

На правах рукописи



МАКАРОВ Александр Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА КОНВЕКТИВНО-
РАДИАЦИОННОЙ СУШКИ ЖЕЛАТИНА ИЗ ОТХОДОВ
РЫБОПЕРЕРАБОТКИ**

Специальность 05.18.12– Процессы и аппараты пищевых производств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Астрахань - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Астраханский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «АГТУ»).

- Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Максименко Юрий Александрович
(ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»)
- Официальные оппоненты – **Верболоз Елена Игоревна**
доктор технических наук, профессор,
(Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»), профессор факультета биотехнологий
- Журавлев Алексей Владимирович**
доктор технических наук, доцент,
(Ассоциация «Технологическая платформа «Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания»), директор
- Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет», г. Калининград

Защита состоится «18» февраля 2021 года в 13 часов 00 мин на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 212.035.01 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» по адресу: 394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19, конференц-зал.

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

Автореферат размещен в сети Интернет на официальных сайтах Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak.minobrnauki.gov.ru> и ФГБОУ ВО «ВГУИТ» <http://www.vsuet.ru> «08» декабря 2020 г.

С диссертационной работой можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «ВГУИТ». Полный текст диссертации размещен в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ВГУИТ» <http://www.vsuet.ru> «09» ноября 2020 г.

Автореферат разослан «12» января 2021 г.

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



Л.Н. Фролова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Утилизация отходов переработки продуктов животного происхождения на фоне роста объемов производства остается одной из важных задач пищевой промышленности, актуальным направлением решения которой является использование отходов как вторичных материальных ресурсов. В частности, отходы рыбопереработки богаты коллагеном и перспективны в качестве источника сырья для производства желатина.

Желатин, в частности производимый из рыбного сырья, является уникальным и широко востребованным продуктом, обладающим массой ценных свойств, которые обуславливается особенностью строения и аминокислотным составом. Желатин на сегодняшний день остается одним из наиболее востребованных в различных отраслях промышленности коллагенов, при этом основную долю на отечественном рынке желатина занимает импортная продукция.

Для создания и развития новых производств желатина необходимы разработка и внедрение обоснованных ресурсо- и энергосберегающих технических решений, позволяющих интенсифицировать производство, снизить себестоимость при сохранении высокого качества готового продукта. Повышение эффективности проведения операций в технологическом потоке получения желатина на основе отходов рыбопереработки актуально и решение поставленных задач даст возможность усовершенствовать существующие и создать новые промышленные производства желатина из нетрадиционного коллагенсодержащего сырья.

Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, посвящена совершенствованию способа конвективно-радиационной сушки желатина из отходов рыбопереработки за счет изучения и анализа физико-химических свойств концентратов желатина, моделирования и анализа процессов тепломассообмена, разработки рационального режима обезвоживания и конструкции сушильной установки. Исследования выполнялись в соответствии с тематическим планом НИОКР в рамках государственного задания и согласно плану научно-исследовательской работы кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет».

Степень разработанности темы. Пристальное внимание к повышению эффективности энергоемких технологии и техники сушки объясняется тем, что именно режимы этого процесса в значительной мере обуславливают качество и стоимость готовой продукции. Существенный вклад в эволюцию технологии и техники обезвоживания тонкодисперсных материалов внесли такие ученые как А.С. Гинзбург, А.В. Лыков, М.В. Лыков, В.И. Муштаев, П.А. Ребиндер, Б.С. Сажин, Ю.М. Плаксин, С.П. Рудобашта, Антипов, И.Ю. Александян, К.Г. Филоненко, А.Н. Остриков, В.Е. Куцакова, Б.И. Леончик, М.А. Гришин, О. Кришер и др. Целесообразность производства и широкого применения высушенной продукции массового потребления на растительной основе обоснованы в работах по разработке рецептур пищевых изделий, совершенствованию технологий и оборудования. Большая степень сорбционной активности и специфический механизм внутреннего переноса тепловой энергии и вещества с учетом тепло и -массообмена на границе раздела фаз в биополимерных коллоидах вызывают значительные технологические затруднения при реализации традиционных способов удаления влаги из них, что предопределяет постановку задач поиска рациональной модификации известных

методов и аппаратов для производства сухих растительных продуктов. Перспективна комбинация способов подвода тепловой энергии для «смягчения» условий процесса сушки при сохранении качества сухих материалов, повышении интенсивности и производительности процесса. Важны не только разработка технико-технологических решений и рациональных режимов, но и новые подходы к описанию, моделированию и прогнозированию процессов влагоудаления.

Цель работы и задачи исследований. Цель работы – совершенствование способа конвективно-радиационной сушки желатина из отходов рыбопереработки за счет изучения и анализа физико-химических свойств концентратов желатина, моделирования и анализа процессов тепломассообмена, разработки рационального режима обезвоживания и конструкции сушильной установки.

Для достижения цели решались следующие основные задачи:

1) Систематизировать данные литературных источников, экспериментально установить и проанализировать математические зависимости для расчета теплофизических, структурно-механических и гигроскопических характеристик концентратов желатина из отходов рыбопереработки.

2) Изучить механизм взаимодействия и сорбционные явления при контакте концентратов желатина из отходов рыбопереработки с водой, дать характеристику желатину как объекту сушки и оценить виды и энергию связи влаги с материалом.

3) Проанализировать удельные затраты тепловой энергии на сушку желатина из отходов рыбопереработки с учетом термодинамических потерь тепла. Исследовать внутренний тепломассоперенос и фазовые превращения в процессе конвективно-радиационной сушки вспененного бульона желатина.

4) Исследовать кинетические закономерности тепломассопереноса при конвективно-радиационной сушке вспененного бульона желатина.

5) Разработать и научно обосновать способ сушки желатинового бульона из отходов рыбопереработки.

6) Разработать рациональный режим конвективно-радиационной сушки.

7) Реализовать математическую модель внутреннего тепломассопереноса при конвективно-радиационной сушке желатинового бульона с учетом свойств материала, технологических, термодинамических параметров процесса и кинетических закономерностей влагоудаления.

8) Разработать конструкцию конвективно-радиационной сушильной установки для сушки желатинового бульона из отходов рыбопереработки и других биополимерных материалов, подобных желатину по комплексу свойств.

9) Разработать рекомендации по практическому использованию результатов проектно-технических решений и научных исследований. Апробировать и внедрить результаты исследований.

Положения, выносимые на защиту: результаты экспериментально-аналитических исследований механизма тепломассопереноса и кинетических закономерностей процесса конвективно-радиационной сушки желатина из отходов рыбопереработки; результаты экспериментально-аналитических исследований теплофизических, структурно-механических и гигроскопических характеристик концентратов желатина из отходов рыбопереработки; результаты математического моделирования внутреннего тепломассопереноса при конвективно-радиационной

сушке желатина из отходов рыбопереработки; конструктивные особенности установки комплексной конвективно-радиационной сушильной установки.

Научная новизна. Установлены и проанализированы функциональные зависимости для расчета структурно–механических, теплофизических и гигроскопических характеристик концентратов желатина из отходов переработки рыбы. Установлено и проанализировано влияние влажности и температуры концентратов желатина из отходов переработки рыбы на их структурно–механические, теплофизические и гигроскопические характеристики. Исследованы сорбционные явления при контакте концентратов желатина из отходов переработки рыбы с водой и установлены соответствующие математические зависимости для оценки видов и энергий связи с сухими веществами. Исследованы кинетические закономерности тепломассопереноса при конвективно-радиационной сушке вспененного бульона желатина. Реализована математическая модель внутреннего тепломассопереноса при конвективно-радиационной сушке желатинового бульона с учетом свойств материала, технологических, термодинамических параметров процесса и кинетических закономерностей влагоудаления. Выполнен анализ удельных затрат тепловой энергии на сушку желатина из отходов рыбопереработки с учетом термодинамических потерь тепла. Проанализированы внутренний тепломассоперенос и фазовые превращения в процессе конвективно-радиационной сушки вспененного бульона желатина.

Практическая значимость. В ходе комплекса теоретических и экспериментальных исследований рекомендован способ сушки желатинового бульона, который заключается в следующем: предварительно упаренный до концентрации сухих веществ $C = 14 - 26\%$ бульон сушат во вспененном и желатинизированном состоянии, в форме штрангов с толщиной $d = 3,5 - 4,5$ мм при комбинированном конвективно-радиационном энергоподводе. Конвективная составляющая: сушка материала происходит при атмосферном давлении; температура воздуха не превышает температуру желатинизации продукта и составляет $T = 293 - 303$ К; влажность воздуха $W = 50 - 60\%$; скорость потока воздуха $v = 3,5 - 5,5$ м/с. Радиационная составляющая: двустороннее инфракрасное облучение штрангов; плотность теплового потока, падающего с одной стороны штранга $E = 0,95 - 2,45$ кВт/м²; инфракрасное облучение штранга продукта начинают через период времени $t = 0,05 - 0,2$ ч после начала процесса конвективной сушки. Разработан рациональный режим сушки при котором обеспечивается максимальное значение удельного выхода сухого желатина с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени $G_{\max} = 0,998$ кг/(м²·ч) для конвективно-радиационной сушки при двустороннем инфракрасном облучении штрангов пены при следующих параметрах: начальная концентрация сухих веществ в продукте $C = 0,24$ кг/кг; начальный диаметр штранга пены $d_n = 4$ мм; температура $T = 292 - 295$ К, влажность $W = 50 - 60$ % и скорости сушильного агента $v = 3,5 - 5,5$ м/с; плотность теплового потока, падающего с одной стороны штранга $E = 2,45$ кВт/м². Данный режим является рациональным. Разработана конструкция комплексной конвективно-радиационной сушильной установки и получен патент на полезную модель 195336 РФ для практического внедрения. Разработаны и апробированы рекомендации по практическому использованию результаты проектно-технических решений и научных исследований. ООО «БИОПОЛИМЕР-НЕО», АО

«ОРЕЛПРОДУКТ», ООО «Инновационные технологии продуктов питания», «ПКФ «АСТРАХАНСКИЕ КОНСЕРВЫ», ООО «ЭЛЕКТРОН», ООО «ЛАГУНА PPP» и Ассоциация Астраханских рестораторов и кулинаров внедрили и используют результаты и рекомендации диссертационной работы.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Работа соответствует п. 2, 3 и 4 паспорта специальности 05.18.12 - «Процессы и аппараты пищевых производств».

Апробация работы. Материалы и отдельные результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались на Международной научно-практической конференции «Инновационные процессы в современной науке, тенденции развития» (Уфа, 2019г.), Всероссийской междисциплинарной научной конференции «Наука и практика – 2019» (Астрахань, 2019г.), Международном научно-техническом симпозиуме «Вторые международные Косыгинские чтения, приуроченные к 100-летию РГУ имени А. Н. Косыгина» на Международном Косыгинском Форуме «Современные задачи инженерных наук» (Москва, 2019г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 4 статьи в журналах рекомендованных ВАК РФ, получен 1 патент РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и заключения, списка литературы и приложений. Основное содержание работы изложено на 147 страницах машинописного текста, содержит 13 таблиц, 31 рисунок, список литературы из 158 наименований работ отечественных и зарубежных авторов. Приложения на 18 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость исследований. Поставлена цель и сформулированы задачи диссертационной работы.

В первой главе дана общая характеристика сырью и конечному продукту, проанализированы традиционные технологии получения желатина, рассмотрены перспективы производства и области использования желатина, а также исследованы перспективы использования коллагенсодержащего рыбного сырья для его производства. Значительное внимание было уделено исследованию традиционных способов и конструкторских решений для сушки желатиновых бульонов и намечены пути интенсификации процесса. Предложена проблемно - концептуальная схема исследований.

Во второй главе изложены результаты анализа оптических и терморadiационных, гигроскопических и теплофизических свойств концентратов желатинового бульона из отходов переработки рыбы как объекта сушки.

Установлен ряд параметров: оптически тонкий слой для материала $h \leq 0,004$ м; коэффициент эффективного ослабления лучистого потока и объемная плотность лучистой энергии, распределенная по глубине слоя оптически тонкой толщины. Для

организации объемного радиационного энергоподвода рекомендованы генераторы типа КГТ (КИ, КГ)-220-1000 и установлены рациональные пределы варьирования длины волны $\lambda = 1,01 \dots 1,11$ мкм в инфракрасном спектральном интервале.

Определены зависимости плотности ρ , кг/м³; удельной теплоемкости c , Дж/(кг·К); коэффициента температуропроводности a , м²/с ($a = \lambda/(c \cdot \rho)$) и коэффициента теплопроводности λ , Вт/(м·К) от температуры $T = 283 \dots 303$ К и/или влажности $W = 0,85 \pm 0,10 \dots 0,14$ кг/кг (W_H – начальная влажность, кг/кг).

$$\rho(W) = 1 / (A_\rho \cdot W + B_\rho), \quad (1)$$

где A_ρ, B_ρ – коэффициенты, $A_\rho = 3,070293 \cdot 10^{-4}$ м³/кг, $B_\rho = 6,94774 \cdot 10^{-4}$ м³/кг.

$$c(W) = A_c \cdot W + B_c, \quad (2)$$

где A_c, B_c – коэффициенты, $A_c = 2595,333$ Дж/(кг·К), $B_c = 1586,667$ Дж/(кг·К).

$$\lambda(W, T) = (a_z \cdot \dot{\Delta}^2 + b_z \cdot \dot{\Delta} + c_z) \cdot W^2 + (d_z \cdot \dot{\Delta}^2 + e_z \cdot \dot{\Delta} + f_z) \cdot W + (g_z \cdot \dot{\Delta}^2 + k_z \cdot \dot{\Delta} + l_z), \quad (3)$$

где $a_z, b_z, c_z, d_z, e_z, f_z, g_z, k_z, l_z$ – эмпирические коэффициенты.

Сушка желатинового бульона протекает, в том числе и в области гигроскопического состояния, таким образом, необходим учет влияния явлений связывания влаги с сухими веществами на характер протекания теплообменных процессов. Исследовались процессы взаимодействия концентратов желатина из отходов переработки рыбы с водой, их гигроскопические свойства и построены изотермы сорбции. Гигроскопические характеристики определялись методом Ван Бамелена (A_w – активность воды, W_p – равновесная влажность ЭКИ, кг/кг) и построены изотермы сорбции (пример, рисунок 1).

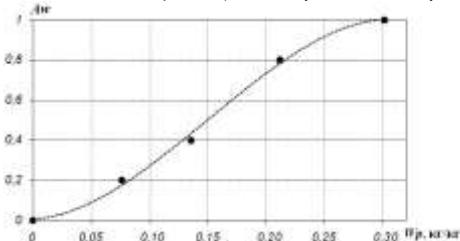


Рисунок 1 – Изотерма сорбции для желатина при $T = 303$ К

Концентраты желатина можно причислить к капиллярно-пористым коллоидным субстанциям, где жидкая среда может быть связана с сухим остатком в разной форме, что характерно и для коллоидных, а также капиллярно-пористых веществ и согласуется с рядом основополагающих работ по теории сушки.

Сорбционные кривые обладают для капиллярно-пористых коллоидных веществ S-образный характером, при этом на них наблюдается 3-и зоны, соответствующих воде моно- и полимолекулярной адсорбции, а также структурной, макро и микро капиллярной влаге. Влажность материала, которая соответствует состоянию термодинамического равновесия при $A_w = 1$ кг/кг, гигроскопическая W_g . Определено содержание адсорбционно-связанной влаги мономолекулярного слоя $W_k = 0,05 \dots 0,01$ кг/кг.

В результате математического обобщения экспериментальных данных получены аппроксимирующие уравнения зависимости A_w :

$$A_w(W_p, T) = (a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h), \quad (4)$$

где a, b, c, d, e, f, g, h – эмпирические коэффициенты.

Результаты исследований показывают, что сухой желатин обладает высокой степенью гигроскопичности, что целесообразно учитывать при разработке дальнейших технологических стадий по переработке, фасовке и упаковке

продукции. Хранение продукции следует осуществлять в герметичной упаковке.

Движущей силой сорбции является разность химических потенциалов $\Delta\mu$, которая в гигроскопической области равна энергии связи влаги с материалом $R \cdot T \cdot \ln A_w$ (где $R = 8,314$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная), которую принимаем потенциалом влагопереноса:

$$E_{\hat{n}} = -\Delta\mu = -R \cdot T \cdot \ln((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h)) \quad (5)$$

Изменение свободной энергии определим путем дифференцирования уравнения Гиббса-Гельмгольца по W_p при $T = const$ ($\Delta F = \Delta E - T \cdot \Delta S$, где ΔE – изменение внутренней энергии; $T \cdot \Delta S$ – изменение связанной энергии; ΔS – изменение энтропии): $(\partial \Delta F / \partial W_p)_{T,P} = (\partial \Delta E / \partial W_p)_{T,P} - T \cdot (\partial \Delta S / \partial W_p)_{T,P}$ (7).

При дифференцировании выражения (5) по T получаем: $\partial(\partial \Delta F / \partial W_p)_{T,P} / \partial T = -(\partial \Delta S / \partial W_p)_{T,P}$. С учетом выражения (4) имеем зависимость для дифференциального изменения энтропии связанной воды:

$$(\partial \Delta S / \partial W_p)_{T,P} = -\partial(R \cdot T \cdot \ln \varphi) / \partial T \quad (6).$$

Используя формулу (4) определим численные значения свободной энергии $\partial \Delta F / \partial W_p$, связанной энергии $-T \cdot (\partial \Delta S / \partial W_p)$ и внутренней энергии (теплого эффекта) $\partial \Delta E / \partial W_p$ процесса сорбции (рисунок 2).

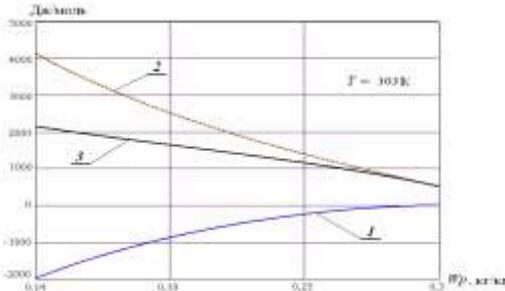


Рисунок 2 – Дифференциальные изменения свободной (1) и связанной (2) энергий и теплового эффекта (3) парсорбции от W_p

Анализ результатов показывает то, что дифференциальное изменение внутренней энергии имеет отрицательную величину практически во всем влажностном интервале, что обуславливает термические эффекты при парсорбции и не противоречит результатам исследований для ряда биополимерных продуктов.

При моделировании процессов влагоудаления с учетом явлений связывания влаги с материалами, тепловая энергия испарения r , входящая в дифференциальное уравнение теплопереноса, может быть представлена как сумма теплоты смачивания $r_{см}$ и теплоты парообразования свободной воды r^* . Количество тепловой энергии r , необходимое для испарения 1 кг влаги, Дж/кг:

$$r = r^* + r_{ni} + r_{\hat{n}o} = 3118,4581 \cdot 10^3 - 2286,66 \cdot T - 55,1(5) \cdot R \cdot T \cdot \ln \varphi + 55,1(5) \cdot T \cdot (\partial \Delta S / \partial W_p), \quad (7).$$

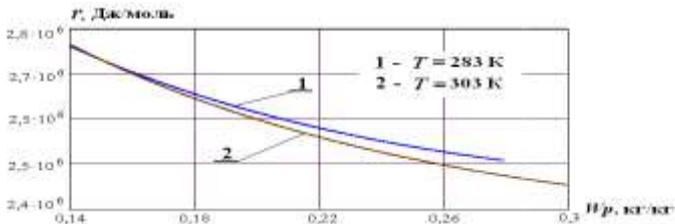


Рисунок 3 – Удельная тепловая энергии парообразования

На рисунке 3 показана зависимость $r(Wp, T)$. Характер полученных зависимостей не противоречит известным результатам для подобных продуктов, а характерные точки перегиба соответствуют изменению превалирования той или иной формы связи влаги с сухим остатком.

В третьей главе приведены результаты экспериментально–аналитических исследований кинетики процесса сушки желатинового бульона для анализа тепломассообменных процессов и разработки рационального режима. Для изучения кинетики сушки использовалась экспериментальная установка, разработанная на кафедре «Технологические машины и оборудование» АГТУ (рисунок 4).

Для проведения исследований использовались методы вероятностного многофакторного многоуровневого планирования и статистической обработки результатов опытов, а за искомую функцию выбран удельный съем (выход) сухого желатина, отнесенный к площади поверхности фазового контакта и продолжительности процесса, G , кг/(м²·ч):

$$G = \dot{M}_{сн} / (F \cdot \tau), \quad (8)$$

где $M_{сн}$ – масса обезвоженного образца при итоговой влажности $w_k \leq 0,1$ кг/кг, значение которой определялось при анализе гироскопических параметров образца; F – площадь фазового контакта, м²; τ – продолжительность сушки, ч.

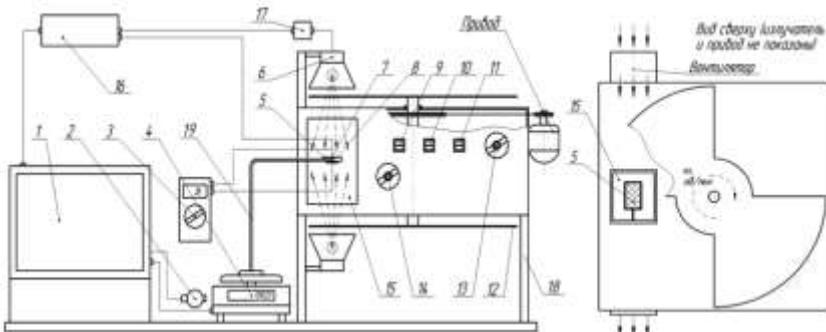


Рисунок 4 – Экспериментальная установка для исследований процесса сушки материалов при конвективном, радиационном, осциллирующем и комбинированном методах энергоподвода: 1

- персональный компьютер; 2 – видеокамера; 3 – мультиметр; 4 – весы Adventurer OHAUS AR3130; 5 – рабочая поверхность (подложка, сетчатый (игольчатый) носитель); 6 – инфракрасный излучатель; 7 – термопара ХК(L) ТП-011; 8 – датчик теплового потока; 9 – включатель верхнего инфракрасного излучателя; 10 – включатель нижнего инфракрасного излучателя; 11 – выключатель привода осциллирующих дисков; 12 – осциллирующие лопасти; 13 – тиристорный регулятор напряжения на лампах; 14 – тиристорный регулятор напряжения на двигателе привода осциллирующих дисков; 15 – рабочая камера; 16 – блок управления LAURENT; 17 – реле; 18 – каркас; 19 – держатель

В таблице 1 сведены параметры, оказывающие влияние на скорость процесса конвективной пеносушки желатинового бульона, а также уровни их варьирования, установленные в результате предварительных исследований, к указанным факторам относятся: начальная концентрация сухих веществ в продукте C , кг/кг; исходный эквивалентный диаметр пеностранга d_n , м; температура T_b , К, влажность W , кг/кг и скорость движения v , м/с теплоносителя (воздуха).

Таблица 1 – Уровни варьирования факторов при пеносушке желатинового бульона

Уровень	Факторы					
	d_n , м	C_n , кг/кг	E_n , кВт/м ²	W , %	v , м/с	T_n , К
1	0,003	0,24	0,95	50-60	3,5-5,5	292-295
2	0,004	0,20	2,45	-	-	-
3	0,005	0,14	-	-	-	-

В результате компьютерной обработки экспериментальных данных получены адекватные аппроксимирующие зависимости сжима сухого желатина с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени от влияющих параметров, при аппроксимирующей погрешности R^2 не менее 0,997:

$$G(w_i, d_i) = \left[\begin{aligned} & (\hat{a}_1 \cdot d_i^2 + b_1 \cdot d_i + c_1) \cdot w_i^2 + (a_2 \cdot d_i^2 + b_2 \cdot d_i + c_2) \cdot w_i + \\ & + (a_3 \cdot d_i^2 + b_3 \cdot d_i + c_3) \end{aligned} \right] \quad (9)$$

где $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ – эмпирические коэффициенты.

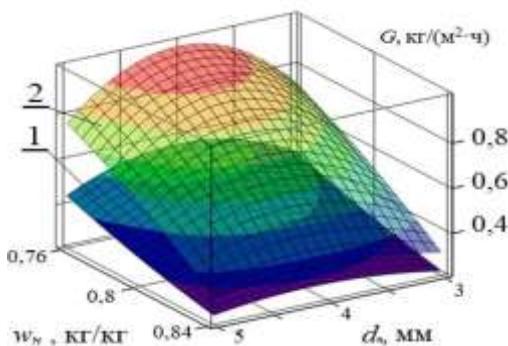


Рисунок 5 – Поля значений сжима сухого желатина с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени от варьируемых факторов (1 – при $E=0,95$ кВт/м², 2 – при $E=2,45$ кВт/м²) при конвективно-радиационном энергоподводе

На рисунке 5 в виде полей значений G представлены результаты расчета целевой функции по уравнению (9). Для рассматриваемых вариантов реализации процесса рост целевой функции наблюдается как при увеличении диаметра штранга, так и при увеличении концентрации сухих веществ в продукте и ограничивается верхними предельными значениями указанных факторов.

Максимальное значение удельного выхода сухого желатина с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени $G_{\max} = 0,998$ кг/(м²·ч) для конвективно-радиационной сушки при двустороннем инфракрасном облучении штрангов пены достигается при следующих параметрах: начальная концентрация сухих веществ в продукте $C = 0,24$ кг/кг; начальный диаметр штранга пены $d_n = 4$ мм; температура $T = 292 - 295$ К, влажность $W = 50 - 60$ % и скорости сушильного агента $v = 3,5 - 5,5$ м/с; плотность теплового потока, падающего с одной стороны штранга $E = 2,45$ кВт/м². Данный режим является рациональным.

На основе полученных зависимостей текущей w , кг/кг от продолжительности влагоудаления τ , с. построены кривые сушки, часть из которых показана на рисунке 6, в результате обработки которых получены аппроксимирующие функциональные зависимости $w = f(\tau)$.

Анализ кривых обезвоживания дает возможность определения продолжительности процесса и построить кривые скорости удаления влаги.

Лимитирующим скорость удаления влаги из биополимеров, в частности, желатина является внутренний перенос тепла и влаги, особенно в пеноструктурах.

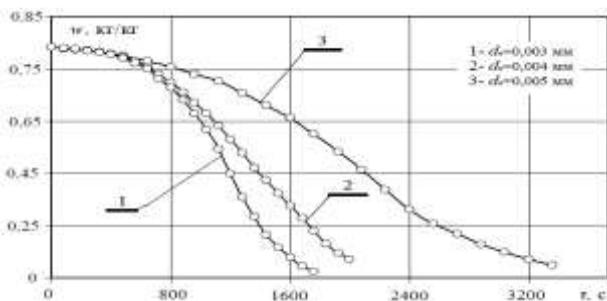


Рисунок 6 – Экспериментальные кривые сушки (○) и их аппроксимирующие функции (—) при $w_n = 0,80 \text{ кг/кг}$ и $E_p = 2,45 \text{ кВт/м}^2$

Аппроксимация кривых обезвоживания позволила получить выражения:

$$\tau(w) = a \cdot w^5 + b \cdot w^4 + c \cdot w^3 + e \cdot w^2 + f \cdot w + h, \quad (10)$$

где τ – продолжительность удаления влаги, с; a, b, c, e, f, h – эмпирические коэффициенты.

По результатам математических преобразований установлена зависимость для скорости конвективно-радиационной сушки штрангов (11) для характерных интервалов значений E_p , кВт/м² и различных значениях начальной влажности продукта w_n :

$$\frac{dC}{d\tau} = \left[\begin{array}{l} (a_1 \cdot d^3 + b_1 \cdot d^2 + c_1 \cdot d + e_1) \cdot C^4 + (a_2 \cdot d^3 + b_2 \cdot d^2 + c_2 \cdot d + e_2) \cdot C^3 + \dots \\ \dots + (a_3 \cdot d^3 + b_3 \cdot d^2 + c_3 \cdot d + e_3) \cdot C^2 + (a_4 \cdot d^3 + b_4 \cdot d^2 + c_4 \cdot d + e_4) \cdot C + \dots \\ \dots + (a_5 \cdot d^3 + b_5 \cdot d^2 + c_5 \cdot d + e_5) \end{array} \right]^{-1} \quad (11)$$

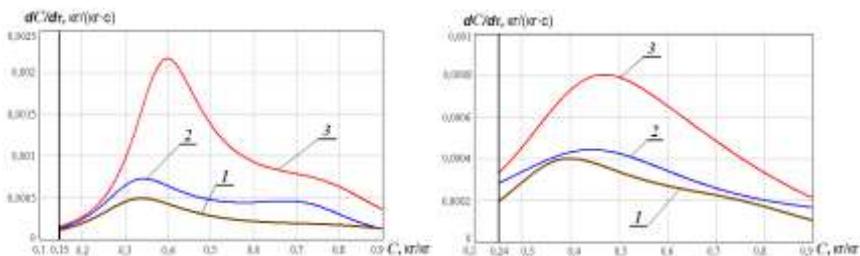


Рисунок 7 – Кривые скорости конвективно-радиационной сушки штранг пены желатинового бульона от концентрации сухих веществ (а) – при $w_n=85\%$ и $E=2,45 \text{ кВт/м}^2$ и (б) – при $w_n=76\%$ и $E=2,45 \text{ кВт/м}^2$: 1 – при $d = 0,005 \text{ м}$, 2 – при $d = 0,004 \text{ м}$, 3 – при $d = 0,003 \text{ м}$

На рисунке 7 представлены примеры кривых скоростей конвективно-радиационной сушки. Как известно внутренний теплоперенос, особенно в дисперсных системах ограничивает скорость удаления влаги из биополимеров, к которым относятся коллагены, в том числе желатин. Кривые скорости характеризуются двумя явно выраженными типичными для биополимеров зонами, разграниченными экстремумами функций $dw/d\tau = f(C)$, кг/(кг·с). В первой зоне происходит рост скорости сушки до максимальных значений, который соответствует удалению влаги в свободном состоянии с поверхности раздела фаз.

Движение влаги их продукта в атмосферу осуществляется в виде пара, образовавшегося внутри пузырьков пены, продвигающегося через каркас плёнок и диффундирующего через пленки жидкой фазы. В данном случае, в силу интенсивного испарения влаги исключаются риски перегрева продукта, а в связи с формированием структуры биополимера происходит частичное деформирование и частичная усадка продукта. В точке экстремума функции $dw/dt = f(C)$, кг/(кг·с) (рисунок 7) происходит высыхание гелеобразных перегородок желатинизированного продукта, влага перемещается в форме пара путем эффузии, а именно при движении отдельных молекул без взаимного контакта, сам продукт (гель) плавно переходит в биополимерное вещество, обладающее малой пористостью, в результате образуется прочный полимерный каркас и микрокапиллярная сетка. Во второй зоне (рисунок 7), соответствующей удалению влаги полимолекулярной адсорбции, наблюдается спад скорости сушки, углубление поверхности парообразования смещается вглубь штранга, при этом при интенсивном прогревании продукта завершается его полимеризация и формирование его микропористой структуры, завершается усадка пеноштранга.

В четвертой главе представлены результаты математического моделирования теплопереноса при конвективно-радиационной переноски желатинового теллона, полученного из отходов переработки рыбы.

В варианте объемного подведения тепловой энергии уравнение переноса теплоты в одномерном случае представляется в виде:

$$c\rho(x,t,w) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda(w,x,t) \frac{\partial t}{\partial x}) + \xi \cdot r(w,x,t) \rho(w,x,t) \frac{\partial w}{\partial \tau} + \omega(w,x) \quad (12),$$

где $c\rho(x,t,w)$, $\lambda(w,x,t)$, $\rho(w,x,t)$ – функциональные зависимости ТФХ от влияющих параметров; $\omega(w,x)$ – объемная плотность лучистой энергии, распределенная по глубине слоя оптически тонкой толщины; $r(w,x,t)$ – тепловая энергия испарения; x – координата глубины штранга в интервале от 0 до d ; ξ – коэффициент фазовых превращений.

Допуская, что перемещение влаги при интенсивном ее удалении наблюдается преимущественно в парообразном виде и изотропность по w структуры слоя, принимаем что $\xi = 1$ и независимость $c\rho$, λ , r и ρ от x .

После преобразований уравнения (12) путем деления его на $c \cdot (W) \cdot \rho(W) = c_v$ получим:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \bar{a}(t,W) \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{r(t,W) \bar{\rho}(t,W)}{\bar{c}_v(t,W)} \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} + \frac{w(x,t,W)}{\bar{c}_v(t,W)}, \quad (13)$$

где $\bar{a}(t,W) = \bar{\lambda}(t,W) / \bar{c}_v(t,W)$ – коэффициент температуропроводности, m^2/c .

При делении (13) на $\partial W / \partial \tau$ и условно опустив усреднения, имеем:

$$\frac{\partial t}{\partial W} = \frac{a}{\partial W / \partial \tau} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{r \cdot \rho}{c_v} + \frac{w}{\bar{c}_v \cdot \partial W / \partial \tau}. \quad (14)$$

Решая выражение (14) при определенных краевых условиях получим температурную зависимость $t = f(x,W)$.

В начале процесса время $\tau = 0$ (после выхода продукта из фильеры в зону сушки), влажность и температура равны исходным значениям w_0 и $t_0 = T_{\text{прод}} = 298 \text{ K}$

по всей толщине слоя. Таким образом, начальные условия: при $w = w_{нач}$ $T = T_0$ (К), т.е. $T(x, w_{нач}) = T_0$.

Пренебрегаем лучистым обменом тепловой энергией между соседними поверхностями пеноштрангов с равной T . В варианте радиационного подвода энергии высокотемпературными генераторами с $T_{г} \gg T_{прод}$, теплообмен на границе фазового контакта зададим следующими граничными условиями:

$$-\lambda(w) \frac{\partial t}{\partial x} = E_{\lambda, \text{рад.}} + \alpha (T_{\text{вд. лд.}} - T_{x=0(\text{п\ddot{a}ддд\ddot{d} \text{ .})})} \quad (15),$$

где $E_{\lambda, \text{гран.}}$ – плотность лучистого потока на границе раздела фаз, Вт/м²; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К), $T_{\text{окр. ср.}}$ – температура внешней среды, К; $T_{x=0(\text{поверх})}$ – температура на поверхности фазового контакта, К.

Выражения можно решить методом конечных разностей, в котором функциональные зависимости, заданные на континууме, описываются сеточным вектором, а дифференциалы подвергаются аппроксимации на сетке разностными аналогами. В результате решения адаптированной математической модели получено при рациональных параметрах ($G_{\text{max}} = 0,998$ кг/(м²·ч), $C = 0,24$ кг/кг; $d_n = 4$ мм; $T = 292 - 295$ К, $W = 50 - 60\%$, $v = 3,5 - 5,5$ м/с, $E = 2,45$ кВт/м²) проведения процесса температурное поле по высоте слоя пены в зависимости от содержания сухого остатка, показанное на рисунке 8. На рисунке 9 в графическом виде представлена установленная зависимость средней объемной температуры t_{cp} , К от содержания сухих веществ.

Оценить адекватность разработанной математической модели и обоснованности принятия решений по ее практическому внедрению можно приблизительно по средней температуре и конечной влажности готового сухого материала, в результате оценки установлено, что отклонение эмпирических данных от модельных не превышало 7,5%.

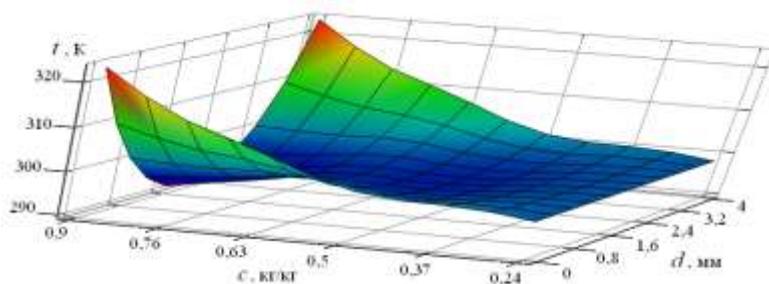


Рисунок 8 – Поле распределения значений температур в объеме штранга пены желатинового бульона при его конвективно-радиационной сушке (рациональный режим)

Установлено, что при реализации предложенного рационального способа наблюдались малые температурные градиенты в материале, причем на первоначальном участке удаления свободной влаги с уменьшением ее концентрации имеет место рост температуры до температуры мокрого термометра (испарения). В течении операции влагоудаления температура была не больше 330 К, что обуславливает обоснованность допущений при моделировании. Разработанный способ обезвоживания дает возможность интенсифицировать процесс сушки при сохранении качественных параметров готовой продукции, что подтверждено качественным анализом.

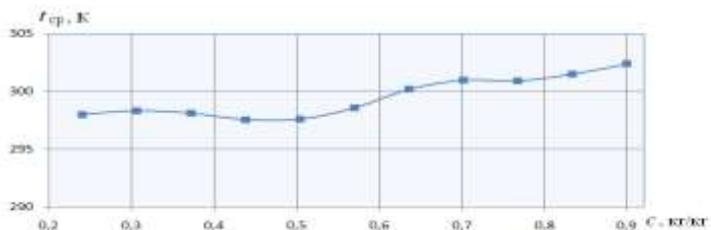


Рисунок 9 – Зависимость средней объемной температуры от содержания сухих веществ (рациональный режим)

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

В пятой главе рассмотрены вопросы практического применения результатов научных исследований и проектно-технических решений.

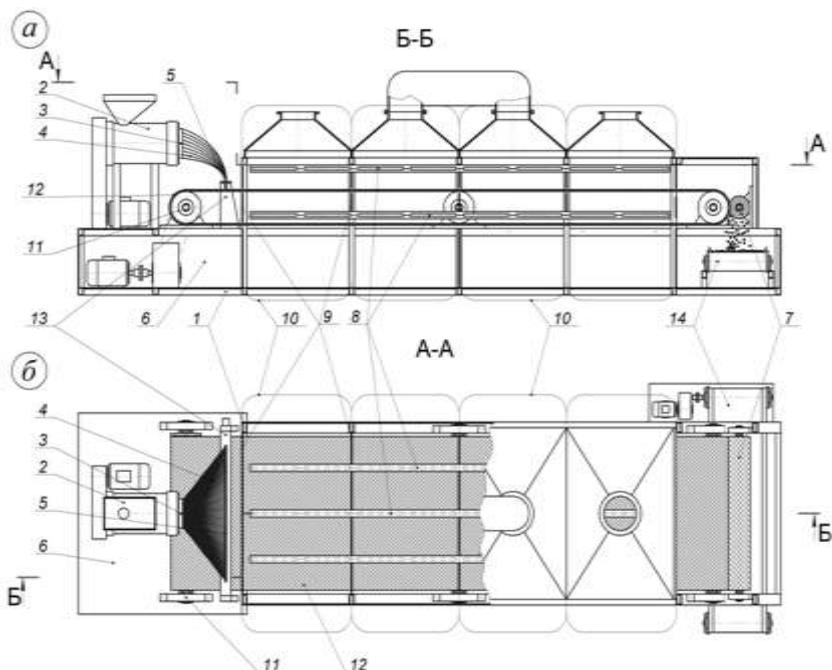


Рисунок 10 – Комплексная конвективно-радиационная сушильная установка: а – вид спереди в разрезе; б – вид сверху в разрезе; 1 – каркас; 2 – шнековый экструдер; 3 – торцевая решетка; 4 – трубопроводы; 5 – фильеры; 6 – сушильная камера; 7 – щетка цилиндрической формы; 8 – инфракрасные излучатели; 9 – перегородки; 10 – секции сушильной камеры; 11 – горизонтальный ленточный транспортер; 12 – лента; 13 – гранулятор; 14 – выводящий конвейер

Предложена конструкция (рисунок 10) комплексной конвективно-радиационной сушильной установки, которая позволяет реализовать основные стадии технологического процесса получения сухого продукта: формирование и нанесение материала на рабочую поверхность установки, сушка, сьем и вывод сухого продукта из сушильной камеры. На рисунке 11 изображены виды ленты горизонтального ленточного транспортера, представляющей собой плоскую решетку с ячейками 2, образованными жестко закрепленными перпендикулярно рабочей поверхности ленты стержнями 3. Гранулятор установки (рисунок 12) состоит из режущего блока 1 со струнами 2 и рамы 3 с электроприводом 4 для возвратно-поступательного перемещения режущего узла со струнами по выходным торцам фильера 5.

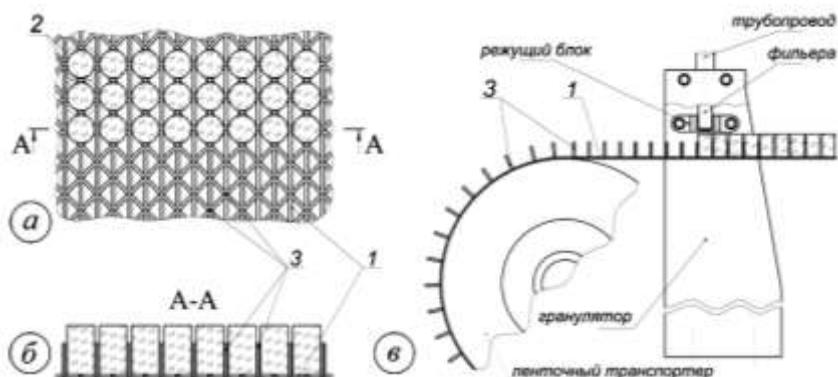


Рисунок 11 – Лента горизонтального ленточного транспортера конвективно-радиационной сушильной установки: *а* – вид сверху; *б* – вид спереди; *в* – вид сбоку; 1 – лента; 2 – ячейки; 3 – тонкие стержни одинакового размера

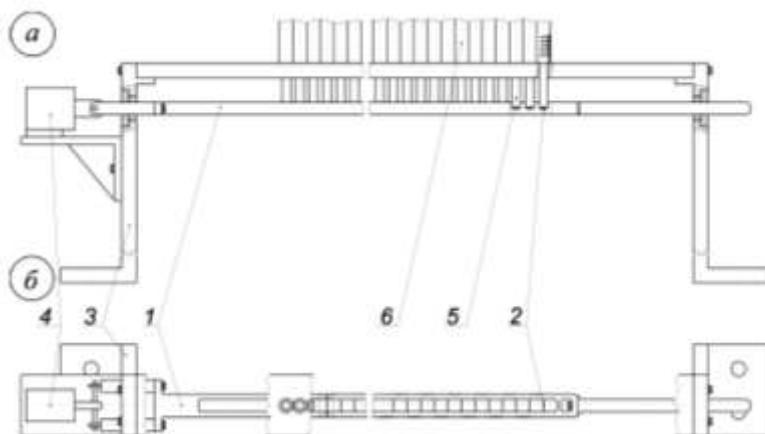


Рисунок 12 – Гранулятор комплексной конвективно-радиационной сушильной установки: *а* – вид спереди; *б* – вид сверху; 1 – режущий блок; 2 – струна; 3 – рама; 4 – электропривод; 5 – фильера; 6 – трубопровод

На конструкцию комплексной конвективно-радиационной сушильной установки получен патент на полезную модель 195336 РФ.

С использованием результатов комплекса экспериментально-аналитических исследований разработан способ конвективно-радиационной сушки желатинового бульона во вспененном и желатинизированном состоянии. Суть способа сушки желатинового бульона заключается в следующем: предварительно упаренный до концентрации сухих веществ $C=14 - 26\%$ бульон сушат во вспененном и желатинизированном состоянии, в форме штрангов с толщиной $d=3,5 - 4,5$ мм при комбинированном конвективно-радиационном энергоподводе. Конвективная составляющая: сушка материала происходит при атмосферном давлении; температура воздуха не превышает температуру желатинизации продукта и составляет $T=293 - 303$ К; влажность воздуха $W = 50 - 60\%$; скорость потока воздуха $v=3,5 - 5,5$ м/с. Радиационная составляющая: двустороннее инфракрасное облучение штрангов; плотность теплового потока, падающего с одной стороны штранга $E = 0,95 - 2,45$ кВт/м²; инфракрасное облучение штранга продукта начинают через период времени $t = 0,05 - 0,2$ ч после начала конвективной сушки.

Ключевыми особенностями способа являются объемный конвективно-радиационный энергоподвод и формирование продукта в форме штранг с толщиной, соответствующей оптически тонкому слою. Принудительной конвективный энергоподвод в данном случае необходим не только для интенсификации тепломассообмена, но и для выравнивания температуры продукта по пенослою с целью сохранения его стабильности и предотвращения плавления материала. Начало инфракрасного облучения через период времени $t=0,05..0,2$ ч после начала процесса конвективной сушки для продукта определено в ходе серии экспериментов и объясняется необходимостью предварительной стабилизации пенослоя материала в процессе конвективной сушки. Предварительно подсушенный воздухом продукт становится устойчивым к последующему инфракрасному облучению, не плавится при рациональных режимах. Максимальное значение удельного выхода сухого желатина с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени $G_{\max} = 0,998$ кг/(м²·ч) для конвективно-радиационной сушки при двустороннем инфракрасном облучении штрангов пены достигается при рациональном режиме.

Показатели качества сухого желатина соответствуют требованиям ГОСТ 11293-89 «Желатин. Технические условия»; Требованиям Технических регламентов Таможенного союза ТР ТС 040/2016 «О безопасности рыбы и рыбной продукции», ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» и др.

Представлена информация о промышленном внедрении и практическом использовании результатов исследований на предприятиях отрасли.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1) Установлены и проанализированы функциональные зависимости для расчета структурно-механических, теплофизических и гигроскопических характеристик концентратов желатина из отходов переработки рыбы. Установлено и проанализировано влияние влажности и температуры концентратов желатина из отходов переработки рыбы на их структурно-механические, теплофизические и гигроскопические характеристики.

2) Исследованы сорбционные явления при контакте концентратов желатина из отходов переработки рыбы с водой и установлены соответствующие математические зависимости для оценки видов и энергий связи влаги с сухими веществами.

3) Выполнен анализ удельных затрат тепловой энергии на сушку желатина из отходов рыбопереработки с учетом термодинамических потерь тепла. Проанализированы внутренний тепломассоперенос и фазовые превращения в процессе конвективно-радиационной сушки вспененного бульона желатина.

4) Исследованы кинетические закономерности тепломассопереноса при конвективно-радиационной сушке вспененного бульона желатина.

5) В ходе комплекса теоретических и экспериментальных исследований рекомендован способ сушки желатинового бульона, который заключается в следующем: предварительно упаренный до концентрации сухих веществ $C = 14 - 26\%$ бульон сушат во вспененном и желатинизированном состоянии, в форме штрангов с толщиной $d = 3,5 - 4,5$ мм при комбинированном конвективно-радиационном энергоподводе. Конвективная составляющая: сушка материала происходит при атмосферном давлении; температура воздуха не превышает температуру желатинизации продукта и составляет $T = 293 - 303$ К; влажность воздуха $W = 50 - 60\%$; скорость потока воздуха $v = 3,5 - 5,5$ м/с. Радиационная составляющая: двустороннее инфракрасное облучение штрангов; плотность теплового потока, падающего с одной стороны штранга $E = 0,95 - 2,45$ кВт/м²; инфракрасное облучение штранга продукта начинают через период времени $t = 0,05 - 0,2$ ч после начала процесса конвективной сушки.

6) Разработан рациональный режим сушки при котором обеспечивается максимальное значение удельного выхода сухого желатина с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени $G_{\max} = 0,998$ кг/(м²·ч) для конвективно-радиационной сушки при двустороннем инфракрасном облучении штрангов пены при следующих параметрах: начальная концентрация сухих веществ в продукте $C = 0,24$ кг/кг; начальный диаметр штранга пены $d_n = 4$ мм; температура $T = 292 - 295$ К, влажность $W = 50 - 60\%$ и скорости сушильного агента $v = 3,5 - 5,5$ м/с; плотность теплового потока, падающего с одной стороны штранга $E = 2,45$ кВт/м². Данный режим является рациональным.

7) Реализована математическая модель внутреннего тепломассопереноса при конвективно-радиационной сушке желатинового бульона с учетом свойств материала, технологических, термодинамических параметров процесса и кинетических закономерностей влагоудаления.

8) Разработана конструкция комплексной конвективно-радиационной сушильной установки и получен патент на полезную модель 195336 РФ для практического внедрения.

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

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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

В периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Макаров, А.В.** Разработка рациональных режимов сушки при производстве желатина на основе отходов рыбопереработки [Текст] / А.В. Макаров, Ю.А. Максименко, И.Ю. Алексанян, Э.П. Дяченко // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК - продукты здорового питания. 2019. № 2 (28). С. 56-63.
2. **Макаров, А.В.** Исследование конвективно-радиационной сушки вспененного желатинового бульона из отходов переработки рыбы [Текст] / А.В. Макаров, Ю.А. Максименко, Э.П. Дяченко // Техника и технология пищевых производств. 2019. Т. 49. № 4. С. 594-603.
3. Дяченко, Э.П. Изучение терморadiационных и оптических характеристик пенослоя желатина как объекта инфракрасной сушки [Текст] / Э.П. Дяченко, **А.В. Макаров**, Ю.А. Максименко // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК - продукты здорового питания. 2019. № 3 (29). С. 104-110.
4. **Макаров, А.В.** Исследование оптических и терморadiационных характеристик вспененного раствора желатина из отходов переработки рыбы [Текст] / А.В. Макаров, Ю.А. Максименко, Э.П. Дяченко // Известия КГТУ. 2020. № 56. С. 88-96.

Статьи и материалы конференций:

5. **Макаров, А.В.** Разработка способа сушки желатинового бульона при производстве сухого желатина [Текст] / А.В. Макаров, Ю.А. Максименко, Э.П. Дяченко // Международная научно-практическая конференция «Инновационные процессы в современной науке, тенденции развития». – Уфа, 28 сентября 2019. – С. 31-36.
6. **Макаров, А.В.** Изучение оптических и терморadiационных характеристик вспененного желатинового бульона из отходов переработки рыбы [Текст] / А.В. Макаров, Ю.А. Максименко, Э.П. Дяченко // Всероссийская междисциплинарная научная конференция Наука и практика – 2019. Астрахань, 21-26 октября 2019. С. 99.
7. **Макаров, А.В.** Комплексная конвективно-радиационная сушильная установка для термолabileльных материалов [Текст] / А.В. Макаров, Ю.А. Максименко, Э.П. Дяченко // Всероссийская междисциплинарная научная конференция Наука и практика – 2019. Астрахань, 21-26 октября 2019. С. 100.
8. **Макаров, А.В.** Изучение интенсивности конвективно-радиационной пеносушки желатинового бульона из отходов переработки рыбы [Текст] / А.В. Макаров, Ю.А.

Максименко, Э.П. Дяченко, К.Т. Хуе // Международный научно-технический симпозиум «Вторые международные Косыгинские чтения, приуроченные к 100-летию РГУ имени А. Н. Косыгина» на Международном Косыгинском Форуме-2019 «Современные задачи инженерных наук». Москва, 29 октября-01 ноября 2019. С. 61-63.

Патент:

9. Пат. 195336 РФ, МПК F26B 17/04, F26B 3/30 / Комплексная конвективно-радиационная сушильная установка [Текст] / Ю.А. Максименко, Э.П. Дяченко, О.А. Разин, М.И. Иванова, **А.В. Макаров**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «АГТУ»). – N 2019120145; заявл. 26.06.2019; опубл. 23.01.2020, Бюл. N3.

Подписано в печать « 07» 12. 2020 г. Формат 60x84 1/16
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ _____
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «АГТУ»)
Типография ФГБОУ ВО «АГТУ»
Адрес типографии
г. Астрахань, ул. Татищева, 16 ж.