбивки по x и c .

Для любого узла сеточной области $\overline{\delta_{h\tau}}$ одномерному выражению параболического типа соответствует выражение разностного типа:

$$\begin{aligned} y_t &= 0,5(a^{k+1}y_{xx}^{k+1} + b^{k+1}y_x^{k+1} - c^{k+1}y^{k+1} + f^{k+1}) + \\ &+ 0,5(a^k y_{xx}^k + b^k y_x^k - c^k y^k + f^k), \end{aligned}$$

со вторым порядком аппроксимации, т.е. $\|\psi\| = O(\tau^2 + h^2)$, где

$$y_t = \frac{y_i^{k+1} - y_i^k}{\tau}; y_x^{k+1} = \frac{y_{i+1}^{k+1} - y_{i-1}^{k+1}}{2h}; y_{xx}^{k+1} = \frac{y_{i+1}^{k+1} - 2y_i^{k+1} + y_{i-1}^{k+1}}{h^2}.$$

Условия на границе изучаемого ареала аппроксимируют с точностью до $O(h^2)$:

$$\begin{aligned} y_i^0 &= \varphi_i; i = 0, 1, 2 \dots N; \\ \begin{cases} \omega_1 y_0^{k+1} + \rho_1 y_{x,0}^{k+1} = \psi_{1,0}^{k+1} \\ \omega_2 y_N^{k+1} + \rho_2 y_{x,N}^{k+1} = \psi_{2,0}^{k+1} \end{cases} \end{aligned}$$

Приведя выражение разностного типа к индексной форме, в итоге трансформаций получим:

$$\begin{aligned}
& \frac{\tau}{2h} \left(\frac{b_i^{k+1}}{2} - \frac{a_i^{k+1}}{h} \right) y_{i-1}^{k+1} + \left[1 + \tau \left(\frac{c_i^{k+1}}{2} + \frac{a_i^{k+1}}{h^2} \right) \right] y_i^{k+1} - \\
& - \frac{\tau}{2h} \left(\frac{b_i^{k+1}}{2} - \frac{a_i^{k+1}}{h} \right) y_{i+1}^{k+1} = y_i^k + \frac{\tau}{2} \cdot \\
& \cdot \left[f_i^{k+1} + f_i^k + \frac{1}{h} \left(\frac{a_i^k}{h} - \frac{b_i^k}{2} \right) y_{i-1}^k - \left(c_i^k + \frac{2a_i^k}{h^2} \right) y_i^k + \frac{1}{h} \left(\frac{a_i^k}{h} - \frac{b_i^k}{2} \right) y_{i+1}^k \right]; \\
& i = 1, 2, \dots, N-1; k = 0, 1 \dots N_0 - 1.
\end{aligned}$$

На сеточной границе:

$$\begin{aligned}
2h\omega_1 y_0^{k+1} + \rho_1 y_1^{k+1} - \rho_1 y_{-1}^{k+1} &= 2h\psi_1(c_{k+1}); \\
2h\omega_2 y_N^{k+1} + \rho_1 y_{N-1}^{k+1} - \rho_1 y_{N+1}^{k+1} &= 2h\psi_2(c_{k+1}),
\end{aligned}$$

или, что в данном случае более приемлемо, используя 2-х точечный шаблон:

$$\begin{aligned}
h\omega_1 y_0^{k+1} + \rho_1 y_0^{k+1} - \rho_1 y_{-1}^{k+1} &= h\psi_1(c_{k+1}); \\
h\omega_2 y_N^{k+1} + \rho_2 y_N^{k+1} - \rho_2 y_{N+1}^{k+1} &= h\psi_2(c_{k+1}); \\
a_i^k &= a(x_i, c_k); b_i^k = b(x_i, c_k); c_i^k = c(x_i, c_k); f_i^k = f(x_i, c_k); \\
\rho_1 &= f(x_H, c_k); \rho_2 = a(x_K, c_k); \psi_1 = f(c_k); \psi_2 = f(c_k).
\end{aligned}$$

В этом случае подобно строчке $(k+1)$ на произвольной прослойке k соотношение решается путем прогонки.

Приведем расчетную последовательность решения одномерной зависимости по неявному схематическому алгоритму:

1. определяем:

$$y_i^0 = \varphi(x_i, c_H); i = 0, 1 \dots N;$$

2. на любом слое $k = 0, 1 \dots N_0 - 1$ вычисляем по рекуррентным формулам значения прогонных показателей:

$$p_{i,k+1} = -\frac{c_{i,k+1}}{A_{i,k+1}p_{i-1,k+1} + B_{i,k+1}}; q_{i,k+1} = -\frac{D_{i,k+1} - A_{i,k+1}q_{i-1,k+1}}{A_{i,k+1}p_{i-1,k+1} + B_{i,k+1}};$$

для

$$i = 1, 2 \dots N-1;$$

$$p_{0,k+1} = -\frac{\rho_1(A_{0,k+1} + c_{0,k+1})}{2hA_{0,k+1}\omega_1 + B_{0,k+1}\rho_1}; q_{0,k+1} = -\frac{2hA_{0,k+1}\psi_{1,k+1} + D_{0,k+1}\rho_1}{2hA_{0,k+1}\omega_1 + B_{0,k+1}\rho_1};$$

где

$$A_{i,k+1} = \frac{\tau}{2h} \left(\frac{b_i^{k+1}}{2} - \frac{a_i^{k+1}}{h} \right); B_{i,k+1} = \left[1 + \tau \left(\frac{c_i^{k+1}}{2} - \frac{a_i^{k+1}}{h} \right) \right];$$

$$C_{i,k+1} = -\frac{\tau}{2h} \left(\frac{b_i^{k+1}}{2} - \frac{a_i^{k+1}}{h} \right);$$

$$D_{i,k+1} = y_i^k + \frac{\tau}{2} \cdot$$

$$\cdot \left[f_i^{k+1} + f_i^k + \frac{1}{h} \left(\frac{a_i^k}{h} - \frac{b_i^k}{h} \right) y_{i-1}^k - \left(c_i^k + \frac{2a_i^k}{h^2} \right) y_i^k + \frac{1}{h} \left(\frac{a_i^k}{h} - \frac{b_i^k}{h} \right) y_{i+1}^k \right].$$

3. рассчитываем величины:

$$y_i^{k+1} = p_{i,k+1} y_{i+1}^{k+1} + q_{i,k+1}; i = N-1, N-2 \dots 2, 1, 0,$$

при этом:

$$y_N^{k+1} = \frac{2hc_{N,k+1}\psi_{2,k+1} + \rho_2 [D_{N,k+1} - q_{N-1,k+1}(A_{N,k+1} + C_{N,k+1})]}{2hc_{N,k+1}\omega_2 + \rho_2 [B_{N,k+1} - p_{N-1,k+1}(A_{N,k+1} + C_{N,k+1})]},$$

и далее осуществляем до прохода определенного числа шагов по c .

Из условий на границе области имеем:

$$y_{-1}^{k+1} = \frac{1}{\rho_1} (h\omega_1 y_0^{k+1} + \rho_1 y_0^{k+1} - h\psi_1(c_{k+1}));$$

$$y_{N+1}^{k+1} = \frac{1}{\rho_2} (h\omega_2 y_N^{k+1} + \rho_2 y_N^{k+1} - h\psi_2(c_{k+1})).$$

В случае, когда на фиксированной x слоя высоты слоя l источник тепла незначителен $\omega_V(l) < \omega_V(l)_{min} = 10^m$ (Вт/м³), то он включается в граничные условия, принимая, что $\omega_V(x_i) > \omega_V(0)$. При $\omega_V(x_i) > \omega_V(x_i)_{min}$ $\omega_V(x_i)$ включается в соотношение для трансфера тепловой энергии.

Необходимо определить функции $a(x, c)$, $b(x, c)$, $c(x, c)$, $f(x, c)$, $\omega_1(\alpha, c)$, $\omega_2(\beta, c)$, $\rho_1(\alpha, c)$, $\rho_2(\beta, c)$, $\varphi_1(c)$, $\varphi_2(c)$ и краевые условия.

Алгоритм решения модели трансфера массы и тепловой энергии при комбинированном обезвоживании изучаемых частиц показан на рисунке 4.3.3.

Модель решена посредством программного продукта Mathcad Professional в рамках технологических ограничений (Приложение С).

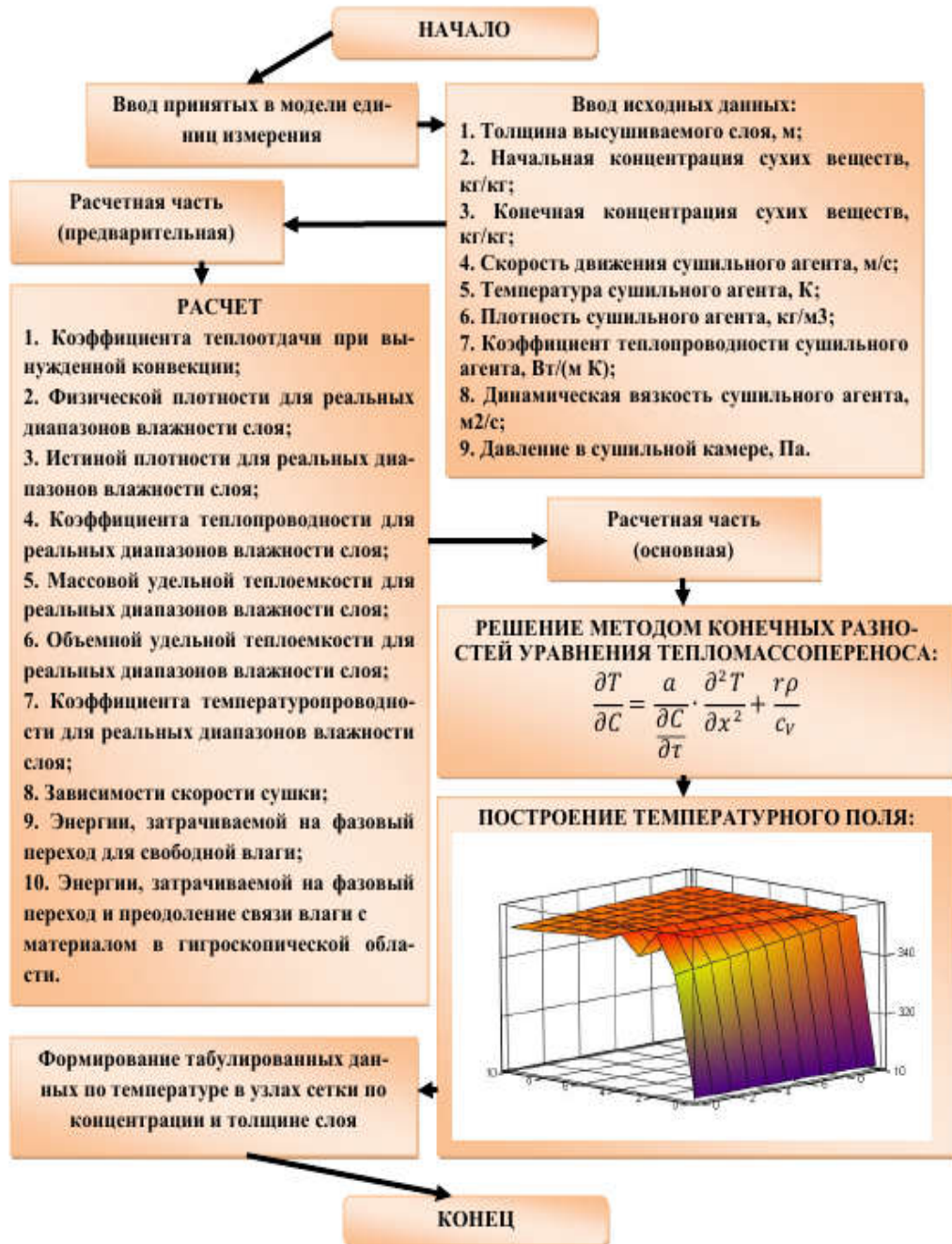


Рисунок 4.3.3 –Блок-схема определения эволюции температурных полей в объекте сушки

В результате решения определена интенсивность продвижения фронта T в координатах: глубина слоя и доля сухого остатка, которая показанан для исходной высоты слоя геля 1 мм и итоговой СП толщиной 0,35 мм.

На рисунке 4.3.5 показана интенсивность продвижения фронта T для слоя 2 мм, высушиваемого арбузного полуфабриката с конечной толщиной 0,75 мм.

На рисунке 4.3.6 показана интенсивность продвижения фронта T для слоя 3

мм, высушиваемого арбузного полуфабриката с конечной толщиной 1,2 мм.

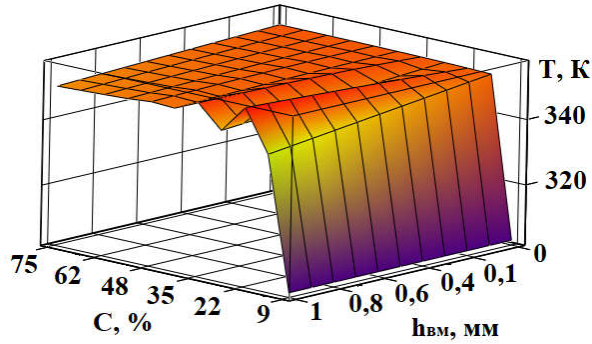


Рисунок 4.3.4 – Трансформация полей температур в течение процесса обезвоживания арбузного полуфабриката, толщиной 1 мм

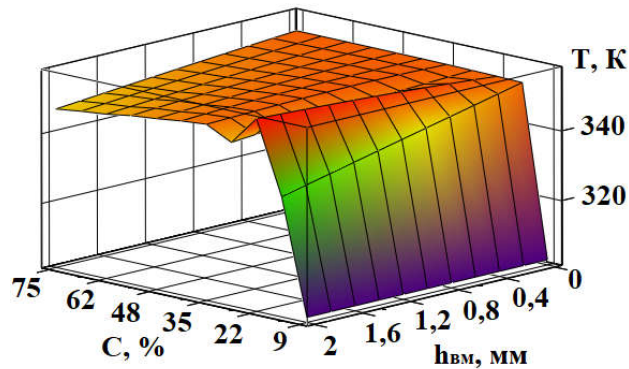


Рисунок 4.3.5 – Трансформация полей температур в течение процесса обезвоживания арбузного полуфабриката, толщиной 2 мм

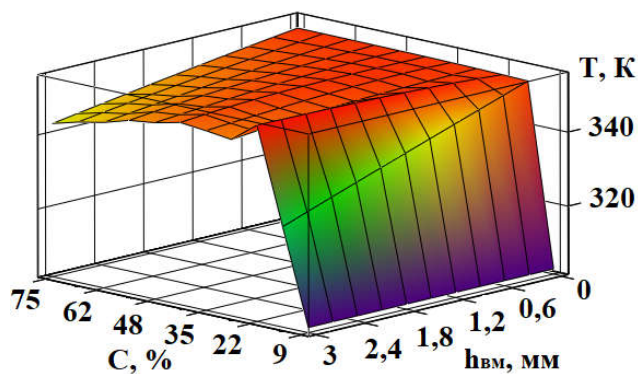


Рисунок 4.3.6 – Трансформация полей температур в течение процесса обезвоживания арбузного полуфабриката, толщиной 3 мм

Из полученных трехмерных графиков (рис. 4.3.4...4.3.6) видно, что при любой влажности высушиваемого материала существуют температурные перепады,

вследствие инерционности переноса тепловой энергии по объему объекта исследования. Для упрощения оценки интенсивности продвижения фронта T (рис. 4.3.4...4.3.6) на рисунке 4.3.7 представлена информация о полученных значениях температур в узловых точках.

$$z = \begin{pmatrix} 303 & 343.77 & 356.48 & 347.87 & 354.73 & 351.5 & 351.87 & 351.21 & 350.85 & 350.54 & 350.24 \\ 303 & 344.62 & 356.14 & 348.39 & 354.66 & 351.74 & 352.04 & 351.42 & 351.08 & 350.8 & 350.53 \\ 303 & 345.47 & 355.79 & 348.91 & 354.58 & 351.94 & 352.21 & 351.62 & 351.32 & 351.05 & 350.81 \\ 303 & 346.33 & 355.43 & 349.4 & 354.47 & 352.12 & 352.36 & 351.81 & 351.54 & 351.3 & 351.09 \\ 303 & 347.18 & 355.06 & 349.88 & 354.33 & 352.26 & 352.49 & 351.99 & 351.76 & 351.55 & 351.37 \\ 303 & 348.03 & 354.67 & 350.36 & 354.16 & 352.39 & 352.61 & 352.15 & 351.98 & 351.79 & 351.65 \\ 303 & 348.88 & 354.26 & 350.82 & 353.96 & 352.49 & 352.71 & 352.31 & 352.19 & 352.02 & 351.92 \\ 303 & 349.73 & 353.84 & 351.28 & 353.72 & 352.59 & 352.79 & 352.47 & 352.39 & 352.26 & 352.19 \\ 303 & 350.58 & 353.41 & 351.73 & 353.44 & 352.67 & 352.84 & 352.62 & 352.58 & 352.49 & 352.45 \\ 303 & 351.43 & 352.95 & 352.18 & 353.11 & 352.74 & 352.87 & 352.76 & 352.76 & 352.72 & 352.71 \\ 303 & 352.28 & 352.48 & 352.63 & 352.73 & 352.81 & 352.86 & 352.9 & 352.93 & 352.95 & 352.96 \end{pmatrix}$$
a

$$z = \begin{pmatrix} 303 & 336 & 356.83 & 348.45 & 352.08 & 351.45 & 350.54 & 349.82 & 348.67 & 347.93 & 347 \\ 303 & 337.65 & 356.52 & 349.06 & 352.31 & 351.83 & 350.91 & 350.27 & 349.17 & 348.5 & 347.63 \\ 303 & 339.29 & 356.2 & 349.6 & 352.53 & 352.14 & 351.27 & 350.68 & 349.66 & 349.06 & 348.27 \\ 303 & 340.93 & 355.85 & 350.09 & 352.73 & 352.37 & 351.61 & 351.05 & 350.14 & 349.59 & 348.89 \\ 303 & 342.56 & 355.48 & 350.54 & 352.9 & 352.55 & 351.92 & 351.38 & 350.6 & 350.1 & 349.51 \\ 303 & 344.18 & 355.08 & 350.95 & 353.03 & 352.67 & 352.2 & 351.69 & 351.05 & 350.6 & 350.12 \\ 303 & 345.81 & 354.64 & 351.32 & 353.11 & 352.75 & 352.44 & 351.96 & 351.48 & 351.09 & 350.72 \\ 303 & 347.43 & 354.17 & 351.67 & 353.13 & 352.79 & 352.63 & 352.22 & 351.88 & 351.57 & 351.3 \\ 303 & 349.04 & 353.66 & 352 & 353.08 & 352.81 & 352.77 & 352.46 & 352.26 & 352.03 & 351.87 \\ 303 & 350.66 & 353.09 & 352.31 & 352.95 & 352.81 & 352.85 & 352.68 & 352.61 & 352.49 & 352.43 \\ 303 & 352.28 & 352.48 & 352.63 & 352.73 & 352.81 & 352.86 & 352.9 & 352.93 & 352.95 & 352.96 \end{pmatrix}$$
б

$$z = \begin{pmatrix} 303 & 328.74 & 354.68 & 349.28 & 350.15 & 350.84 & 349.27 & 348.4 & 346.32 & 344.9 & 343 \\ 303 & 331.16 & 354.61 & 349.97 & 350.61 & 351.44 & 349.84 & 349.12 & 347.1 & 345.86 & 344.07 \\ 303 & 333.56 & 354.53 & 350.54 & 351.06 & 351.92 & 350.39 & 349.76 & 347.88 & 346.77 & 345.13 \\ 303 & 335.94 & 354.44 & 351.02 & 351.5 & 352.28 & 350.92 & 350.32 & 348.64 & 347.63 & 346.19 \\ 303 & 338.3 & 354.31 & 351.4 & 351.9 & 352.54 & 351.4 & 350.82 & 349.37 & 348.47 & 347.23 \\ 303 & 340.65 & 354.15 & 351.72 & 352.25 & 352.71 & 351.84 & 351.26 & 350.07 & 349.27 & 348.25 \\ 303 & 342.98 & 353.94 & 351.97 & 352.54 & 352.82 & 352.21 & 351.65 & 350.74 & 350.04 & 349.24 \\ 303 & 345.31 & 353.68 & 352.17 & 352.75 & 352.87 & 352.51 & 352.01 & 351.36 & 350.79 & 350.22 \\ 303 & 347.64 & 353.36 & 352.34 & 352.86 & 352.87 & 352.73 & 352.32 & 351.94 & 351.52 & 351.17 \\ 303 & 349.96 & 352.96 & 352.49 & 352.86 & 352.85 & 352.85 & 352.62 & 352.46 & 352.24 & 352.08 \\ 303 & 352.28 & 352.48 & 352.63 & 352.73 & 352.81 & 352.86 & 352.9 & 352.93 & 352.95 & 352.96 \end{pmatrix}$$
с

Рисунок 4.3.7 – Значения температур в узловых точках арбузного полуфабриката:

a – толщиной 1 мм; *б* - толщиной 2 мм; *с* - толщиной 3 мм

Наблюдаемый экстремальный вид температурного поля обусловлен явлениями интенсивного испарения свободной влаги и «парникового эффекта», который связан с повышением давления водяного пара внутри пор, ячеек, капилляров в структуре высушиваемого материала и их деструкции по этой причине, причем экстремум наблюдается на участке, следующим за прогревом объекта сушки до температуры парообразования.

Это определяется тем, что фазовый переход вода-пар сопровождается отведением тепловой энергии от вещества и как следствие снижением его температуры, в большей степени на поверхности по сравнению с его внутренними слоями.

На границе контакта материала с предварительно нагретой рабочей поверхностью до $T_{г.п.}$, в начальный момент операции, наблюдается рост его температуры, стремящийся экспоненциально к температуре $T_{г.п.}$ и впоследствии она принимает ее значения.

Как видно из рисунка 4.3.7 рассчитанное распределение температуры в течение всего процесса не превышало заданных пороговых значений 355 °K, необходимых для сохранения пектиновых веществ в высушиваемом арбузном полуфабрикate. Из этого следует, что рекомендованные условия варьирования T при конвективно-кондуктивном обезвоживании арбузного, можно внедрить для выработки СП.

4.4 Описание предлагаемой установки, предназначенной для конвективной сушки арбузного полуфабриката, анализ ее преимуществ перед существующими аналогами

Объектом обезвоживания является гелеобразная водная субстанция, полученная на основе пектинового экстракта из арбузных корок (арбузный полуфаб-

рикат) и микроцеллюлозы, служащими натуральными пленкообразователями, выработанными из вторичного сырья. Такой полуфабрикат, согласно выбранному способу влагоудаления, должен быть высушен до пленкообразного состояния, при этом объект сушки термолабильный, и к тому же в своем составе имеет достаточное количество сахаров, которые в процессе обезвоживания меняют свою структуру в результате их меланоидинообразования и карамелизации. Также следует отметить, что внесенные добавки в исходный пектиновый экстракт качественно меняют физико-реологические характеристики объекта сушки (адгезионную способность, вязкость, плотность, теплофизические характеристики и др.).

Учитывая все вышеописанное, а также на основе анализа конструкций установок, предназначенных для сушки геле- и пастообразных продуктов была разработана конвейерная сушильная установка для выработки СП с рациональными потребительскими показателями при уменьшении энергоемкости. Отметим, что предлагаемая установка непрерывного действия (рис. 4.4.1), благодаря своим конструктивным особенностям, может быть пригодна не только для осуществления обезвоживания арбузного полуфабриката, но и для сушки подобных продуктов.

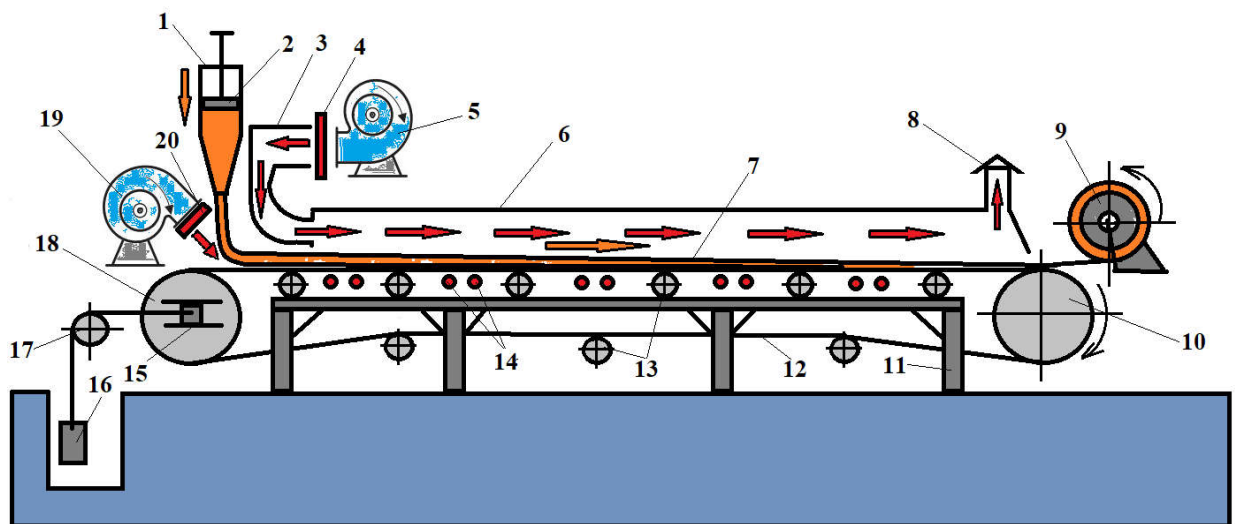


Рисунок 4.4.1 – Схема предлагаемой сушильной установки:

- 1 – приемный бункер; 2 – поршень; 3 – воздуховод; 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 – рольганги; 14 – ТЭНы; 15 – натяжное устройство;
 16 – груз; 17 – неподвижный блок; 18 – натяжной барабан

Устройство, представленное на рисунке 4.4.1, работает следующим образом. Арбузный полуфабрикат, имеющий начальную температуру 25...30°C, подается в приемный бункер 1, снабженный поршневым устройством при помощи которого производится выдавливание влажного материала с заданными толщиной и шириной на горячую ленту транспортера 12. Температура ленты поддерживается в пределах 80°C посредством трубчатых электронагревателей 14. Перед тем как выдавленный влажный материал коснется горячей ленты его нижняя часть подвергается предварительному подсушиванию сушильным агентом, имеющим температуру 100°C, посредством вентилятора 19 и калорифера 20. Подсушивание нижней части сформованного для сушки влажного материала необходимо для снижения у него адгезионных свойств. После того, как выдавленный влажный материал коснулся горячей ленты, он попадает в рабочую зону сушилki в которой реализуется конвективно-кондуктивный энергоподвод к объекту влагоудаления. Конвективный энергоподвод обеспечивается скоростью 2,5 м/с и температурой сушильного агента 100°C, посредством вентилятора 5 и калорифера 24. Отработанный сушильный агент после осушки возвращается в рабочую камеру 6. Кондуктивный энергоподвод обеспечивается трубчатыми электронагревателями 14, которые расположены непосредственно под лентой транспортера 12. Для обеспечения заданной продолжительности процесса сушки осуществляется регулировка скорости движения конвейерной ленты 12 посредством изменения количества оборотов приводного барабана 10. Для обеспечения необходимого натяжения конвейерной ленты 12 транспортер снабжен натяжным устройством, которое включает натяжной барабан 18, неподвижный блок 17 и подвесной груз 16. Готовый продукт в виде пленочного материала с заданной влажностью и конечной толщиной снимается с ленты транспортера барабаном-накопителем 9, первый слой пленки на который устанавливается вручную. После накопления определённого количества пленочного материала на барабан-накопитель производится его смена.

Применение предложенной конструкции для обезвоживания арбузного полуфабриката позволит эффективно проводить процесс сушки, т.к. сушильная по-

верхность, 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.

Данное диссертационное исследование теоретически и экспериментально доказывает, что по сравнению с другими известными техническими и технологическими решениями получения биоразлагаемой съедобной упаковки на основе пектиновых экстрактов, предлагаемый подход имеет следующие преимущества:

- в данном исследовании предлагается использовать для получения упаковочного материала арбузное сырье, преимущественно некондиционного вида, которое в большом количестве остается на полях после сбора урожая и не утилизируется;

- дополнительно, кроме арбузной корки, которая является основой для выработки пектинового экстракта, арбузная мякоть является сырьевым материалом для получения ликопина [58], а семена для выработки арбузного масла, т.е. грамотный подход к утилизации некондиционного арбузного сырья создает предпосылки для создания безотходной технологии и позволяет получать ценные пищевые продукты, востребованные на рынке;

- в реализуемой технологии не предусмотрена энергоемкая операция выпаривания экстракта, связанная с высокотемпературной обработкой что, негативно влияет на сохранность витаминных, пектиновых комплексов и других ценных веществ, при этом повышение концентрации, в отличие от выпаривания для рационального проведения процесса сушки осуществляется посредством добавления в экстракт целевых компонентов, таких как пектин и микроцеллюлоза что, экономически оправдано;

- в реализуемой технологии арбузный рафинат, после экстракции из него пектиновых и иных водорастворимых веществ, является пригодной и практически «бросовой» основой для производства кормовой продукции или комбикормов;

– в реализуемой конструкции сушилки предусмотрено предварительное обезвоживание пленки в пространстве между выходным отверстием подающего бункера и рабочей поверхностью транспортера, что приводит к снижению адгезии между ней и объектом сушки и, как следствие, упрощение его съема с конвейерной ленты;

– данное устройство имеет сравнительно простое конструктивное исполнение, позволяющее реализовать рациональные «бережные» режимы сушки, обуславливающие хорошие качественные показатели готовой продукции, в частности, привлекательный внешний вид и прочность пленочного упаковочного материала.

Таким образом, положительный эффект от внедрения в производственную практику предлагаемого сушильного устройства по сравнению с известными агрегатами заключается в эффективном проведении процесса обезвоживания арбузного полуфабриката, как с технической, так и с экономической точек зрения. Влажность конечного продукта (биоразлагаемый упаковочный материал) составляет не более 25%, что позволяет хранить его длительное время и использовать в отдельных технологиях пищевой промышленности, где может применяться данный упаковочный материал.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 корки 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 (корка 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 – $1,15 \pm 0,05\%$.

Рецептурный состав арбузного полуфабриката:

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

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.

В качестве заключения хотелось бы отметить, что поставленные в работе задачи решены путем обобщенного анализа общепризнанных и современных методов исследования тепломассопереноса, а также реализации наиболее перспективных и эффективных из них в области технологий биоразлагаемых упаковоч-

ных пленок из сырья растительной природы.

Приведенные аппроксимирующие соотношения адекватны эмпирическим данным, что обосновано результатами их статистической обработки. Научные результаты, методические подходы и рекомендованные конструкторские решения не конфликтуют с общепринятыми научными положениями и методами рационального проектирования аппаратного оформления обозначенных процессов.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аймухамедова, Г. Б. Пектиновые вещества и их значение в народном хозяйстве / Г. Б. Аймухамедова, Н. П. Шелухина // Труды Юбилейной научной сессии АН Киргизской ССР. – 1958. – С.173-197.
2. Айнштейн, В. Г. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов [и др.] // М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 1758 с.
3. Алексанян, И. Ю. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пено-сушка. Теория. Практика. Моделирование: монография / И. Ю. Алексанян, А. А. Буйнов // Астрахань: АГТУ, 2004. – 380 с.
4. Алексанян, И. Ю. Математические методы численного решения научно-технических задач / И. Ю. Алексанян, Ю. А. Максименко, А. Х.-Х. Нугманов, Л. М. Титова. – Астрахань: АГТУ, 2020. – 148 с.
5. Алексанян, И. Ю. Развитие научных основ процессов высокоинтенсивной сушки продуктов животного и растительного происхождения: специальность 05.18.12 «Процессы и аппараты пищевых производств»: автореф. дис. ... доктора техн. наук / И. Ю. Алексанян ; М., 2001. – 52с.
6. Алексанян, И. Ю. Физико-математическая модель процесса комбинированной сушки продуктов в различном агрегатном состоянии и численно-аналитический метод расчета эволюции полей температур, давлений и определения коэффициентов теплопроводности и молярного переноса пара с учетом динамики обезвоживания на основе аппроксимации кривых кинетики сушки / И. Ю. Алексанян // Труды второй Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2005». – Москва, 2005. – Т.1. – С. 175-179.

7. Арбузы в цифрах: офиц. интернет-ресурс. – 2021. – URL:https://www.rbc.ru/own_business/24/08/2017/599c39f09a794755c7c0e49c (Дата обращения: 17.06.2021).
8. Ашинова, А. А. Использование пектиновых веществ для производства пленочных структур народно-хозяйственного назначения / А. А. Ашинова, З. Н. Хатко // Повышение качества и безопасности пищевых продуктов: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (1-2 нояб. 2016г.). Махачкала, 2016. – С.99-100.
9. Ашинова, А. А. Конструирование пектиносодержащих пленочных структур пищевого назначения / А. А. Ашинова, З. Н. Хатко // Агропромышленный комплекс и актуальные проблемы экономики регионов: материалы XXXI Всероссийской научно-практической конференции. Майкоп, 2015. – С. 150-153.
10. Ашинова, А. А. Пленочные покрытия пищевого назначения / А. А. Ашинова, З. Н. Хатко // Продовольственная безопасность: научное, кадровое и информационное обеспечение: материалы Второй Международной научно-технической конференции (Воронеж, 11-12 нояб. 2015 г.) / ВГУИТ. – Воронеж : Изд-во ВГУИТ, 2015. – С. 248-251.
11. Ашинова, А. А. Полимерные композиции для пленки пищевого назначения (обзор) / А. А. Ашинова, З. Н. Хатко // Новые технологии. – 2016. – № 1. – С. 30-34.
12. Ашинова, А. А. Разработка пектиносодержащих пленочных структур пищевого и лечебного назначения: специальность 05.18.07 «Биотехнология пищевых продуктов и биологических активных веществ» : дис. ... канд. техн. наук / А. А. Ашинова ; Майкопский государственный технологический университет. – Майкоп, 2018. – 151 с.
13. Аэров, М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зерновыми слоями / М. Э.Аэров, О. М. Тодес. – Л.: Химия, 1968. – 512 с.
14. Балякина, Е. В. Разработка технологии и оценка потребительских свойств

- мороженого функционального назначения на основе плодового, ягодного и овощного сырья: специальность 05.18.15 «Технология и товароведение пищевых продуктов функционального и специализированного назначения и общественного питания» : дис. ... канд. техн. наук / Е. В. Балякина ; Кубанский государственный технологический университет. – Краснодар, 2009. – 142 с.
15. Барашкина, Е. В. Обоснование технологии сладких блюд, обогащенных пищевыми волокнами инновации в индустрии питания и сервисе / Е. В. Барашкина, М. И. Матиашвили, Г. А. Купин // Инновации в индустрии питания и сервисе : материалы I Международной научно-практической конференции, посвященной 30-летию кафедры технологии и организации питания (19-21 сент. 2014 г.) / Майкоп, 2014. – С.340-342.
 16. Белик, В. Ф. Бахчевые культуры / В. Ф. Белик. – 2-е изд. – М.: Колос, 1975. – 271 с.
 17. Белик, В. Ф. Биологические основы агротехники и селекции тыквенных / Белик, В. Ф. – М. : б. и., 1966. – 156 с.
 18. Бессмельцев, В. П. Автоматизированная система нанесения тонких полимерных пленок / В.А. Бессмельцев, Л. В. Выдрин, Н. В. Голошевский, М. В. Максимов // Автотметрия. – 2003. – Т. 39, № 2. – С. 48–56.
 19. Бессонова, Е. И. Биологические особенности арбузов и дынь на богаре Узбекистана и их селекция : автореф. дис. ... д-ра. с.-х. наук / Е. И. Бессонова. – Ташкент, 1971. – 56 с.
 20. Брунауэр, С. Адсорбция газов и паров. Том 1. Физическая адсорбция / С. Брунауэр; пер. с англ. под ред. М.Н. Дубинина. – М.: Гос. изд-во иностр. лит., 1948. – 754 с.
 21. Бывальцев, В. А. Разработка технологии кондитерских изделий с применением полуфабрикатов из сахарной свеклы: специальность 05.18.01 «Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции и виноградарства» : дис. ... канд. техн. наук / В. А. Бывальцев ; Воронежская государственная техноло-

- гическая академия. – Воронеж, 2010. – 189 с.
22. Бывальцев, В. А. Функциональные желейные кондитерские изделия / В. А. Бывальцев, Г. О. Магомедов, М. Г. Магомедов // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2010. – № 3. – С. 79-81.
 23. Внукова, Т. Н. Новые виды продукции из плодов кормового арбуза с профилактическими свойствами / Т. Н. Внукова, Л. Г. Влащик, В. Д. Надыкта / Научное обеспечение агропромышленного комплекса : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых (Краснодар, 26–28 ноября 2012 г. Издательство: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2012. –С. 195-196.
 24. Внукова, Т. Н. Технология функционального десерта с использованием натуральных ингредиентов / Т. Н. Внукова, Л. Г. Влащик // Молодой ученый. – 2015. – № 5.1 (85.1). – С. 73-77.
 25. Вукалович, М. П. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара / М. П. Вукалович. – Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1963. – 401 с.
 26. Гаузнер С. И. Измерение массы, объема и плотности : учеб. пособие для метрол. техникумов / С. И. Гаузнер, С. С. Кивилис, А. П. Осокина, А. Н. Павловский. – Москва: Изд-во стандартов, 1972. – 623 с.
 27. Гинзбург, А. С. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов / А. С. Гинзбург, И. М. Савина. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 280 с.
 28. Гинзбург, А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1975. – 527 с.
 29. Гинзбург, А. С. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов / А. С. Гинзбург, М. А. Громов. – М.: Агропромиздат, 1987. – 272 с.
 30. Гинзбург, А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская. – М. Пищевая промышленность, 1980. – 288 с.
 31. Государственная фармакопея Российской Федерации / М-во здравоохране-

- ния и социального развития Российской Федерации, Федеральное агентство по здравоохранению и социальному развитию, Федеральная служба по надзору в сфере здравоохранения и социального развития, Федеральное государственное учреждение "Науч. центр экспертизы средств мед. применения" Росздравнадзора. – 12 [изд.]. – Москва : Науч. центр экспертизы средств мед. применения, 2008. – 696 с.
32. Гришин, Н. С. Экстракция в поле переменных сил. Гидродинамика, массопередача, аппараты: монография: в 2 ч. Ч.1. / Н. С. Гришин, И. И. Поникаров, С. И. Поникаров, Д. Н. Гришин. // Казань: Издательство КНИТУ. – 2012. 468 с.
 33. Домкин К. И. Физические основы измерения размера частиц / К. И. Домкин, В. А. Трусков, А. М. Гусев. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fizicheskie-osnovy-izmereniya-razmera-chastits/viewer> (дата обращения: 17.05.2021).
 34. Донченко, Л. В. Определение студнеобразующей способности пектинового концентрата / Л. В. Донченко, Л. Я. Родионова, Т. А. Инюкина // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2000. – №2–3. С. 31-33.
 35. Донченко, Л. В. Производство пектина / Л. В. Донченко, Н. С. Карпович, Е. Г. Симхович // Киев: Урожай, 1989. – 87 с.
 36. Егоров, Г. А. Влияние тепла и влаги на процессы переработки и хранения зерна / Г. А. Егоров. – М.: Колос, 1973. – 246 с.
 37. Ефремов, А. А. Выделение пектина из нетрадиционного растительного сырья и применение его в кондитерском производстве / А. А. Ефремов, Т. А. Кондратюк // Химия растительного сырья. – 2008. – № 4. – С. 171-176.
 38. Зайко, Г. М. Получение пектина для использования в лечебных и профилактических целях / Г. М. Зайко, М. Ю. Тамова // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 1998. – № 1. – С. 13-19.
 39. Знаменский, В. Д. Сборник научно-исследовательских работ Азово-Черноморского сельхозинститута / В. Д. Знаменский, Ф. Е. Голенко // Краснодар, 1934. – 118 с.
 40. Зуев В. В. Физика и химия полимеров: учебное пособие / В.В. Зуев, М. В.

- Успенская, А. О. Олехнович // СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 45 с.
41. Измерение плотности твердых тел пикнометрическим методом : сайт. – URL: <https://works.doklad.ru/view/V3AHngEk73s.html> (дата обращения: 02.07.2021).
 42. Ильина, И. А. Исследование процесса деминерализации экстракта ионообменным методом / И. А. Ильина, И. П. Черникова, И. Г. Леонова // Научные проблемы производства пектина : научн.-техн. семинар-совещани. Краснодар. – 1993. – С.83.
 43. Калорийность арбуз. Химический состав и пищевая ценность : сайт. – URL: https://health-diet.ru/base_of_food/sostav/30.php (дата обращения: 17.05.2021).
 44. Карпович, Н. С. Пектин: Производство и применение / Н. С. Карпович, Л. В. Донченко, В. В. Нелина и др. – Киев: Урожай, 1989. – 87 с.
 45. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов / А. Г. Касаткин // М.: ООО ТИД Альянс, 2005. – 753 с.
 46. Касьянов, Г. И. Биоразрушаемая упаковка для пищевых продуктов / Г. И. Касьянов // Наука. Техника. Технологии. – 2015. – № 3. – С. 1–20.
 47. Кей, Р. Введение в технологию промышленной сушки / Р. Б. Кей // Минск: Наука и техника, 1983. – 262 с
 48. Кенийз, Н. В. Разработка технологии хлебобулочных полуфабрикатов с применением криопротектора / Н. В. Кенийз, Н. В. Сокол // Новые технологии. – 2013. – №1. – С. 19-24
 49. Ковалевский, Г. К. К истории культуры арбуза и дыни в Европейской части РСФСР / Г. К. Ковалевский // Труды по прикладной ботанике. – 1962. – Т. 18, № 3. – С.200-214.
 50. Козлов, П. В. Химия и технология полимерных пленок / П. В. Козлов, Г. И. Брагинский. – М.: Искусство, 1965. – 624 с.
 51. Компанцев, В. А. Комплексообразование пектинов с ионами поливалентных металлов / В. А. Компанцев, Н. Ш. Кайшева, Л. П. Гокжаева // Пищевая промышленность. – 1990. – № 11. – С.39-40.
 52. Корнева, О. А. Разработка технологии многокомпонентных плодоовощных

- напитков функционального назначения с применением натуральных структурообразователей: специальность 05.18.01 «Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции и виноградарства» : дис. ... канд. техн. наук / О. А. Корнева ; Кубанский государственный технологический университет. – Краснодар, 2006. – 114 с.
53. Костина, Н. Г. Экстракция растительных пигментов из местного сырья / Н. Г. Костина, Т. В. Подлегаева, И. Ю. Сергеева // Техника и технология пищевых производств. – 2019. – Т. 49, № 4. – С. 522-530.
 54. Кочеткова, А. А. Некоторые аспекты применения пектина / А. А. Кочеткова // Пищевая промышленность. – 1992. – № 7. – С.28-29.
 55. Кочкина, Н. В. Модифицирование водных дисперсий полимеров полианилином: специальность 02.00.06 «Высокомолекулярные соединения» : дис. ... канд. техн. наук / Н. В. Кочкина ; Ярославский государственный технический университет. – Ярославль, 2016. – 141с.
 56. Красников, В. В. Метод комплексного определения теплофизических характеристик вязких жидких, пастообразных и мелкодисперсных материалов / В. В. Красников, А. С. Панин, В. Д. Скверчак // Известия вузов СССР. Пищевая технология – 1976. – №2. – С. 138.
 57. Кудрякова, В. А. Съедобная упаковка: состояние и перспективы / В. А. Кудрякова, Л. С. Кузнецова, М. Н. Нагула, Н.В. Михеева, Е.В. Казакова // Упаковка и логистика. – 2007. – № 6. – С.24-25.
 58. Лебедев, В. А. Решение адаптированной к блокам мякоти арбуза математической модели их дефростации / В. А. Лебедев, А. Х.Х. Нугманов, И. Ю. Алексанян, Н. Д. Айсунгуров, Г. С. Мещерякова, В. Э. Поликарпова // Вестник КрасГАУ. – 2021. – № 4 (169). – С. 133-139.
 59. Лебедев, В. В. Сушка водорастворимых полимеров в сушилках с комбинированным подводом теплоты : специальность 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» : дис. ... канд. техн. наук / В. В. Лебедев ; Ивановский государственный химико-технологический институт. – Иваново,

2010. – 127 с.

60. Левин, А. С. Основные принципы анализа размера частиц / А. С. Левин. – URL: https://www.studmed.ru/levin-as-osnovnye-principy-analiza-razmerov-chastic_c47b89a557c.html (дата обращения: 17.05.2021).
61. Лимонная кислота : сайт. – URL: <https://astrahan.tiu.ru/p349522619-limonnaya-kislota-1kg.html?&primelead=MTEuMDM> (дата обращения: 17.05.2021).
62. Липатов, Ю. С. Коллоидная химия полимеров / Ю. А. Липатов. – Киев: Наукова думка, 1984. – 343 с.
63. Литвак, И. М. Изучение технологических условий получения пищевого пектина из жома / И. М. Литвак, М. И. Барабанов // Труды Киевского технол. ин-та пищевой пром-сти. – 1959. – Вып. 21. – С. 16-19.
64. Лыков, А. В. Сушка в химической промышленности / А. В. Лыков. – М.: Химия, 1970. – 499 с.
65. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков // М.: Энергия, 1968. – 471 с.
66. Лыков, А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. – М.: Гостоптехиздат, 1956. – 464 с.
67. Лыков, А. В. Тепломассообмен / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 478 с.
68. Максименко, Ю. А. Развитие научно-практических основ и совершенствование процессов сушки растительного сырья в диспергированном состоянии : специальность 05.18.12 «Процессы и аппараты пищевых производств»: дис. ... докт. техн. наук / Ю. А. Максименко; Астраханский государственный технический университет. – Астрахань, 2016. – 502 с.
69. Мещерякова, Г. С. Исследование кинетики извлечения водорастворимых компонентов из измельченной коры арбуза столового / Г. С. Мещерякова, А. Х.Х. Нугманов, И. Ю. Алексанян, Л. М. Титова, О. В. Золотовская // Индустрия питания. – 2021. – Т. 6, № 4. – С. 16-25.
70. Муштаев, В. И. Сушка дисперсных материалов / В. И. Муштаев, В. М. Ульянов // М.: Химия, 1988. – 351 с.
71. Мясищева, Н. В. Желирующая способность пектинов свежих и заморожен-

- ных ягод красной смородины / Н. В. Мясищева, Е. Н. Артемова, М. А. Макаркина // Техника и технология пищевых производств. – 2017. – № 2 (45). – С. 62-68.
72. Никитина, Л. М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах / Л. М. Никитина. – М.: Энергия, 1968. – 500 с.
 73. Никулина, М. А Совершенствование процесса инфракрасной сушки пищевой съедобной пленки: специальность 05.18.12 «Процессы и аппараты пищевых производств» : дис. ... канд. тех. наук: / М. А. Никулина; Университет ИТМО. – СПб., 2019. – 150 с.
 74. Нугманов, А. Х.-Х. Исследование теплоёмкости пастообразных пищевых продуктов / А. Х.-Х. Нугманов, В. А. Краснов, Ю. А. Максименко, Е. В. Фоменко // Естественные и технические науки. – 2015. – № 6(84). – С. 487-490.
 75. 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. Алексанян, Е. В. Соколова // Техника и технология пищевых производств. – 2021. – Т. 51, № 4. – С. 930-942.
 76. Овчинников, С. В. Конвективный теплообмен. Методики инженерного расчета коэффициента конвективной теплоотдачи / С. В. Овчинников. – Саратов: СГУ имени Н.Г. Чернышевского, 2015. – 48 с.
 77. Определение плотности вещества : сайт. – URL: <https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13572/1/1>. Измерение плотности готов к ЭОР(1%2C2) (1).pdf/ (дата обращения: 02.07.2021).
 78. ОФС.1.5.3.0004.15 Определение подлинности, измельченности и содержания примесей в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах. – URL: <http://pharmacopoeia.ru/ofs-1-5-3-0004-15-opredelenie-podlinnosti-izmelchennosti-i-soderzhaniya-primesej-v-lekarstvennom-rastitelnom-syre-i-lekarstvennyh-rastitelnyh-preparatah/> (дата обращения: 28.06.2021).

79. Панин, А. С. Экспресс-метод определения коэффициента теплопроводности пастообразных и мелкодисперсных материалов / А. С. Панин, В. Д. Скверчак // Известия вузов СССР. Пищевая технология. – 1974. – № 1. – С. 140-143.
80. Патент № 0547551А1 США, МПК А23G 3/00. Edible films : заявл. 16.12.1991 : опубл. 23.06.1993 / L. Laurent, A. Doreau, J. Nadison.
81. Патент № 101787214В Китай. Edible membrane by taking proanthocyanidins crosslinked with collagen as matrix and preparation method thereof : заявл. 08.03.2012 : опубл. 25.04.2012 / Zh. Qian, L. Defu, L. Wei [et al.] ; заявитель Sichuan University.
82. Патент № 102311647В Китай. A vegetable protein complex konjac gum production technology of biodegradable edible films : заявл. 02.06.2011 : опубл. 11.01.2012 / L. Tu, F. Ying.
83. Патент № 102532569В Китай, МПК Y02W90/13. Preparation method of yak milk casein edible film China : заявл. 20.01.2012 : опубл. 02.10.2013 / L. Gamber, H. Yinhi [et al.] ; заявитель : Gansu Hualing Biotechnology Research Center.
84. Патент № 103588997А Китай, МПК Y02W90/11. Edible film preparation method based on compound of protein and polysaccharide : заявл. 15.11.2013 : опубл. 19.02.2014 / K. Yang, W. Shaoyun, W.-P. Liu ; заявитель West Fuzhou Food Co., Ltd.
85. Патент № 104260991А Китай. Edible paper packing of fluid or semifluid food : заявл. 09.09.2014 : опубл. 07.01.2015 / D. Qin, T. Yali ; заявитель Tian Yali.
86. Патент № 104448845А Китай. High-barrier isolated soybean protein edible membrane liquid as well as preparation method and application there of : заявл. 18.11.2014 : опубл. 25.03.2015 / Zh. Universal, H. Chun, G. Shan [et al.] ; заявитель : Soybean Development Research Center of Hei-longjiang Province.
87. Патент № 104479153А Китай. A preparing method of an edible peanut protein film : заявл. 16.10.2014 : опубл. 01.04.2015 / P. Yeung, S. Jie, L. Peng [et al.] ; заявитель Shandong Peanut ResearchInstitute.

88. Патент № 104558648А Китай, МПК Y02W90/11. Seaweed flavored tuna fish bone gelatin Edible film and method : заявл 05.02.2015 : опубл. 29.04.2015 / Chi Long Feng, Wang Bin, Chen Yam [et al.] ; заявитель Zhejiang Ocean University.
89. Патент № 111536 Российская Федерация, МПК C12S 3/00 (2006.01). Противоточный экстрактор для растительного и животного сырья : № 2011125272/13 : заявл. 20.06.2011 : опубл. 20.12.2011 / Л. О. Онхонова, И. Б. Баторова ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Восточно-Сибирский государственный технологический университет"
90. Патент № 154799 Российская Федерация, МПК G01N 25/20 (2006.01). Калориметр для определения удельной теплоемкости пищевых продуктов : № 2015105320/28 : заявл. 17.02.2015 : опубл. 10.09.2015 / А. Х.-Х. Нугманов, В. А. Краснов, И. В. Краснов.
91. Патент № 1695865 СССР, МПК A23B 4/10 (2000.01). Способ хранения мяса и мясопродуктов : 4686769 : заявл. 06.05.1989 : опубл. 07.12.1991 / Б. С. Тамабаева, М. М. Мусульманова, Р. М. Аксяенова, Д. В. Тюребаева, О. Г. Цой; заявитель Бишкекский политехнический институт.
92. Патент № 2004096193A1 США, МПК A61K9/006. Fast dissolving orally consumable films containing a modified starch for improved heat and moisture resistance : заявл. 19.04.2004 : опубл. 11.11.2004 / D. J. Fadden, N. M. Kulkarni, A. F. Sorg.
93. Патент № 2034489 Российская Федерация, МПК A23B 7/02 (1995.01), F26B 3/30 (1995.01). Радиационная сушилка для растительных пищевых продуктов : № 93049279/13 : заявл. 28.10.1993 : опубл. 10.05.1995 / Н. А. Кашин, В. Н. Хорн, Д. Н. Кашин, Н. И. Посредников, А. Н. Юшков ; заявитель Малое государственное предприятие "Феруза".
94. Патент № 2080081 Российская Федерация, МПК A23L 1/0524 (1995.01). Способ получения сухого пектинового экстракта из растительного сырья и способ получения пектина из растительного сырья : № 9494004112 : заявл.

- 08.02.1994 : опубл. 27.05.1997 / В. В. Нелина, Л. В. Донченко, Т. В. Чумпалова, Н. С. Карпович.
95. Патент № 2115320 Российская Федерация, МПК A22C 13/00 (1995.01). Способ получения пищевой коллагеновой пленки : № 96122364/13 : заявл. 13.11.1996 : опубл. 20.07.1998 / Л. В. Новик, Л. А. Рудаков; заявитель Акционерное общество "Тара и упаковка" Лужский завод "Белкозин".
 96. Патент № 2174132 Российская Федерация, МПК C08L 1/12 (2000.01), C08L 3/02 (2000.01), C08K 5/00 (2000.01), C08K 5/00 (2000.01), C08K 5/13 (2000.01), C08K 5/103 (2000.01). Биологически разрушаемая термопластичная композиция на основе природных полимеров : №2012103514/05 : заявл. 02.02.2012 : опубл. 20.08.2013 / А. Л. Пешехонова, Е. Г. Любешкина, О. А. Сдобникова, Л. Г. Самойлова, С. А. Сизова ; заявитель Московский государственный университет прикладной биотехнологии.
 97. Патент № 2220161 Российская Федерация, МПК C08J 5/18 (2000.01), B29C 49/04 (2000.01), A22C 13/00 (2000.01), C08L 3/00 (2000.01). Пленка, содержащая крахмал или производные крахмала и полиэфируретаны, способ изготовления такой пленки и упаковка из такой пленки : № 2000132734/04 : 18.05.1999 : опубл. 27.12.2003 / К.-Д. Хаммер, М. Алерс, Г. Гролиг, Х.-Г. Фритц, Т. Зайденштюккер ; заявитель КАЛЛЕ НАЛО ГМБХ УНД КО.КГ.
 98. Патент № 2221634 Российская Федерация, МПК B01F 11/02 (2000.01). Ультразвуковое устройство : № 2002108656/15 : заявл. 01.04.2002 : опубл. 20.01.2004 / В. П. Огнев, Ф. В. Безменов, А. А. Коричев, А. С. Носов, Ю. Г. Юделевич ; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт токов высокой частоты им. В.П.Вологодина".
 99. Патент № 2445074 Российская Федерация, МПК A61K 9/00 (2006.01), A61K 47/10 (2006.01), A61K 47/38 (2006.01), A61P 17/02 (2006.01). Лекарственная пленка пролонгированного действия, способ изготовления и способ ее применения : №2010127029/15 : заявл. 01.07.2010 : опубл. 20.03.2012 / М. Г. Шурыгин, И. А. Шурыгина ; заявитель Учреждение Российской академии

медицинских наук Научный центр реконструктивной и восстановительной хирургии Сибирского отделения РАМН (НЦРВХ СО РАМН).

100. Патент № 2606831 Российская Федерация, МПК В02С 2/00 (2006.01). Измельчитель пищевых отходов : № 2015138407 : заявл. 09.09.2015 : опубл. 10.01.2017 / А. М. Гонопольский, Е. В. Зинякина ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский политехнический университет".
101. Патент № 2647192 Российская Федерация, МПК В05D 3/00 (2006.01), F26В 3/20 (2006.01), F26В 13/08 (2006.01) Способ и устройство для сушки жидкой пленки, нанесенной на подложку : № 2014107511 : заявл. 20.07.2012 : опубл. 14.03.2018 / Ф. Дарст ; заявитель ФМП ТЕКНОЛОДЖИ ГМБХ ФЛУАЙД МЕЖЕРМЕНТС & ПРОДЖЕКТС.
102. Патент № 2677046 Российская Федерация, МПК А23N 7/08 (2006.01). Установка для безотходной технологии переработки плодов арбуза : № 2018109872 : заявл. 20.03.2018 : опубл. 15.01.2019 / В. А. Цепляев, В. Г. Абезин, Д. В.Скрипкин ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Волгоградский государственный аграрный университет" (ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ).
103. Патент № 2683231 Российская Федерация, МПК А23N 7/08 (2006.01). Установка для безотходной переработки плодов арбуза : № 2018114399 : заявл. 18.04.2018 : опубл. 26.03.2019 / А. Н. Чернявский, С. Ю. Сторожаков ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Волгоградский государственный аграрный университет" (ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ).
104. Патент № 3669691А США. Produce coating : заявл. 13.01.1970 : опубл. 13.06.1972 / С. F. Delong, Т. Н. Shepherd.
105. Патент № 4915971А США, МПК А21D13/0012, А23G3/343. Method for making an edible film and for retarding water transfer among multi-component food products : заявл. 04.08.1987 : опубл. 10.04.1990 / О. R. Fennema, S. L. Kamper, J.J. Kester ; заявитель Wisconsin Alumni Research Foundation.

106. Патент № 6020050018811T2 Германия, МПКА23L 1/3172, A23J3/06/. Edible film coating composition for food production : заявл. 15.04.2004 : опубл. 08.04.2008 / Red Toronto MacQuarrie.
107. Патент № 6656493B2 США, МПК A61K8/733, A61K9/7007. Edible Film Formulations containing maltodextrin : заявл. 30.07.2001 : опубл. 02.12.2003 / M. R. Dzija, D. G. Barkalow, A. H. Chapdelaine [et al.] ; заявитель Wm Wrigley Jr Co.
108. Патент № 971209 СССР, МПК A23B 4/10 (2000.01). Полимерный состав для покрытия мороженой рыбы и рыбопродуктов : № 2994067 : заявл. 13.10.1980 : опубл. 07.11.1982 / Л. П. Зуйкова, Э. И. Изюмова, Г. С. Коноктин, Е. А. Плиско, Г. А. Петропавловский ; заявитель Институт высокомолекулярных соединений АН СССР, Государственный проектно-конструкторский институт рыбопромыслового флота.
109. Патент № CN 102311553A Китай, МПК Y02W90/11. Technology for producing degradable and edible film by utilizing pea starch : заявл. 02.06.2011 : опубл. 11.01.2012 / L. Tu, F. Ying.
110. Патент № CN 103739883A Китай, МПК Y02W90/11. Purple potato starch edible film and preparation method thereof : заявл. 24.01.2014 : опубл. 03.02.2016 / Z. Shao, L. Jun, Zh. Longtao [et al.] ; заявитель Fujian Agriculture and Forestry University.
111. Патент № CN1410481A Китай. Edible potato starch powder composite food packaging film and its preparation method : заявл. 14.11.2002 : опубл. 16.04.2003 / S. Mian, Ji Ping, Yi Zh. Zhengjiong ; заявитель Wuhan University.
112. Пектин яблочный : сайт. – URL: https://fontan-mechty.ru/p433602359-pektin-yablochnyj-apa.html?ymclid=162668584349_294923079000004 (дата обращения: 17.05.2021).
113. Плановский, А. Н. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности / А. Н. Плановский, В. И. Муштаев, В. М. Ульянов. – М.: Химия, 1979. – 287 с.
114. Применение ультразвуковых колебаний для ускорения процессов в жидких

- средах : сайт. – URL: <https://u-sonic.ru/primenenie-ultrazvuka-v-promyshlennosti/primenenie-ultrazvukovykh-kolebaniy-dlya-uskoreniya-protssesov-v-zhidkikh-sredakh/> (дата обращения: 17.05.2021).
115. Ребиндер, П. А. О формах связи влаги с материалом в процессе сушки / П. А. Ребиндер // Всесоюз. науч.-техн. совещание по сушке. Пленарные заседания. – Москва, 1958. – С. 20-33.
 116. Рефрактометрия в анализе лекарственных средств аптечного изготовления. Контроль качества лекарственных средств, изготавливаемых в аптеках. – Нижний Новгород, 2008. – 19 с.
 117. Савицкая, Т. А. Съедобные полимерные пленки и покрытия: история вопроса и современное состояние (обзор) / Т. А. Савицкая // Полимерные материалы и технологии. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 6-36.
 118. Сажин, Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин, В. Б. Сажин. – М.: Наука, 1997. – 447 с.
 119. Саидова, Р. С. Сорбционная активность пектиновых полисахаридов к ионам двухвалентных металлов: специальность 02.00.04 «Физическая химия» дис. ... канд. техн. наук / Р. С. Саидова ; Национальная академия наук Таджикистана. – Душанбе, 2021. – 124 с.
 120. Сапего, Д. В. Поверхностная модификация биополимеров / Д. В. Сапего, В. А. Бессонова // Современные научные исследования и инновации: электрон. журн. – 2017. – №1. – URL: <http://web.snauka.ru/issues/2017/01/77467> (дата обращения: 29.05.2021).
 121. Сапожникова, Е. В. Пектиновые вещества плодов / Е. В. Сапожникова. М.: Наука, 1965. – 182 с.
 122. Системы обеспечения качества и безопасности пищи: учебное руководство по пищевой гигиене и системе критических контрольных точек при анализе опасного фактора – продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО). – Рим, 2003. – 227 с.
 123. Слипченко, Е. В. Совершенствование технологии пектина и пектинопродуктов из кормового арбуза: специальность 03.00.04 «Биохимия»: дис. ... канд.

- техн. наук / Е. В. Слипченко ; Кубанский государственный аграрный университет. – Краснодар, 1999. – 198 с.
124. Сокол, Н. В. Роль пектиновых веществ в производстве продуктов питания лечебно-профилактического назначения / Н. В. Сокол, Н. С. Храмова, Ю. А. Ракова // Научный журнал КубГАУ, 2006. – №01(17).
 125. Сосновский, Л. Б. Новые данные в химии и технологии пектина / Л. Б. Сосновский // Реф. информ.: Пищевая промышленность СССР. – 1948. – Вып.9. – С.47-52.
 126. Стратегия развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2030 года : офиц. интернет-ресурс. – 2021. – URL: <https://barley-malt.ru/wp-content/uploads/2019/11/proekt-strategyu-razvytyja-pyshevoj-y-pererabatyvajuschej-promyshlennosty-rf.pdf> (Дата обращения: 17.05.2021).
 127. Сушильные аппараты и установки. Каталог. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1975. – 63 с.
 128. Тамова, М. Ю. Разработка технологии отделочного желейного полуфабриката мучных кондитерских изделий функционального назначения / М. Ю. Тамова, Р. А. Журавлёв // Хлебобулочные, кондитерские и макаронные изделия XXI века: Материалы V Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня образования ФГБОУ ВО "Кубанский государственный технологический университет" / КубГТУ. – Краснодар : Изд-во КубГТУ, 2017. – С.282-284.
 129. Температурные измерения. Справочник. / О. А. Геращенко, А. Н. Гордов, В. И. Лах и др. – Киев: Наук. думка, 1984. – 494 с.
 130. Технические условия на пленки полимерные для пищевой промышленности : сайт. – URL: <https://всероссийская-база-ту.рф/tekhnicheskie-usloviya-na-pljonki-polimernye-dlya-pishchevoj-produktsii> (дата обращения: 02.07.2021).
 131. Титова, Л. М. Массообменные процессы в химической и пищевой технологии. Лабораторные и практические занятия: учебное пособие / Л. М. Титова, И. Ю. Алексанян, А. Х.-Х. Нугманов. – СПб: Лань, 2014. – 224 с.

132. Трейбал, Р. Е. Жидкостная экстракция: перевод с английского / Под ред. С. З. Кагана. – М.: Химия, 1966. – 724 с.
133. Тыщенко, В. М. Влияние кислотно-кавитационного гидролиза растительного сырья на выход и качество пектина / В. М. Тыщенко Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2011. – №2–3. – С. 50-52.
134. Ультразвук в медицине. Физические основы применения / под ред. К. Хилла, Д. Бэмбера. – М.: Физматлит, 2008. – 542 с.
135. Ультразвуковая дезинтеграция – метод разрушения клеточной оболочки дрожжей : сайт. – URL: <http://bio-x.ru>. (Дата обращения: 17.05.2021).
136. Фармацевтическая химия: учебник / под ред. Г. В Раменской. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015 – 467 с.
137. Фармацевтическая химия: учебное пособие / под ред. В. Г. Беликова. – М.: МЕДпресс-информ, 2009 – 616 с.
138. Физические свойства воздуха : сайт. – URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/gazovye-smesi/fizicheskie-svoystva-vozdusha-plotnost-vyazkost-teploemkost-entropiya> (дата обращения: 02.07.2021).
139. Филоненко, Г. К. Сушка пищевых растительных материалов: учеб. пособие для технол. специальностей вузов пищевой пром-сти / Г. К. Филоненко, М. А. Гришин, Я. М. Гольденберг, В. К. Коссек. – М.: Пищевая промышленность, 1971. – 439 с.
140. Хатко, З. Н. Исследование антибактериальной активности пектиновых растворов по отношению к клиническим штаммам микроорганизмов / З. Н. Хатко, А. А. Ашинова, Н. С. Хиштова, О. Н. Стенина // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК - продукты здорового питания». – 2017. – №1(15). – С. 105-109.
141. Хатко, З. Н. О структуре биоразлагаемых пектиносодержащих пленочных композиций / З. Н. Хатко, С. Т. Беретарь, А. А. Ашинова // Инновационное развитие пищевой, легкой промышленности и индустрии гостеприимства: материалы Международной научно-практической конференции (29-30 окт.). Алматы, 2015. – С. 228-230.

142. Хатко, З. Н. Пектиносодержащие пленочные структуры: монография / З. Н. Хатко, А. А. Ашинова. – Майкоп: Изд-во МГТУ, 2019. – 110 с.
143. Хатко, З. Н. Развитие научно-практических основ технологии высокоочищенного свежесваренного пектина полифункционального назначения и пектиносодержащих композиций: специальность 05.18.15 «Технология и товароведение пищевых продуктов функционального и специализированного назначения и общественного питания», 05.18.12 «Процессы и аппараты пищевых производств» : дис. ... д-ра техн. наук / З. Н. Хатко ; Майкопский государственный технологический университет. – Майкоп, 2013. – 356 с.
144. Хорбенко, И. Г. Ультразвук в действии / И. Г. Хорбенко // – М.: Знание, 1965. – 488с.
145. Шевцов, С. А. Техника и технология сушки пищевого растительного сырья: монография / С. А. Шевцов, А. Н. Остриков. – Воронеж: ВГУИТ, 2014. – 288 с.
146. Шестаков, С. Д. Технология и оборудование для обработки пищевых сред с использованием кавитационной дезинтеграции // С. Д. Шестаков, О. Н. Красуля, В. И. Богуш, И. Ю. Потороко. – М.: Изд-во ГИОРД, 2013. – 152 с.
147. Шестаков, С.Д. Ультразвуковая обработка молочных систем для улучшения их свойств / С. Д. Шестаков, О. Н. Красуля, Р. Ринк, М. Ашоккумар // Техническая акустика : электрон. журн. – 2013. – Вып. 3 7. – URL: <http://www.ejta.org>. – Дата публикации: 04 сент. 2013.
148. Электроактивированная вода : сайт. – URL: <https://odnoparties.ru/848> (Дата обращения: 17.05.2021).
149. Ashokkumar, M. A new look at cavitation and the applications of its liquid-phase effects in the processing of food and fuel / M. Ashokkumar. O. Krasulya. S. Sheshtakov. R. Rink // Applied Physics Research. 2012. Vol. 4. № 1. P. 19.
150. Azeredo, H. Nanocomposite edible films from mango puree reinforced with cellulose nanofibers / H. Azeredo, L. Mattoso, D. Wood, T. Williams, R. Avenabustillos, T. Mchugh // Journal Food Science. 2009. Vol. 74, № 5. pp. 31-35.
151. Baldwin, E. Edible Coatings and Films to Improve Food Quality / E. Baldwin, R.

- Hagenmaier, J. Bie. 2011. Boca Raton: CRS Press. 460 p.
152. Bhattacharya, T. Techniques of preparing edible protein films (a review) / T. Bhattacharya // *Assian Journal of Science and Technology*. 2013. Vol. 1, № 07. pp. 415-448.
 153. Bird R. Byron Transport Phenomena / R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot. – John Wiley & Sons, Inc. 2006. 905 p.
 154. Bourtoom, T. Edible films and coatings: characteristics and properties / T. Bourtoom // *International Food Research Journal*. 2008. Vol. 15, №. 3. pp. 1-12.
 155. Brown. Z. K. Drying of agar gels using supercritical carbon dioxide / Z. K. Brown, P. J. Fryer, I. T. Norton, R. H. Bridson // *Journal of Supercritical Fluids*. 2010. Vol. 54, №1. pp. 89-95.
 156. Couper, R. James Chemical Process Equipment: Selection and Design / James R. Couper, W. Roy Penney, James R. Fair, Stanley M. Walas // Gulf Professional Publishing. 2005. 840 p.
 157. Danganan, K. Structure and Function of Protein-Based Edible Films and Coatings / K. Danganan, P. M. Tomasula, P. Qi // *Edible Films and Coatings for Food Applications*. New-York: Springer, 2009. Ch. 2. pp. 25-52.
 158. De la Torre, P. M. Interpolymer complexes of poly (acrylic acid) and chitosan: influence of the ionic hydrogel-forming medium / P. M. De la Torre, S. Torrado, S. Torrado // *Biomaterials*. 2003. Vol. 24, №8. pp. 1459-1468.
 159. Dhanapal, A. Edible films from Polysaccharides / A. Dhanapal, P. Sasikala, L. Rajamani, V. Kavitha, G. Yazhini, M. Shakila Banu // *Food Science and Quality Management*. 2012. Vol. 3. pp. 9-18.
 160. Donhowe, G. Edible films and coatings: characteristics, formation, definitions, and testing methods / G. Donhowe, O. Fennema // *Edible Coatings and Films to Improve Food Quality*. Ed. By Krochta J., Baldwin E., Nisperos-Carriedo M. CRC Press: Boca-Raton, 1994, pp. 1-23.
 161. Duen, J. Edible coatings and films and their application on frozen foods / J. duen, Y. Zhao // *Handbook of Frozen Food Processing and Packaging*. Ed. By De-Wen Sun. CRS Press, 2011. pp. 875-892.

162. Fadina, A. L. Mechanical properties and water permeability of hydrolysed collagen-cocoa butter edible films plasticized with sucrose / A. L. Fadina, F.S. Rocha, I. D. Alvim, M. S. Sadahira, M. Queiroz, R.M.V. Alves, L.B. Silva // *Food Hydrocolloids*. 2013. Vol. 30, № 2. pp. 625-631.
163. Falguera, V. Edible films and coatings: structures, active functions and trends in their use / V. Falguera, J. P. Quintero Cerón, A. Jiménez, A. Muñoz, A. Ibarz // *Trends in Food Science and Technology*. 2011. Vol. 22, № 6. pp. 292-303.
164. Frinnault, A. Preparation of casein films by a modified wet spinning process / A. Frinnault, D. J. Gallant, Brigitte Bouchet, J. P. Dumont // *Journal of Food Science*. 1997. Vol. 62, № 4. pp. 744-747.
165. García-González, C. A. Polysaccharide-based aerogels - Promising biodegradable carriers for drug delivery systems / C. A. García-González, M. Alnaief, I. Smirnova // *Carbohydrate Polymers*. 2011. Vol. 86, №4. pp. 1425-1438.
166. Gavin, T. Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design / G. Towler, R. Sinnott // Butterworth-Heinemann. 2012. 1320 p.
167. Han, J. H. A Review of Food Packaging Technologies and Innovations / J. H. Han // *Innovations in Food Packaging*. Academic Press, 2014. Ch. 1. pp. 3-12.
168. Han, J. H. Edible films and coating: a review / J. H. Han // *Innovations in Food Packaging* / Ed. J.H. Han. Academic Press, 2014. Ch. 3. pp. 214-257.
169. Heo, Y. Self-healing polyurethanes with shape recovery / Y. Heo, H. A. Sodano // *Advanced Functional Materials*. 2014. Vol. 24, №.33. pp. 5261-5268.
170. Hua F., Lvov Y. The New Frontiers of Organic and Composite Nanotechnology / F. Hua, Y. Lvov/ Wiley-VCH. 2008. pp. 123-146.
171. *Hydrocolloids in Food Processing*. – Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2010. 360 p.
172. Janjarasskul, T. Edible Packaging Materials / T. Janjarasskul, J.M. Krochta // *Annual Review of Food Science and Technology*. 2010. Vol. 1. pp. 415-448.
173. Kaya, S. Microwave drying effect on properties of whey protein isolate edible films / S. Kaya, A. Kaya // *Journal of Food Engineering*. 2000. Vol. 43, № 2. pp. 91-92.

174. Kenijz, N. V. Pectic substances and their functional role in bread-making from frozen semi-finished products / N. V. Kenijz, N. V. Sokol // European Online Journal of Natural and Social Sciences. 2013. Vol. 2, № 2. pp. 253-256.
175. Kester, J. Edible films and Coating: a review / J. Kester, O. Fennema // Food Technol. 1986. Vol. 48, № 12. pp. 47-59.
176. Kudra, T. Advanced Drying Technologies / Kudra Tadeusz, Mujumdar S. Arun // Boca Raton. 2009. 438 p.
177. Kunz, T. Pectin-A natural plant derived alternative fining agent for the brewing process / T. Kunz //Trend in Brewing, Belgium. 2014. pp. 147-156.
178. Melvin, A. The Application of edible polymeric films and coatings in the food industry / A. Melvin, S. Lin // Journal of Food Processing & Technology. 2013. Vol. 4. pp. 115-116.
179. Monteiro, H. Edible coatings / H. Monteiro, C. Azeredo // Advances in Fruit Processing Technologies. Ed. by S. Rodrigues, F. Fernandes. Boca-Raton: CRC Press, 2012. pp. 345-356.
180. Mu, C. Preparation and Properties of dialdehyde carboxymethyl cellulose crosslinked gelatine edible films / C. Mu, J. Guo, X. Li, W. Lin, D. Li // Food Hydrocolloids. 2012. Vol. 27, № 1. pp. 22-27.
181. Mujumdar, Arun S. Handbook of Industrial Drying / Arun S. Mujumdar // Taylor & Francis Group. 2014. 1348 p.
182. Pavlath, A. E. Edible films and coatings: why, what, and how? / A. E. Pavlath, W. Orts // Edible Films and Coatings for Food Applications. New-York: Springer, 2009. Ch. 1. pp. 1-23.
183. Portal Embrapa : сайт. – URL: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/2411923/scientists-create-edible-packaging-films> (датаобращения: 03.04.2021).
184. Poverenov, E. Layer-by-layer electrostatic deposition of edible coating on fresh cut melon model: anticipated and unexpected effects of alginate-chitosan combination / E. Poverenov, S. Danino, B. Horev, R. Granit, Y. Vinokur, V. Rodov // Food and Bioprocess Technology. 2014. Vol. 7. pp. 1424-1432.

185. Qin, X. Gelation behavior of cellulose in NaOH/urea aqueous system via cross-linking / X. Qin, A. Lu, L. Zhang // *Cellulose*. 2013. Vol. 20, № 4. P. 1669.
186. Rahman, M.S. *Handbook of Food Preservation*. / M. S. Rahman. Boca Raton: CRCPress, 2007. 524 p.
187. Raybaudi-Massilia, R. *Combinational Edible Antimicrobial Films and Coatings* / R. Raybaudi-Massilia, J. Mosqueda-Melgar, R. Soliva-Fortuny, O. Martin-Belloso. *Antimicrobial Food Packaging*. Academic Press, 2016. pp. 633-646.
188. Raybaudi-Massilia, R. *Combinational Edible Antimicrobial Films and Coatings* / R. Raybaudi-Massilia, J. M.-M. Alimentos, R. Soliva-Fortuny, O. Martin-Belloso // *Antimicrobial Food Packaging*. Academic Press, 2016. pp. 633-646.
189. Rosa, J. T. *Hilgardia*. 1948. Vol. 3. №15.
190. Rossman, J. *Commercial Manufacture of Edible films* / J. Rossman // *Innovations in Food Packaging*. Academic Press, 2014. Ch. 13. pp. 367-391.
191. Sazhin, B.S. *Scientific Principles of Drying Technology* / B.S. Sazhin, V.B. Sazhin. New York: Begell House. 2007. 509 p.
192. Smith, R. *Chemical process Design and Integration* / R. Smith // John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southe Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England 2005. 687 p.
193. Soares, Antônio *Physical and sensory characterization of edible coatings applied to minimally processed persimmon* / A. G. Soares, A. C. V.Neves Jr, R. C.Cavestré, M. J. de Oliveira Fonseca, A. F. Martkiano de Miranda // *Acta horticulturae*. 2012. Vol. 934. pp. 537.
194. Suput, D. *Edible films and coatings – sources, properties and application* / D. Suput, V. Lazic, S. Popović, N. Hromis // *Food and Feed Research*. 2015. Vol. 42, № 1. pp. 11-22.
195. Tharanathan, R. *Biodegradable films and coatings: past, present and future* / R. Tharanathan // *Trends in Food Science and Technology*. 2003. Vol. 13, № 3. pp. 71-78.

Приложение А

(справочное)

Объекты интеллектуальной собственности



Рисунок А. 1 – Программа расчета гигроскопических параметров пищевой продукции и их термодинамический анализ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 204304

УСТРОЙСТВО ДЛЯ СУШКИ ЯГОДНОГО ПЮРЕ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный технический университет, ФГБОУ ВО «АГТУ» (RU)*

Авторы: *Нугманов Альберт Хамед-Харисович (RU), Алексанян Игорь Юрьевич (RU), Титова Любовь Михайловна (RU), Айсунгулов Ноха Джабраилович (RU), Лебедев Виктор Александрович (RU), Мещерякова Галина Сергеевна (RU)*

Заявка № 2021103682

Приоритет полезной модели 15 февраля 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 19 мая 2021 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 15 февраля 2031 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ибрагимов



Рисунок А. 2 – Устройство для сушки ягодного пюре

Приложение Б

(обязательное)

Акты использования результатов диссертационной работы

Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие «ИнфоПрод» ИНН: 3023004409, КПП: 302301001, ОГРН: 1123023002079, ОКПО: 09099856 414006, г. Астрахань, переулок Бакинский, д. 52. р/с 40702810005000002265, Отделение N8625 ПАО Сбербанк г.Астрахань, к/с 30101810500000000602, БИК 041203602. Тел.: 8(8512)480477	УТВЕРЖДАЮ  Коптеева А.М. «22» ноября 2021г. М.П.
---	---

**АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ
НАУК**

соискателя кафедры «Технологические машины и оборудование»
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Астраханский государственный технический
университет» (ФГБОУ ВО «АГТУ»)
Мещеряковой Галины Сергеевны

Результаты научно-исследовательской работы Мещеряковой Галины Сергеевны, выполненные в рамках диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, посвященной совершенствованию процессов в технологии пектиносодержащего полимерного покрытия из арбузного сырья используются на ООО НПП «ИнфоПрод». Компанией приняты результаты диссертационного исследования, которые в дальнейшем будут использованы при налаживании производства полимерного покрытия.

Основные выводы и рекомендации будут учтены при организации научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы на предприятии.

Объекты внедрения:

- Программа расчета гигроскопических параметров пищевой продукции и их термодинамический анализ (свидетельство на программу для ЭВМ2021611624);
- Конструкция устройства для сушки ягодного пюре (патент на полезную модель 204304 РФ).

 / Мещерякова Г.С. «22» 11 2021 г.	Инженер-технолог:  / Коптеева А.М. «22» 11 2021 г.
---	---

Рисунок Б.1 – Акт использования материалов диссертационной работы Мещеряковой Галины Сергеевны в деятельности ООО НПП «ИнфоПрод»

**Общество с ограниченной ответственностью
научно-производственное предприятие
"БиоПолимер"**

ИНН 3023004864, КПП 302301001, ОГРН 1133023000296

Юр. адрес: 414006, г. Астрахань, пер. Бакинский д. 52.



/Никилина М. А.

«23» ноября 2021г.
М. П.

**АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**
соискателя кафедры «Технологические машины и оборудование»

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Астраханский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «АГТУ»)

Мещеряковой Галины Сергеевны

Настоящим актом подтверждаем, что результаты научных исследований Мещеряковой Галины Сергеевны, выполненных в рамках диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук, посвященной совершенствованию процессов в технологии пектиносодержащего полимерного покрытия из арбузного сырья приняты к использованию на предприятии ООО НПП «БиоПолимер».

Результаты исследований Мещеряковой Галины Сергеевны актуальны, представляют практический интерес для возможного внедрения на предприятиях, осуществляющих свою деятельность по переработке овощей и ягод.

 / Мещерякова Г.С.

«23» ноября 2021 г.

Заместитель директора

 / Никилина М. А.

«23» ноября 2021 г.

**Рисунок Б.2 – Акт использования материалов диссертационной работы
Мещеряковой Галины Сергеевны в деятельности ООО НПП «БиоПолимер»**

Приложение В**(обязательное)**

Результаты дисперсного анализа измельченной корки арбуза

Первый размерный ряд						Итого
Размер, мм.	2,88	2,5	3	2,89	2,93	
Количество частиц, шт.	18	19	18	19	21	95
Второй размерный ряд						Итого
Размер, мм.	3,98	3,75	4,32	3,62	3,88	
Количество частиц, шт.	8	9	10	9	12	48
Третий размерный ряд						Итого
Размер, мм.	5,86	4,8	5,36	4,79	5,84	
Количество частиц, шт.	4	5	4	7	5	25
Четвертый размерный ряд						Итого
Размер, мм.	3,58	3,24	3,16	3,15	3,12	
Количество частиц, шт.	7	9	8	9	10	43
Общее количество исследуемых измельченных частиц						211

Расчет относительной ошибки

$d_{\text{хар}1}$	$d_{\text{хар}2}$	$d_{\text{хар}3}$	$d_{\text{хар}4}$	$d_{\text{хар}5}$	x	$dx1$	$dx2$	$dx3$	$dx4$	$dx5$	S_n	S_x	E_x
2,88	2,5	3	2,89	2,93	2,84	0,04	-0,34	0,16	0,05	0,09	0,19583	0,08758	8,54199
3,98	3,75	4,32	3,62	3,88	3,91	0,07	-0,16	0,41	-0,29	-0,03	0,26627	0,11908	8,43609
5,86	4,8	5,36	4,79	5,84	5,33	0,53	-0,53	0,03	-0,54	0,51	0,52783	0,23605	12,26756
3,58	3,24	3,16	3,15	3,12	3,25	0,33	-0,01	-0,09	-0,1	-0,13	0,18974	0,08485	7,23207

Приложение Г

(обязательное)

Результаты экспериментов по построению градуировочного графика, где на оси абсцисс откладывается индекс рефракции

C, %	n1	n2	n3	n4	n5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
0,88	1,3388	1,3353	1,3439	1,3421	1,3099	1,334	0,0048	0,0013	0,0099	0,0081	-0,0241	0,01387	0,0062	1,28771
1,33	1,3481	1,3407	1,314	1,3554	1,3143	1,3345	0,0136	0,0062	-0,0205	0,0209	-0,0202	0,01929	0,00863	1,79069
2,58	1,3252	1,3616	1,3481	1,3285	1,3216	1,337	-0,0118	0,0246	0,0111	-0,0085	-0,0154	0,01715	0,00767	1,58937
4,22	1,3425	1,3136	1,3432	1,3424	1,3508	1,3385	0,004	-0,0249	0,0047	0,0039	0,0123	0,01436	0,00642	1,32883
5,55	1,3416	1,3569	1,317	1,3656	1,3189	1,34	0,0016	0,0169	-0,023	0,0256	-0,0211	0,0219	0,00979	2,02421
6,25	1,3373	1,344	1,3144	1,3593	1,3475	1,3405	-0,0032	0,0035	-0,0261	0,0188	0,007	0,01663	0,00744	1,53675
7,04	1,3358	1,3331	1,3339	1,3607	1,344	1,3415	-0,0057	-0,0084	-0,0076	0,0192	0,0025	0,01157	0,00518	1,06865
8,12	1,3693	1,3364	1,3267	1,3468	1,3408	1,344	0,0253	-0,0076	-0,0173	0,0028	-0,0032	0,01593	0,00712	1,4684
9,63	1,3681	1,3481	1,3198	1,3626	1,3339	1,3465	0,0216	0,0016	-0,0267	0,0161	-0,0126	0,02	0,00894	1,83999

Приложение Д

(обязательное)

Результаты экспериментов по построению градуировочного графика по шкале сахарозы

C, %	C1	C2	C3	C4	C5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
0,88	0,5	0,7	0,5	0,5	0,8	0,6	-0,1	0,1	-0,1	-0,1	0,2	0,14142	0,06325	29,19836
1,33	1,1	1,3	1,1	1,3	1,2	1,2	-0,1	0,1	-0,1	0,1	0	0,1	0,04472	10,32318
2,58	2,2	2,2	2,4	2,2	2,5	2,3	-0,1	-0,1	0,1	-0,1	0,2	0,14142	0,06325	7,61696
4,22	3,7	3,9	3,7	3,9	3,8	3,8	-0,1	0,1	-0,1	0,1	0	0,1	0,04472	3,25995
5,55	4,5	4,7	4,5	4,5	4,8	4,6	-0,1	0,1	-0,1	-0,1	0,2	0,14142	0,06325	3,80848
6,25	5	5	5,2	5	5,3	5,1	-0,1	-0,1	0,1	-0,1	0,2	0,14142	0,06325	3,4351
7,04	6,1	5,9	5,9	6,1	6	6	0,1	-0,1	-0,1	0,1	0	0,1	0,04472	2,06464
8,12	7,3	7,3	7,5	7,3	7,6	7,4	-0,1	-0,1	0,1	-0,1	0,2	0,14142	0,06325	2,36743
9,63	9,2	9,5	9,2	9,2	9,4	9,3	-0,1	0,2	-0,1	-0,1	0,1	0,14142	0,06325	1,88377

Приложение Е

(обязательное)

Результат проведенных исследований по выявлению рационального массового соотношения между растворителем и растительным сырьем

№	n1	n2	n3	n4	n5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
1	1,3147	1,3434	1,3383	1,354	1,3256	1,3352	-0,0205	0,0082	0,0031	0,0188	-0,0096	0,01535	0,00687	1,42431
2	1,3165	1,3543	1,3219	1,3437	1,3381	1,3349	-0,0184	0,0194	-0,013	0,0088	0,0032	0,01559	0,00697	1,4463
3	1,3194	1,3596	1,331	1,3213	1,3402	1,3343	-0,0149	0,0253	-0,0033	-0,013	0,0059	0,01641	0,00734	1,52328
4	1,3253	1,3179	1,3586	1,3186	1,3496	1,334	-0,0087	-0,0161	0,0246	-0,0154	0,0156	0,01885	0,00843	1,75002
5	1,3097	1,3386	1,3594	1,3214	1,3404	1,3339	-0,0242	0,0047	0,0255	-0,0125	0,0065	0,01908	0,00853	1,77212
6	1,3594	1,3174	1,3417	1,3365	1,314	1,3338	0,0256	-0,0164	0,0079	0,0027	-0,0198	0,01861	0,00832	1,72888
7	1,3237	1,351	1,3137	1,3553	1,3248	1,3337	-0,01	0,0173	-0,02	0,0216	-0,0089	0,01834	0,0082	1,70325
8	1,3083	1,3426	1,3491	1,3263	1,3412	1,3335	-0,0252	0,0091	0,0156	-0,0072	0,0077	0,01637	0,00732	1,52103
9	1,3188	1,3585	1,3106	1,3426	1,336	1,3333	-0,0145	0,0252	-0,0227	0,0093	0,0027	0,01907	0,00853	1,77163
10	1,3395	1,3254	1,3173	1,3429	1,3409	1,3332	0,0063	-0,0078	-0,0159	0,0097	0,0077	0,01126	0,00503	1,04581

Приложение Ж

(обязательное)

Экспериментальные исследования кинетики процесса экстракции

Вариант 1

τ	C1	C2	C3	C4	C5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
0,33	0,45	0,43	0,43	0,43	0,46	0,44	0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,02	0,01414	0,00632	3,9816
0,67	0,61	0,59	0,61	0,59	0,6	0,6	0,01	-0,01	0,01	-0,01	0	0,01	0,00447	2,06464
1	0,69	0,71	0,69	0,71	0,7	0,7	-0,01	0,01	-0,01	0,01	0	0,01	0,00447	1,76969
1,5	0,8	0,82	0,8	0,82	0,81	0,81	-0,01	0,01	-0,01	0,01	0	0,01	0,00447	1,52936
2	0,87	0,85	0,87	0,85	0,86	0,86	0,01	-0,01	0,01	-0,01	0	0,01	0,00447	1,44044
3	0,96	0,98	0,96	0,96	0,99	0,97	-0,01	0,01	-0,01	-0,01	0,02	0,01414	0,00632	1,80608
4	1,01	1,03	1,04	1	1,02	1,02	-0,01	0,01	0,02	-0,02	0	0,01581	0,00707	1,92028
10	1,05	1,06	1,09	1,08	1,07	1,07	-0,02	-0,01	0,02	0,01	0	0,01581	0,00707	1,83055

Вариант 2

τ	C1	C2	C3	C4	C5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
0,33	0,48	0,48	0,5	0,5	0,49	0,49	-0,01	-0,01	0,01	0,01	0	0,01	0,00447	2,52813
0,67	0,64	0,64	0,66	0,66	0,65	0,65	-0,01	-0,01	0,01	0,01	0	0,01	0,00447	1,90582
1	0,75	0,77	0,75	0,75	0,78	0,76	-0,01	0,01	-0,01	-0,01	0,02	0,01414	0,00632	2,30513
1,5	0,85	0,85	0,87	0,85	0,88	0,86	-0,01	-0,01	0,01	-0,01	0,02	0,01414	0,00632	2,0371
2	0,98	0,96	0,96	0,96	0,99	0,97	0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,02	0,01414	0,00632	1,80608
3	1,08	1,05	1,06	1,08	1,08	1,07	0,01	-0,02	-0,01	0,01	0,01	0,01414	0,00632	1,63729
4	1,13	1,14	1,17	1,14	1,17	1,15	-0,02	-0,01	0,02	-0,01	0,02	0,01871	0,00837	2,01526
10	1,27	1,31	1,27	1,3	1,3	1,29	-0,02	0,02	-0,02	0,01	0,01	0,01871	0,00837	1,79655

Вариант 3

τ	C1	C2	C3	C4	C5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
0,17	0,53	0,55	0,55	0,53	0,54	0,54	-0,01	0,01	0,01	-0,01	0	0,01	0,00447	2,29404
0,33	0,75	0,77	0,75	0,75	0,78	0,76	-0,01	0,01	-0,01	-0,01	0,02	0,01414	0,00632	2,30513
0,67	0,87	0,87	0,85	0,85	0,86	0,86	0,01	0,01	-0,01	-0,01	0	0,01	0,00447	1,44044
1	0,91	0,94	0,93	0,91	0,91	0,92	-0,01	0,02	0,01	-0,01	-0,01	0,01414	0,00632	1,90424
1,33	0,96	0,98	0,96	0,98	0,97	0,97	-0,01	0,01	-0,01	0,01	0	0,01	0,00447	1,27709
1,67	1,04	1,01	1,01	1,04	1	1,02	0,02	-0,01	-0,01	0,02	-0,02	0,01871	0,00837	2,27211
2	1,08	1,08	1,06	1,08	1,05	1,07	0,01	0,01	-0,01	0,01	-0,02	0,01414	0,00632	1,63729
4	1,14	1,17	1,16	1,14	1,14	1,15	-0,01	0,02	0,01	-0,01	-0,01	0,01414	0,00632	1,52339

Вариант 4

τ	C1	C2	C3	C4	C5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
0,17	0,61	0,59	0,61	0,59	0,6	0,6	0,01	-0,01	0,01	-0,01	0	0,01	0,00447	2,06464
0,33	0,8	0,8	0,82	0,8	0,83	0,81	-0,01	-0,01	0,01	-0,01	0,02	0,01414	0,00632	2,16284
0,67	0,93	0,91	0,91	0,94	0,91	0,92	0,01	-0,01	-0,01	0,02	-0,01	0,01414	0,00632	1,90424
1	0,96	0,99	0,98	0,95	0,97	0,97	-0,01	0,02	0,01	-0,02	0	0,01581	0,00707	2,01926
1,33	1,06	1,06	1,06	1,09	1,08	1,07	-0,01	-0,01	-0,01	0,02	0,01	0,01414	0,00632	1,63729
1,67	1,14	1,14	1,16	1,16	1,15	1,15	-0,01	-0,01	0,01	0,01	0	0,01	0,00447	1,0772
2	1,21	1,25	1,22	1,24	1,23	1,23	-0,02	0,02	-0,01	0,01	0	0,01581	0,00707	1,59243
4	1,31	1,28	1,28	1,27	1,31	1,29	0,02	-0,01	-0,01	-0,02	0,02	0,01871	0,00837	1,79655

Приложение И**(обязательное)**

Результаты экспериментальных исследований по выявлению допустимого общего содержания добавок в пектиновый
экстракт

K1	K2	K3	K4	K5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
9,2	9,1	9,1	8,6	9	9	0,2	0,1	0,1	-0,4	0	0,23452	0,10488	3,228

Приложение К**(обязательное)**

Результаты экспериментальных исследований по определению плотностных характеристик жидкого полуфабриката и
конечного пленочного продукта

№	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
1	1031	1030	1027	1027	1025	1028	3	2	-1	-1	-3	2,44949	1,09545	0,29517
2	651	653	655	651	650	652	-1	1	3	-1	-2	2	0,89443	0,37999

Приложение Л

(обязательное)

Результаты экспериментальных исследований по определению теплофизических характеристик объекта исследования

ТФХ	C1	C2	C3	C4	C5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
C	3489	3387	3403	3416	3500	3439	50	-52	-36	-23	61	51,8411	23,18405	1,8674

ТФХ	a1	a2	a3	a4	a5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
$a \cdot 10^8$	11,81	11,46	11,73	11,45	11,5	11,59	0,22	-0,13	0,14	-0,14	-0,09	0,16778	0,07503	1,79329

ТФХ	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
λ	0,4	0,42	0,4	0,4	0,43	0,41	-0,01	0,01	-0,01	-0,01	0,02	0,01414	0,00632	4,27293

Приложение М
(обязательное)

Результаты экспериментальных исследований по определению теплоемкости объекта исследования при различных
влажностях

W	C1	C2	C3	C4	C5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
80	3448	3326	3354	3430	3407	3393	55	-67	-39	37	14	51,47815	23,02173	1,87946
70	3285	3165	3198	3207	3270	3225	60	-60	-27	-18	45	50,69024	22,66936	1,9471
60	3194	3128	3115	3135	3113	3137	57	-9	-22	-2	-24	33,14363	14,82228	1,30882
50	3159	3089	3132	3120	3065	3113	46	-24	19	7	-48	36,76275	16,4408	1,46293

Приложение Н**(обязательное)**

Результаты постановочного эксперимента по определению максимальной скорости сушильного агента

v_1	v_2	Y_3	v_4	v_5	x	dx_1	dx_2	dx_3	dx_4	dx_5	S_n	S_x	E_x
2,6	2,8	2,6	2,8	2,7	2,7	-0,1	0,1	-0,1	0,1	0	0,1	0,04472	4,58808

Приложение П

(обязательное)

Экспериментальное изучение гигроскопических свойств объекта исследования

При температуре 323 К

Aw	Wp1	Wp2	Wp3	Wp4	Wp5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,05	6,83	6,98	7,04	6,81	7,04	6,94	-0,11	0,04	0,1	-0,13	0,1	0,11247	0,0503	2,00762
0,09	9,13	9,17	9,25	9,33	9,27	9,23	-0,1	-0,06	0,02	0,1	0,04	0,08	0,03578	1,0737
0,16	11,66	11,7	11,46	11,84	11,74	11,68	-0,02	0,02	-0,22	0,16	0,06	0,14	0,06261	1,48484
0,25	14,66	14,57	14,48	14,48	14,26	14,49	0,17	0,08	-0,01	-0,01	-0,23	0,14866	0,06648	1,27093
0,35	19,34	19,41	19,54	19,51	19,2	19,4	-0,06	0,01	0,14	0,11	-0,2	0,1373	0,0614	0,8767
0,45	23,52	22,89	23,46	23,23	22,8	23,18	0,34	-0,29	0,28	0,05	-0,38	0,32596	0,14577	1,74199
0,55	27,43	27,6	26,87	26,77	27,58	27,25	0,18	0,35	-0,38	-0,48	0,33	0,39956	0,17869	1,81641
0,65	31,56	30,86	31,84	31,06	31,68	31,4	0,16	-0,54	0,44	-0,34	0,28	0,41976	0,18772	1,65603
0,75	36,96	36,37	37,14	36,88	36,15	36,7	0,26	-0,33	0,44	0,18	-0,55	0,41982	0,18775	1,41708
0,82	38,8	38,43	38,81	39,24	39,32	38,92	-0,12	-0,49	-0,11	0,32	0,4	0,36366	0,16263	1,1575
0,88	43,28	42,34	42,81	42,27	42,6	42,66	0,62	-0,32	0,15	-0,39	-0,06	0,40774	0,18235	1,18401
0,92	46,84	47,71	47,86	47,82	46,87	47,42	-0,58	0,29	0,44	0,4	-0,55	0,5188	0,23201	1,35528
0,95	50,24	51,55	50,35	50,42	50,39	50,59	-0,35	0,96	-0,24	-0,17	-0,2	0,54097	0,24193	1,32466
0,98	52,17	52,51	51,89	51,91	51,12	51,92	0,25	0,59	-0,03	-0,01	-0,8	0,51274	0,2293	1,22336
1	53,64	54,23	52,83	52,84	53,81	53,47	0,17	0,76	-0,64	-0,63	0,34	0,61818	0,27646	1,43219

При температуре 298 К

Aw	Wp1	Wp2	Wp3	Wp4	Wp5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,05	8,14	7,92	7,93	8,11	8,15	8,05	0,09	-0,13	-0,12	0,06	0,1	0,11511	0,05148	1,77136
0,09	11,22	11,15	10,89	11,13	11,16	11,11	0,11	0,04	-0,22	0,02	0,05	0,12748	0,05701	1,42137
0,16	13,76	13,93	14,09	13,97	14,15	13,98	-0,22	-0,05	0,11	-0,01	0,17	0,15166	0,06782	1,34385
0,25	17,47	17,38	17,81	17,42	17,57	17,53	-0,06	-0,15	0,28	-0,11	0,04	0,1719	0,07688	1,21476
0,35	21,64	21,52	21,7	21,26	21,73	21,57	0,07	-0,05	0,13	-0,31	0,16	0,19105	0,08544	1,09721
0,45	25,37	25,7	25,85	25,62	25,36	25,58	-0,21	0,12	0,27	0,04	-0,22	0,21296	0,09524	1,03129
0,55	30,48	30,14	30,67	30,78	30,08	30,43	0,05	-0,29	0,24	0,35	-0,35	0,31193	0,1395	1,26984
0,65	34,99	35,6	34,45	34,87	34,89	34,96	0,03	0,64	-0,51	-0,09	-0,07	0,4134	0,18488	1,46485
0,75	41,62	41,35	41,04	41,2	40,69	41,18	0,44	0,17	-0,14	0,02	-0,49	0,34735	0,15534	1,04489
0,82	43,62	43,41	44	43,47	43,8	43,66	-0,04	-0,25	0,34	-0,19	0,14	0,24259	0,10849	0,68831
0,88	48,03	47,55	48,53	47,7	48,44	48,05	-0,02	-0,5	0,48	-0,35	0,39	0,43457	0,19435	1,12037
0,92	53,49	52,76	52,89	53,69	53,92	53,35	0,14	-0,59	-0,46	0,34	0,57	0,50493	0,22581	1,17243
0,95	55,93	57,44	56,85	56,75	57,98	56,99	-1,06	0,45	-0,14	-0,24	0,99	0,77191	0,34521	1,67789
0,98	57,65	57,96	59,3	57,6	58,59	58,22	-0,57	-0,26	1,08	-0,62	0,37	0,72114	0,32251	1,53442
1	59,57	59,61	60,67	59,5	59,65	59,8	-0,23	-0,19	0,87	-0,3	-0,15	0,48949	0,21891	1,014

Приложение Р

(обязательное)

Результаты экспериментальных исследований конвективной сушки объекта исследования

При $T_{\text{BM}} = 30^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{c.a.}} = 100^{\circ}\text{C}$; $v_{\text{c.a.}} = 2,5 \text{ м/с.}$; $h_{\text{BM}} = 0,001$.

τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
7343	7175	7074	7336	7072	7200	143	-25	-126	136	-128	134,0056	59,92912	2,30561

При $T_{\text{BM}} = 30^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{c.a.}} = 100^{\circ}\text{C}$; $v_{\text{c.a.}} = 2,5 \text{ м/с.}$; $h_{\text{BM}} = 0,002$.

τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
9192	9341	9407	9385	9175	9300	-108	41	107	85	-125	109,1375	48,80779	1,45374

При $T_{\text{BM}} = 30^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{c.a.}} = 100^{\circ}\text{C}$; $v_{\text{c.a.}} = 2,5 \text{ м/с.}$; $h_{\text{BM}} = 0,003$.

τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
11699	11518	11775	11847	11661	11700	-1	-182	75	147	-39	124,3785	55,62374	1,3169

При $T_{\text{BM}} = 40^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{c.a.}} = 100^{\circ}\text{C}$; $v_{\text{c.a.}} = 2,5 \text{ м/с.}$; $h_{\text{BM}} = 0,001$.

τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
6688	6545	6633	6476	6658	6600	88	-55	33	-124	58	87,46142	39,11394	1,6416

При $T_{\text{BM}} = 40^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{c.a.}} = 100^{\circ}\text{C}$; $v_{\text{c.a.}} = 2,5 \text{ м/с.}$; $h_{\text{BM}} = 0,002$.

τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
8725	8568	8777	8678	8752	8700	25	-132	77	-22	52	82,41056	36,85512	1,17343

При $T_{\text{BM}} = 40^\circ\text{C}$; $T_{\text{c.a.}} = 100^\circ\text{C}$; $v_{\text{c.a.}} = 2,5 \text{ м/с.}$; $h_{\text{BM}} = 0,003$.

τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
11059	11268	11038	11044	11091	11100	-41	168	-62	-56	-9	96,13272	42,99186	1,07286

При $T_{\text{BM}} = 50^\circ\text{C}$; $T_{\text{c.a.}} = 100^\circ\text{C}$; $v_{\text{c.a.}} = 2,5 \text{ м/с.}$; $h_{\text{BM}} = 0,001$.

τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
6389	6211	6196	6425	6279	6300	89	-89	-104	125	-21	103,3489	46,21904	2,03217

При $T_{\text{BM}} = 50^\circ\text{C}$; $T_{\text{c.a.}} = 100^\circ\text{C}$; $v_{\text{c.a.}} = 2,5 \text{ м/с.}$; $h_{\text{BM}} = 0,002$.

τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
8315	8431	8471	8337	8446	8400	-85	31	71	-63	46	69,48381	31,0741	1,02471

При $T_{\text{BM}} = 50^\circ\text{C}$; $T_{\text{c.a.}} = 100^\circ\text{C}$; $v_{\text{c.a.}} = 2,5 \text{ м/с.}$; $h_{\text{BM}} = 0,003$.

τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	x	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	Sn	Sx	Ex
10343	10496	10511	10707	10443	10500	-157	-4	11	207	-57	133,1203	59,53318	1,57054

Приложение С

(обязательное)

Скриншот работы программы Mathcad Professional по построению эволюции полей температур по толщине и концентрации, для слоя 1 мм, высушиваемого арбузного полуфабриката с конечной толщиной 0,35 мм.

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР
с использованием метода конечных разностей по неявной схеме

ОБЪЕКТ СУШКИ: Конвективная сушка арбузного полуфабриката

Единицы измерения - система СИ

Исходные данные:

1. Толщина высушиваемого слоя, м

$$X_n := 0 \quad - \text{координата слоя, м}$$

$$X_k := 0.001 \quad - \text{координата слоя, м}$$

$$d_g := X_k \quad - \text{диаметр частицы, м}$$

2. Начальная концентрация сухих веществ, кг/кг

$$C_n := 0.09$$

3. Конечная концентрация сухих веществ, кг/кг

$$C_k := 0.75$$

4. Скорость движения сушильного агента, м/с

$$w_v := 2.5$$

5. Температура сушильного агента, К

$$T_{sr} := 373$$

6. Плотность сушильного агента, кг/м³

$$\rho_v := 1.474$$

7. Коэффициент теплопроводности сушильного агента, Вт/(м К)

$$\lambda_v := 0.023$$

8. Динамическая вязкость сушильного агента, м²/с

$$\mu_v := 17.8 \cdot 10^{-6}$$

9. Давление в сушильной камере, Па

$$P_v := 101308.0$$

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ:***Единицы измерения- система СИ*****10. Коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции:**

$$\alpha(w_v) := 0.054 \cdot (w_v)^3 - 1.018(w_v)^2 + 8.67 \cdot w_v + 10.34$$

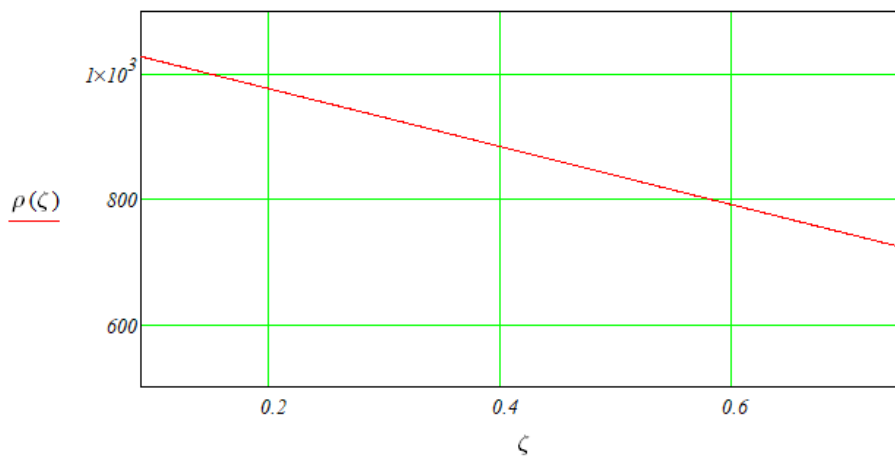
$$\alpha(2.5) = 26.49625$$

Z - текущая концентрация сухих веществ материала

$$0.09 \leq \zeta \leq 0.75$$

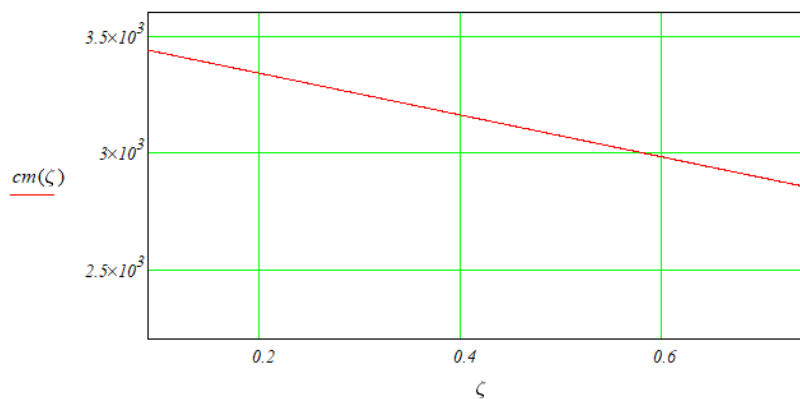
11. Плотность физическая для реальных диапазонов влажности слоя:

$$\rho(\zeta) := \begin{cases} [4.64 \cdot (1 - \zeta) \cdot 100 + 605.6] & \text{if } 0.09 \leq \zeta \leq 0.75 \\ 652 & \text{otherwise} \end{cases}$$

**11. Массовая удельная теплоемкость для реальных диапазонов влажности слоя:**

$$cm(\zeta) := \begin{cases} [8.97 \cdot (1 - \zeta) \cdot 100 + 2622] & \text{if } 0.09 \leq \zeta \leq 0.75 \\ 3439 & \text{otherwise} \end{cases}$$

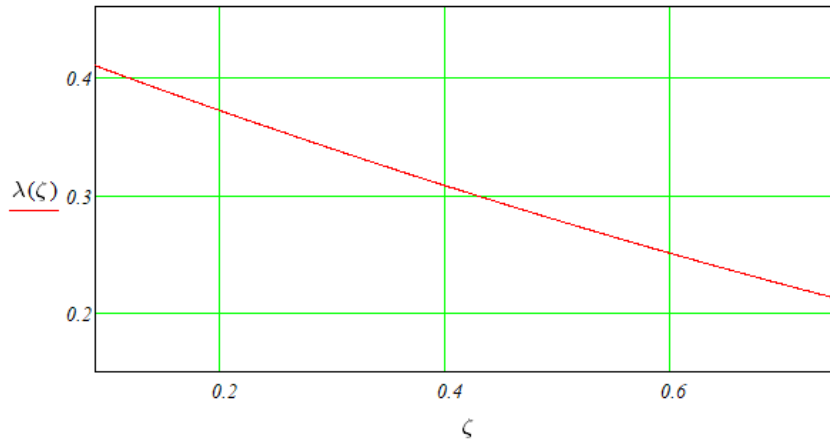
$$cm(0.9) = 3439.00000$$



12. Коэффициент теплопроводности для реальных диапазонов влажности слоя:

$$\lambda(\zeta) := \begin{cases} \left(0.1149 \cdot 10^{-7} \cdot cm(\zeta) \cdot \rho(\zeta)^{\frac{1}{3}} \cdot \rho(\zeta) \right) & \text{if } 0.09 \leq \zeta \leq 0.75 \\ (0.41) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\lambda(0.9) = 0.41000$$



13. Объемная удельная теплоемкость для реальных диапазонов влажности слоя:

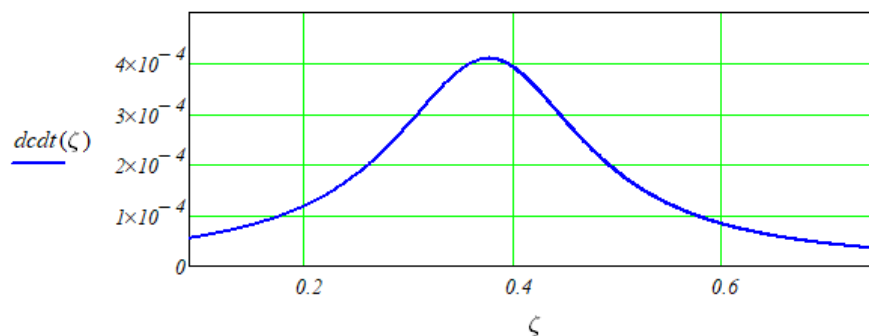
$$cr(\zeta) := \rho(\zeta) \cdot cm(\zeta)$$

14. Коэффициент температуропроводности для реальных диапазонов влажности слоя:

$$a'(\zeta) := \frac{\lambda(\zeta)}{cr(\zeta)}$$

15. Зависимость скорости сушки

$$dcdt(\zeta) := \frac{1}{19.32 \cdot 10^4 (\zeta)^2 - 14.54 \cdot 10^4 \cdot (\zeta) + 2.98 \cdot 10^4}$$



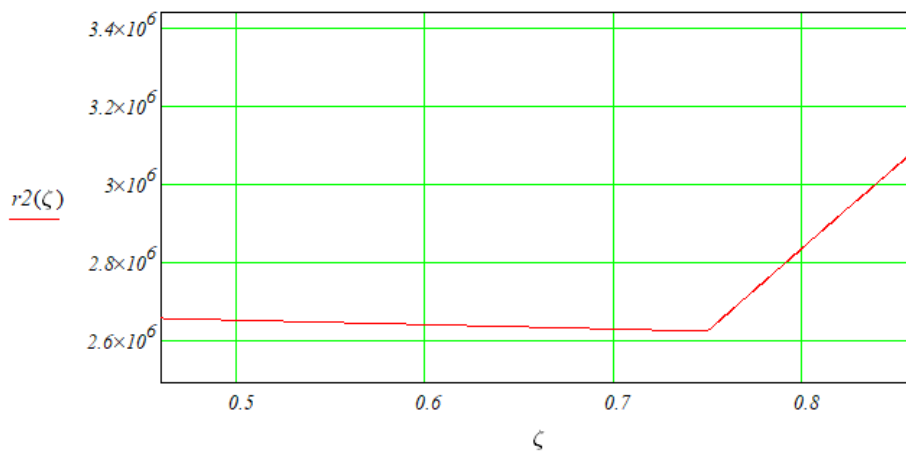
16. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход для свободной влаги:

$$r1 := 2380080$$

17. Энергия, затрачиваемая на фазовый переход и преодоление связи влаги с материалом в гигроскопической области:

$$r2(\zeta) := \begin{cases} [2380080 + |360486 - 1018520 \cdot (1 - \zeta)| + |3217274(1 - \zeta) - 942161|] & \text{if } 0.75 \leq \zeta \leq 0.86 \\ [2380080 + |197003 - 365632 \cdot (1 - \zeta)| + |-479495(1 - \zeta) - 16490|] & \text{if } 0.46 \leq \zeta \leq 0.75 \\ (2380080) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$r2(0.9) = 2.38008 \times 10^6$$

**19. Решение методом конечных разностей уравнения теплопереноса :**

$$A(\zeta) := \frac{a'(\zeta)}{dc dt(\zeta)} \quad B(\zeta) := 0 \quad D(\zeta) := \left(\frac{\rho(\zeta) \cdot r2(\zeta)}{cr(\zeta)} \right)$$

$$A(0.25) = 0.00062$$

Число узлов сетки по концентрации и радиусу частицы

$$Nc := 10 \quad Nx := 10 \quad i := 0, 1 \dots Nx \quad k := 0, 1 \dots Nc$$

Значение шага сетки по концентрации и радиусу частички

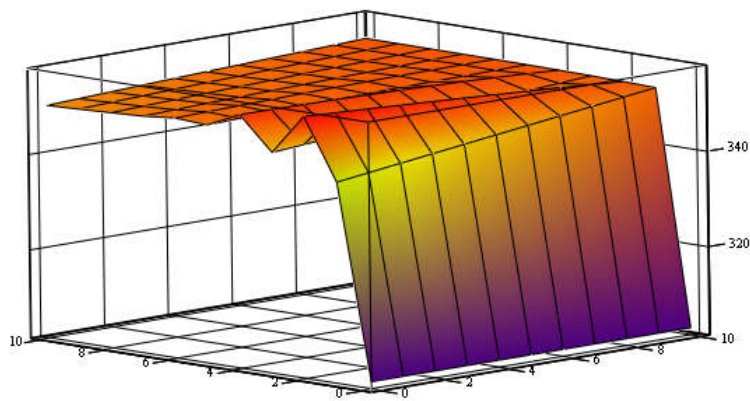
$$\tau := \frac{C_k - C_n}{Nc} \quad h := \frac{X_k - X_n}{Nx} \quad x_i := X_n + i \cdot h \quad cc_k := C_n + k \cdot \tau$$

```

z :=
for k ∈ 0..Nx
  YNx,k ← 353 - 1·e-(cck-Cn)·5
  Y0,k ← 0
  P0,k ← 0
  q0,k ← 0
  ψk ← 0
for i ∈ 0..Nx
  Yi,0 ← 303
  Pi,0 ← 0
  qi,0 ← 0
for k ∈ 0..Nx - 1
  ψk+1 ← -α(wv)·(Tsr - Y0,k)
  for i ∈ 0..Nx - 1
    AAi,k+1 ←  $\frac{\tau}{2 \cdot h} \cdot \frac{A(cc_{k+1})}{h}$ 
    BBi,k+1 ←  $\left( \frac{A(cc_{k+1})}{h^2} + \frac{B(cc_{k+1})}{2} \right) \cdot \tau + 1$ 
    CCi,k+1 ← AAi,k+1
    DDp ←  $\frac{A(cc_k)}{h^2} \cdot \text{if} \left( i > 0, Y_{i-1,k}, Y_{0,k} + \frac{h}{\lambda(cc_{k+1})} \cdot \psi_{k+1} \right) - \left( B(cc_k) + 2 \cdot \frac{A(cc_k)}{h^2} \right) \cdot Y_{i,k} + \frac{A(cc_k)}{h^2} \cdot Y_{i+1,k}$ 
    DDi,k+1 ←  $Y_{i,k} + \frac{\tau}{2} \cdot (D(cc_{k+1}) + D(cc_k) + DDp)$ 
    P0,k+1 ←  $\frac{AA_{0,k+1} + CC_{0,k+1}}{BB_{0,k+1}}$ 
    q0,k+1 ←  $\frac{2 \cdot h \cdot AA_{0,k+1} \cdot \psi_{k+1} + DD_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}))}{BB_{0,k+1} \cdot (-\lambda(cc_{k+1}))}$ 
    for i ∈ 1..Nx - 1
      Pi,k+1 ←  $\frac{-CC_{i,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$ 
      qi,k+1 ←  $\frac{DD_{i,k+1} - AA_{i,k+1} \cdot q_{i-1,k+1}}{AA_{i,k+1} \cdot P_{i-1,k+1} + BB_{i,k+1}}$ 
    for i ∈ Nx - 1..Nx - 2..0
      Yi,k+1 ← Pi,k+1·Yi+1,k+1 + qi,k+1
Y

```

20. Температурное поле по концентрации и глубине частички:



z

21. Значение температур в узловых точках:

$z =$	303	343.77	356.48	347.87	354.73	351.5	351.87	351.21	350.85	350.54	350.24
	303	344.62	356.14	348.39	354.66	351.74	352.04	351.42	351.08	350.8	350.53
	303	345.47	355.79	348.91	354.58	351.94	352.21	351.62	351.32	351.05	350.81
	303	346.33	355.43	349.4	354.47	352.12	352.36	351.81	351.54	351.3	351.09
	303	347.18	355.06	349.88	354.33	352.26	352.49	351.99	351.76	351.55	351.37
	303	348.03	354.67	350.36	354.16	352.39	352.61	352.15	351.98	351.79	351.65
	303	348.88	354.26	350.82	353.96	352.49	352.71	352.31	352.19	352.02	351.92
	303	349.73	353.84	351.28	353.72	352.59	352.79	352.47	352.39	352.26	352.19
	303	350.58	353.41	351.73	353.44	352.67	352.84	352.62	352.58	352.49	352.45
	303	351.43	352.95	352.18	353.11	352.74	352.87	352.76	352.76	352.72	352.71
	303	352.28	352.48	352.63	352.73	352.81	352.86	352.9	352.93	352.95	352.96