

На правах рукописи



Яснов Андрей Сергеевич

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ
РЕШЕНИЙ СУШКИ ПЕЧЕНИ СОМА В ПОЛЕ СВЧ**

Специальность: 4.3.3. Пищевые системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ставрополь – 2026

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Нугманов Альберт Хамед-Харисович

Официальные оппоненты:

Агафонов Валерий Петрович
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории технологии колбасно-кулинарных продуктов на основе мяса птицы и яиц «Всероссийский научно-исследовательский институт птицеперерабатывающей промышленности» – филиал федерального государственного бюджетного научного учреждения федерального научного центра «Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт птицеводства» Российской академии наук

Шахов Сергей Васильевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий», профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский арктический университет»

Защита диссертации состоится «08» июня 2026 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.398.07 при ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» по адресу: 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, корп. 20 ауд. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» по адресу: 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1 и на сайте: <https://ncfu.ru/upload/medialibrary/cb2/nwxkkrndbt6gwhqt12kwt6u8d6h592bt/Dissertatsiya-YAsnov-Andrey-Sergevich.pdf>

С авторефератом можно ознакомиться по адресу: <https://ncfu.ru/nauka/dissertatsionnye-sovety/obyavleniya-o-zashchite-dissertatsiy/34917/>

Автореферат разослан « ___ » _____ 202__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.398.07
кандидат технических наук, доцент



Д.С. Мамай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Опираясь на стратегический план развития рыбохозяйственной отрасли в нашей стране до 2030 года, утвержденный Правительством РФ 26 ноября 2019 г. № 2798-р, а также на Стратегию развития пищевого машиностроения РФ до 2030 года, утвержденную Правительством РФ 30 августа 2019 г. № 1931-р, следует, что одним из превалирующих его ориентиров в научно-техническом и технологическом аспектах служит рациональное природопользование, которое предопределяет применение высокотехнологичных процедур переработки пищевых сырьевых материалов, а также рациональную целевую утилизацию вторичных ресурсов. Проблему накопления отходов промышленными предприятиями поднимал и президент РФ Владимир Владимирович Путин. Во время пленарной сессии Петербургского Международного Экономического Форума в 2025 году президент призвал их руководителей к запуску специальных проектов по переработке накопленных промышленных отходов, подчеркивая их потенциал для экономического и экологического развития страны.

Одним из продуктов, который в настоящее время утилизируется в качестве отходов, но при этом может представлять производственную ценность является печень сома обыкновенного (*Silurus glanis*). Печень является уникальным продуктом с богатым химическим составом. Биологическая ценность белка, содержание которого в печени сома составляет от 20 до 25%, является одним из значимых критериев пищевых продуктов. Потенциальная ценность белковых комплексов, в частности, печени сома с биологической точки зрения равна 76,69%, что обусловлено высокой степенью сбалансированности незаменимых аминокислотных соединений. Печень включает большое количество полиненасыщенных жирных кислот омега-3 и омега-6, незаменимых аминокислот таких как валин, изолейцин, лейцин, метионин, треонин, триптофан, фенилаланин, лизин, витамины А и Е, а также макро- и микроэлементы – фосфор, железо, кобальт, цинк и другие элементы.

Традиционный подход к использованию печени сома ограничивается в лучшем случае производством низкокачественных кормов, в худшем печень просто утилизируется или выбрасывается на свалки. Отсутствие специализированных технологий переработки печени приводит не только к утрате ценных витаминов и питательных веществ, но также лишает производителей дополнительной прибыли, и из-за необходимости утилизации оказывает экологическую нагрузку на региональные природные комплексы. В частности, за прошедшие 3 года вылов частиковых видов рыб из внутренних водоемов только Астраханской области остается стабильным и ежегодно составляет ориентировочно 55 тыс. тонн. По данным Волго-каспийского территориального управления Росрыболовство в целях промышленного рыболовства во внутренних водоемах Астраханской области и в Каспийском море промышленниками ежегодно добывается более 5 тысяч тонн сомов. А если учесть процентное соотношение печени в соме, составляющей от 1,5% до 5% от массы рыбы, то получается, что за период 2022-2024гг. не был использован потенциал печени порядка 750 тонн.

Вышеизложенные доводы показывают, что печень сома является перспективным сырьем для дальнейшей переработки не только с целью производства пищевой продукции массового потребления, но и как источник для получения различных биологически активных и ценных компонентов, а, следовательно, выявление перспективного способа сушки печени с целью сохранения ее нативных

свойств и дальнейшей промышленной переработки актуально и требует научного обоснования.

Степень разработанности. Исследованиям, направленным на изучение производства продуктов пищевого, кормового и технического назначения из вторичного рыбного сырья посвящены работы ученых: Л.С. Абрамова, М.П. Андреева, Л.В. Антипова, Л.С. Байдалинова, Н.П. Боева, О.В. Бредихина, В.А. Гроховского, О.П. Дворянинова, Н.В. Долганова, Е.Е. Иванова, Г.И. Касьянова, О.Я. Мезенова, М.Д. Мукатова, Л.К. Петриченко, Е.Н. Харенко, Ю.А. Фатыхова, М.Е. Цибизовой, G. Abbas, K.M. Brander, P.B. Crean, J.T.R. Nickerson, R. Stauffer Jay и др.

Исследования в области сушки, термовлажностной обработки и в некоторых смежных областях по исследуемой тематике можно представить работы таких ученых как: А.С. Гинзбурга, А.В. Лыкова, Г.К. Филоненко, П.А. Ребиндера, И.А. Погова, И.Ю. Александяна, Е.П. Кошенова, А.Н. Острикова, Т. Kudra, A.S. Mujumdar, James R. Couper и W. Roy Penny, Gavin P. Towler и Ray K. Sinnott и др.

При изучении процессов и их аппаратурного оформления, составляющих технологию получения продуктов из вторичного рыбного сырья с целью ее усовершенствования, особое внимание уделяется выбору и анализу параметров, влияющих на продолжительность технологических операций для выявления рациональных интенсивных режимов обработки объекта исследования.

Цель и задачи исследования.

Целью работы является научное обоснование и разработка способа микроволновой сушки печени сома обыкновенного (*Silurus glanis*), добытого в Волго-Каспийском бассейне, а также его аппаратурного оформления, для создания технологии сухих пищевых ингредиентов из вторичных биологически ценных рыбных ресурсов.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать данные литературных источников на предмет современного состояния и перспектив развития технологии промышленной переработки отходов рыбной промышленности, в частности внутренностей сома обыкновенного, в аспекте выработки из них биологически ценных пищевых ингредиентов;

- определить и математически аппроксимировать зависимости теплофизических, гигроскопических, диэлектрических и плотностных характеристик печени сома, как объекта микроволновой сушки, при реальных температурных и влажностных диапазонах, провести термодинамический анализ статических закономерностей процесса сорбции им влаги;

- изучить и проанализировать кинетические закономерности микроволнового обезвоживания рыбного вторичного сырья и провести их математическую аппроксимацию;

- решить математическую модель микроволновой сушки печени сома обыкновенного, адаптированную к объекту исследования, рекомендовать на ее основе, а также с учетом данных ранее проведенных исследований, рациональные режимные параметры организации процесса обезвоживания вторичного рыбного сырья;

- провести исследования техномических показателей печени сома, как вторичного рыбного сырья, обобщить информацию и аккумулировать сведения для практического использования, определить особенности качественного состава веществ, входящих во вторичное рыбное сырье, оценить его безопасность, пищевую и биологическую ценность;

- дать рекомендации по практическому использованию результатов исследований сушки печени сома, а также по аппаратурному оформлению этой процедуры.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

- для печени сома обыкновенного (*Silurus glanis*), добытого в Волго-Каспийском бассейне, экспериментально установлены и математически описаны зависимости теплофизических, гигроскопических, диэлектрических и плотностных характеристик от влажности в диапазоне от 5% до 68%, адекватных для среднеобъемных температур сырья: 5...25°C – для теплофизических свойств и плотности, 25...40°C – для гигроскопических свойств и 60...100°C – для диэлектрических свойств;

- разработан и научно обоснован рациональный способ микроволновой сушки печени сома в тонком слое, подкрепленный оригинальной математической моделью этого процесса, адаптированной к специфике объекта сушки с учетом объемного подвода энергии от микроволнового излучения частотой 2450 МГц при следующих параметрах: удельная объемная мощность СВЧ-воздействия 2,14...4,29 МВт/м³, толщина слоя ~1.5 см, конечная влажность ~5%, максимальная температура материала ~70°C, продолжительность обезвоживания ~30 мин;

- установлена взаимосвязь между режимными параметрами микроволновой сушки и его удельной производительностью, экспериментально показано, что увеличение удельной объемной мощности с 2,14 МВт/м³ (90 Вт) до 4,29 МВт/м³ (180 Вт) приводит к росту удельной производительности сушки печени в 1,5 раза с ~22 кг/(м²·ч) до ~33 кг/(м²·ч);

- доказано, что разработанный режим микроволновой сушки обеспечивает максимальное сохранение нативных свойств и биологической ценности в сухой печени сома, подтверждена сохранность уникального состава жирных кислот (включая полиненасыщенные ω-3 и ω-6), полного спектра незаменимых аминокислот, витаминов А и Е, а также микроэлементного профиля, что открывает возможность ее использования в качестве ценного белково-липидного ингредиента с высокой биологической активностью для создания различных пищевых продуктов и биологически активных добавок к пище.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость диссертационного исследования состоит в значительном расширении, обобщении и систематизации информации о химическом составе, пищевой и биологической ценности печени сома, как вторичного рыбного сырья, которая является основой получения новых научных данных как для практического использования, так и в научных целях. Полученные математические зависимости от влажности теплофизических, гигроскопических и диэлектрических характеристик печени сома в заданных температурных диапазонах вносят дополнительный вклад в теорию теплопереноса применительно к рыбным субпродуктам. Результаты термодинамического анализа сорбции влаги и кинетические закономерности микроволнового обезвоживания углубляют понимание механизмов удаления влаги в поле СВЧ и создают основу для рационализации и масштабирования процесса.

Практическая значимость исследования определяется тем, что в ходе исследования разработан рациональный способ микроволновой сушки печени сома с целью получения сухого пищевого ингредиента, предложены оригинальные технические решения для организации микроволновой сушки рыбного субпродукта по

разработанному способу, обеспечивающие минимальные энергозатраты и экологическую безопасность проведения технологического процесса, новизна которых подтверждена патентом на полезную модель № 231633 РФ.

Полученные результаты исследования и рекомендации по их практическому использованию, представленные в работе, планируется реализовать на пищевых предприятиях Астраханской области. Акты использования результатов исследования представлены в диссертации.

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработан комплект технической документации ТУ 10.20.22-012-00471704-2025 на производство печени сома сушеной.

Методология и методы исследования.

В данном научном исследовании использовались как традиционные, так и оригинальные эмпирические методы, и экспериментальные установки. Доля влаги в сырье выявлялась гравиметрическим способом, опирающемся на определение варьирования массы пробы до и после ее сушки. Физическая плотность выявлялась пикнометрическим методом. Теплофизические характеристики находились зондовым экспресс методом, основанном на тепло-инерционных свойствах термодатчика и объекта исследования. Моделирование процесса сушки проводилось, опираясь на дифференциальное уравнение теплопереноса, адаптированное к объекту обработки, решение модели осуществлялось методом конечных разностей. Определение гигроскопических характеристик осуществлялись тензометрическим способом. Термодинамический анализ процесса сорбции проводился методом, основанным на определении составляющих в уравнении свободной энергии Гиббса. Достоверность полученных результатов подтверждались статистической обработкой их результатов, при пятикратной повторности опытов.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты анализа литературных источников на предмет современного состояния и перспектив развития технологии промышленной переработки отходов рыбной промышленности в РФ, обосновывающие целесообразность разработки способа микроволновой сушки печени сома обыкновенного, добытого в Волго-Каспийском бассейне, а также его аппаратного оформления, с целью создания технологии сухих пищевых ингредиентов из вторичных биологически ценных рыбных ресурсов;

- полученные математические зависимости теплофизических, гигроскопических, диэлектрических и плотностных характеристик печени сома от ее влажности в реальных диапазонах (влажность 5...68%, температура 5...100°C), необходимые для расчета и рационализации процесса микроволновой сушки;

- полученные кинетические закономерности и выявленные особенности процесса микроволновой сушки печени сома в тонком слое (отсутствие периода постоянной скорости, нелинейный отклик на увеличение мощности, предельная температура продукта ~70°C), а также адаптированная математическая модель данного процесса;

- научно обоснованные рациональные параметры проведения микроволновой сушки (удельная объёмная мощность СВЧ-воздействия 2,14...4,29 МВт/м³, толщина слоя ~1.5 см, конечная влажность ~5%) и предложение по аппаратному оформлению процесса в виде комбинированной (конвективно-микроволновой) петлевой сушильной установки;

- результаты анализа химического состава, пищевой ценности и безопасности

печени сома обыкновенного в нативном и высушенном состоянии, подтверждающая ее высокую пищевую и биологическую ценность и безопасность, а также рекомендации по практическому использованию результатов диссертационного исследования.

Достоверность полученных результатов обусловлена: сходимостью в допустимых для пищевой промышленности модельных и эмпирических данных с данными натурального эксперимента; соответствие полученных научно-технических результатов в данном исследовании общепризнанным и апробированным частным научным данным; опытно-конструкторским и внедренческим опытом реализации полученных результатов; обоснованной и понятной трактовкой физического смысла описываемых в работе явлений, которая не входит в конфликт с опубликованным результатами исследований по той же тематике.

Апробация результатов диссертационного исследования.

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на различных международных конференциях и форумах, в частности: II Международной научно-практической конференции (г. Петрозаводск, 15 ноября 2022г), LXVI Международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения» (г. Москва, 18 ноября 2022г), Восьмой Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые и массообменные технологии (сушка, тепловые и массообменные процессы) СЭТМТ – 2023» (г. Москва, 17-19 октября 2023г), XVIII Международном научно-исследовательском конкурсе «Научная статья года» (г. Пенза, 15 января 2025г), XXIII Международной научно-практической конференции «Природноресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России» (г. Пенза, 20-21 января 2025г), III Международной научно-практической конференции «Актуальные экологические проблемы и экологическая безопасность в современных условиях» (г. Саратов, 20-21 апрель 2025г), 69-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета, посвященная 95-летию со дня основания АИРХ-АТИРПИХ-АГТУ (г. Астрахань, 26–30 мая 2025г).

Итоги научных изысканий по теме диссертации были удостоены различных наград. Результаты исследований диссертации легли в основу достижений, отмеченных премией «Человек труда» на региональном уровне.

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 10 научных работ, в их числе 4 работы, которые включены в перечень ВАК РФ, получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, включающих аналитический обзор литературы, результатов собственных исследований, выводов, заключения, списка литературы (140 наименований) и 16 приложений. Диссертация изложена на 185 страницах. Работа содержит 24 таблиц и 42 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлена общая информация о существующих технологиях получения пищевой продукции и биологически-активных соединений из

рыбного сырья, приведены примеры в мировой практике обнаружения и выделения из печени водных организмов различных биологически активных веществ, оценены перспективы использования рыбного субпродукта – печени сома в технологии производства биологически активных веществ, приведена оценка объемов добычи сома, обоснован выбор процесса микроволновой сушки на основе анализа известных методов переработки подобных продуктов.

Во второй главе представлены объект, методы и структурная схема диссертационного исследования.

На рисунке 1 представлена схема диссертационной работы, посвященной научному обоснованию технологии и технических решений сушки печени сома.

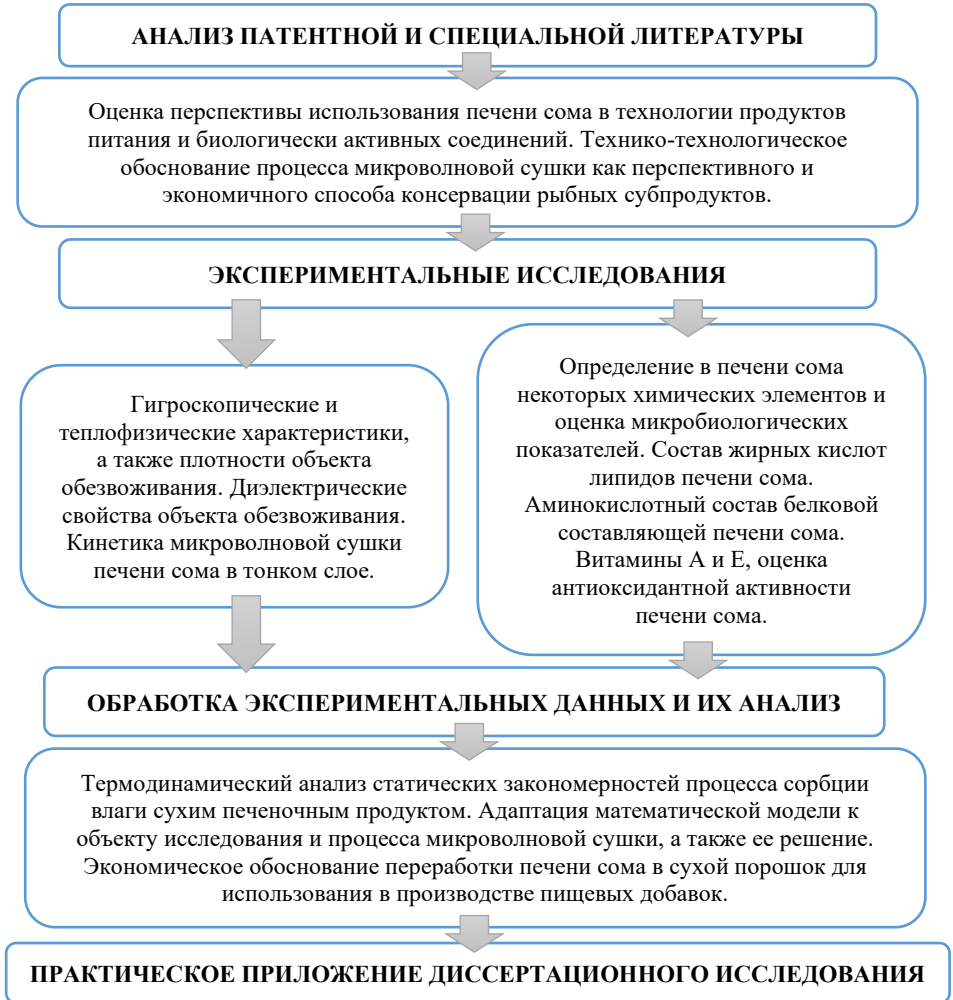


Рисунок 1 – Структурная схема диссертационного исследования

Третья глава содержит результаты экспериментального определения гигроскопических, теплофизических, диэлектрических характеристик и физической плотности объекта обезвоживания при температурах в диапазоне проведения тепло-массообменной обработки в зависимости от ее влажности, а также термодинамического анализа статических закономерностей процесса сорбции влаги сухим продуктом.

Исходная величина содержания влаги в печени сома $W = 68\%$ определялась экспериментальным путем, а равновесная (W_0) – посредством тензометрического метода Ван-Бамелена. Характеристика состояния влаги в сырье и соответствующих параметров ее переноса дается на основе анализа явлений адсорбции, развивающихся на поверхности раздела фаз (влажный воздух – твердое тело).

После серии эксcrementов построены изотермические кривые сорбции печени при температурах 298К, 313К. На рисунке 2 для изотермы сорбции при 313К представлены сингулярные точки, которые соответствуют критическим значениям содержания влаги в материале и информируют о видоизменении механизма сорбции. Точка W_m , полученная пересечением нормали из второй сингулярной точки на изотерме к оси абсцисс характеризует переход от влаги, связанной полимолекулярной адсорбцией, к капиллярно- и осмотически- связанной влаге. На 1-ой из обозначенных стадий адсорбируется мономолекулярный слой, который сильно связан с сухим скелетом, что минимизирует микробиологическую активность. Это позволило сделать вывод о том, что для высушенной печени наиболее целесообразной конечной влажностью является та, которая граничит с адсорбционно-связанным интервалом, т.е. величина рациональной конечной влажности принимает значение 5%.



Рисунок 2 – Выделение стадий обезвоживания на изотермических кривых сорбции, представленных в полулогарифмической координатной сетке

исследования, пикнометрическим методом. Ниже представлена математическая зависимость ρ объекта сушки на участке температур от 5°C до 25°C:

$$\rho = 460,32W + 722,98, \quad (1)$$

где W – влажность образца, кг/кг.

Теплофизические характеристики (ТФХ) печени сома остаются практически постоянными в диапазоне положительных температур от 0°C до близкой к 25°C, поэтому являлось достояточным проведение экспериментов по нахождению значений коэффициента теплопроводности λ (Вт/(м·К)), температуропроводности a (м²/с) и удельной теплоемкости c_m (Дж/(кг·К)), известным зондовым экспресс методом, описание которого приводится в диссертации. В итоге для печени при влажности 68% и 45% были получены значения ТФХ печени сома, представленные в таблице 1.

Результаты по экспериментальному определению ТФХ объекта исследования

$W, \%$	$c_M, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$\alpha \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
68	3659	1,13	0,428
45	2781	1,06	0,274

Выявление зависимостей ТФХ исследуемого объекта для диапазона влажности $0,05 \leq W \leq 0,68$ кг/кг и в интервале температур от 5°C до 25°C проводилось расчетным путем. Ниже представлены полученные математические зависимости ТФХ объекта сушки $0,05 \leq W \leq 0,68$ кг/кг и в интервале температур от 5°C до 25°C :

$$c_M = 3596,5W + 1234,9; \quad (2)$$

$$\lambda = 0,412W^2 + 0,204W + 0,0988; \quad (3)$$

$$a(W) = \frac{\lambda(W)}{c_M(W)\rho(W)}; \quad (4)$$

где W – влажность образца, кг/кг.

Для проведения исследований требовалось определить значение коэффициента теплоотдачи α от высушиваемого объекта к воздуху при его свободной конвекции. Для определения α при свободной конвекции в неограниченном объеме наибольшее распространение получила эмпирическая формула вида:

$$Nu = B \cdot (Gr \cdot Pr)^n, \quad (5)$$

где Nu , Gr , Pr – безразмерные критерии Нуссельта, Грасгофа и Прандтля; B и n – эмпирические константы, значения которых приведены в специальной литературе, зависящие, в частности от результата перемножения двух комплексов Gr и Pr .

Полученное значение α (расчет приводится в диссертации) находится в допустимых пределах при контакте с воздушной средой и ее естественной конвекцией.

Также важно знать, как рассматриваемый объект обезвоживания взаимодействует с электромагнитным полем, в котором он подвергается его воздействию, чтобы обеспечить надлежащую конструкцию микроволнового генератора при промышленной реализации сушильной технологии. Экспериментальное исследование диэлектрических свойств объекта обезвоживания необходимо для понимания механизма энергопоглощения пищевой матрицы печени сома и тепломассообмена во время процесса обезвоживания с использованием микроволнового излучения. Данное взаимодействие описывается комплексной диэлектрической проницаемостью материала ε , Ф/м, представленное следующими зависимостями:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r; \quad (6)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' + i\varepsilon_r''; \quad (7)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}; \quad (8)$$

где ε_0 , относится к диэлектрической проницаемости в безвоздушном пространстве, ε_r – к комплексной диэлектрической проницаемости.

Уравнение (7) показывает действительную часть комплексной диэлектрической проницаемости ε_r' , которая соответствует энергии, запасенной в материале при приложении электрического поля, а мнимая часть $i\varepsilon_r''$, соответствующая преобразованию энергии в тепло. Отношение между мнимой и действительной частью (8) равно $\tan \delta$ (тангенсом потерь), по которому оценивают способность пищевой матрицы поглощать микроволновую энергию и рассеивать тепло окружающими молекулами. Этот показатель отвечает за эффективность

микроволнового нагрева. Также показатель $\tan \delta$ играет важную роль при определении глубины проникновения микроволновой мощности в объект (d_p):

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon_r' [\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1]}} \quad (9)$$

где c – скорость света в вакууме, м/с; f – частота излучения, Гц.

Для описания изменения диэлектрической проницаемости ε_r' , и ее мнимой части ε_r'' , в интервале температур от 60°C до 100°C и влажности от 95% до 5% можно применить линейную закономерность. В этом случае будет достаточным экспериментально определить ε_r' , и ε_r'' для исходной сырой печени и конечного сухого продукта, а промежуточное значение этих величин, с допустимой для инженерных расчетов точностью, определяется, если линейно аппроксимировать искомые свойства между крайними ее значениями, которые соответствуют начальному сырью, имеющего влажность 68% и полученному из него порошку с влажностью 5% в интервале температур от 60°C до 100°C.

Результат опытных исследований определения ε_r' и ε_r'' , через $\tan \delta$, для исходной сырой печени, имеющей влажность 68% и конечного сухого продукта, имеющего влажность 5%, при использовании известного метода резонаторных возмущений на частоте 2,45 ГГц и в интервале температур от 60°C до 100°C для исходной печени и конечного продукта представлены в таблицах 2 и 3 соответственно.

Таблица 2

Результат экспериментальных исследований по определению ε_r' , и ε_r'' через величину $\tan \delta$ для исходной сырой печени

Температура, °C	Диэлектрическая проницаемость ε_r'	$\tan \delta$	Мнимая часть ε_r''
60	73,12	0,194	14,19
70	70,89	0,203	14,39
80	68,14	0,223	15,19
90	67,28	0,230	15,47
100	65,27	0,249	16,25

Таблица 3

Результат экспериментальных исследований по определению ε_r' , и ε_r'' через величину $\tan \delta$ для конечного сухого продукта

Температура, °C	Диэлектрическая проницаемость ε_m	Диэлектрическая проницаемость ε_r'	$\tan \delta$	Мнимая часть ε_r''
60	6,14	16,23	0,259	4,20
70	5,86	15,30	0,309	4,73
80	5,69	14,74	0,336	4,95
90	5,37	13,69	0,374	5,12
100	5,32	13,53	0,386	5,22

Уравнениями 10 и 11 представлены линейные зависимости d_p от ε температуры в диапазоне 60...100°C, соответственно для влажности 0,68 кг/кг и 0,05 кг/кг.

$$d_p = -0,0051T + 1,4938; \quad (10)$$

$$d_p = -0,0117T + 2,5132; \quad (11)$$

где T – температура образца, °C.

Учитывая, что исследуемый процесс сушки протекает, в том числе и в области гигроскопического состояния, необходим термодинамический анализ статических закономерностей тепло и массообмена для выявления влияния характера связывания влаги с сухим остатком на качество получаемого сухого продукта, при снижении его влажности. Потенциалом переноса парообразной влаги в среде влажного воздуха является химический потенциал. В гигроскопическом состоянии потенциал переноса влаги (θ) для влажных материалов считается приблизительно равным по абсолютной величине химическому потенциалу μ :

$$|\theta| = |\mu| = RT \ln A_W, \quad (12)$$

где R – константа, равная работе расширения одного моля идеального газа в изобарном процессе при увеличении температуры на 1К, $R = 8,314$ Дж/(моль·К); T – температура среды, К; A_W – активность воды.

Для переноса влаги в виде жидкости в области гигроскопического состояния химический потенциал представляется как функция температуры тела и влагосодержания:

$$|\mu| = E = \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_0} \right)_T = RT \frac{p_s}{p_u} = -RT \ln A_W, \quad (13)$$

где E определяет свободную энергию одного моля адсорбированного вещества в данном слое; p_s – давление насыщенного пара свободной воды над плоской поверхностью, Па; p_u – давление равновесного пара воды при той же температуре над материалом данной степени оводнения, Па.

Статика процессов взаимодействия с водой и анализ изотерм сорбции позволяет установить и количественно оценить характер изменения термодинамических составляющих уравнением Гиббса-Гельмгольца для изобарно-изотермического процесса: $\Delta F = \Delta E - T \Delta S$ ($\Delta E, \Delta S$ – соответственно изменения внутренней энергии (энтальпии) и энтропии, по влагосодержанию W_0 при $P, T = const$), продифференцировав которое, получим:

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_0} \right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial W_0} \right)_{T,P} - T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_0} \right)_{T,P}, \quad (14)$$

где энтропийная составляющая свободной энергии $T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_0} \right)_{T,P}$ для большинства продуктов играет значительную роль.

Продифференцировав выражение (14) по T , учитывая выражение (13) выражение для дифференциального изменения энтропии связанной воды будет иметь вид:

$$\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_0} \right)_{T,P} = \frac{-\partial(RT \ln A_W)}{\partial T} = -R \frac{\partial(T \ln A_W)}{\partial T}. \quad (15)$$

Для определения величины дифференциального изменения связанной энергии от влажности материала, пользуясь соотношением (15), необходимо чтобы $\ln A_W$ зависел не только от влажности, но и от температуры. Такая возможность очевидна при наличии изотермы сорбции этого же материала, но при другой температуре, если принять, что смещение изотерм при различных температурах носит линейный характер. В этом случае обобщенная зависимость $\ln A_W = f(W_0, T)$ для линейного участка имеет следующий вид:

$$\ln A_W = (aT + b)W_0 + (cT + d), \quad (16)$$

где a, b, c, d – эмпирические коэффициенты.

Продифференцировав полученные уравнение (16) по температуре и умножив

изменение $\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}$ на T , найдем искомое изменение энергии. На основе полученных уравнений и данных построены графические зависимости изменений энергий от влажности материала, которые представлены на рисунке 3.

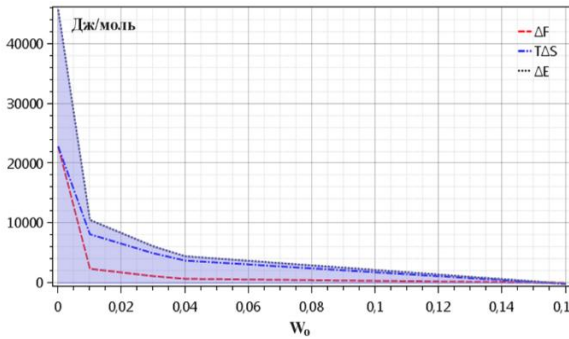


Рисунок 3 – Изменение свободной $\frac{\partial \Delta F}{\partial W_0}$, связанной $T \frac{\partial \Delta S}{\partial W_0}$ и внутренней $\frac{\partial \Delta E}{\partial W_0}$ энергии в зависимости от влажности материала

Расчет дифференциальных изменений связанной энергии сорбции для различных температур необходим для выявления величины удельной теплоты образования пара r , (Дж/кг), т.к. при моделировании теплопереноса зависимость $r = f(W, T)$ входит в дифференциальное уравнение по переносу тепла. В процессе удаления влаги, теплоту испарения r , связанной с материалом, можно представить, как сумму: теплоты испарения свободной влаги r' , теплоты смачивания $r_{см}$ и теплоты $r_{энт}$, учитывающей энтропийную составляющую в уравнении (14):

$$r = r' + r_{см} + r_{энт}; \quad (17)$$

$$r' = 3118,458 \cdot 10^3 - 2286T; \quad (18)$$

$$r_{см} = \left| 55,556 \cdot \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_0} \right)_{T,P} \right|; \quad (19)$$

$$r_{энт} = \left| 55,556 \cdot T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_0} \right)_{T,P} \right|. \quad (20)$$

Теплота парообразования r' , определяется из линейной зависимости от температуры насыщенного пара в диапазоне полученных изотерм сорбции $T = 313 \dots 298\text{K}$, а также из анализа данных о термодинамических свойствах и коэффициентах переноса воды и водяного пара (18). Теплота смачивания $r_{см}$ определяется дифференциальным изменением свободной энергии изотермического обезвоживания (19). Теплота $r_{энт}$, учитывающая энтропийную составляющую в уравнении Гиббса-Гельмгольца, описывается зависимостью (20).

В четвертой главе представлены технологические исследования качественного состояния сушки объекта исследования за счет определения кинетики проведения микроволновой сушки печени сома в тонком слое и проведения моделирования этого процесса, с этой целью предложена технологическая схема сушильной установки, предназначенной для высушивания печени сома в поле СВЧ, с учетом выявленных позитивных сторон их применения на практике.

Кинетические закономерности влагоудаления при микроволновой сушке выявлялись опытным путем, используя вероятностно-статистические методы планирования и обработки экспериментальных данных, где для обеспечения

потребительских свойств конечного продукта соблюдались технологические и временные ограничения. Результат проведенных экспериментальных исследований процесса микроволновой сушки печени сома и расчета удельной производительности съема сухого продукта с единицы рабочей площади в час Y , кг/(м²·ч) представлен в таблице 4.

Таблица 4

Данные по экспериментальному исследованию процесса сушки на опытной установке		
N , Вт	τ , мин	Y , кг/(м ² ·час)
90	42	21,95
180	28	32,70
270	17	54,89
360	очаговое подгорание продукта	
Дополнительные сведения	Площадь используемой чашки Петре – 0,00283м ² ;	
	Объем используемой чашки Петре – 0,000042м ³ ;	
	Высота используемой чашки Петре – 15 мм;	
	Масса одновременной загрузки сырья – 0,0435 кг.	

Экспериментальные исследования показали, что во время сушки при использовании мощности излучения 180 и 270 Вт датчик контроля температуры фиксировал ее предельное значение на уровне 90...100°C, однако исключать вариант, в котором мощность 180 Вт, не резонно, т.к. продолжительность обезвоживания составляло менее 30 минут, а за это время, есть вероятность, что температура объекта сушки не будет превышать 70°C.

Анализ механизма внутреннего массопереноса в процессе влагоудаления производился на основании функциональной зависимости скорости обезвоживания от содержания сухих веществ в продукте ($C = 1 - W$). Для удобства математической аппроксимации кривых сушки и описания кривой скорости сушки, были получены обратные зависимости: $\tau = f(C)$, которые представлены в виде математических уравнений, соответственно для мощности излучения 90 Вт (21) и 180 Вт (22).

$$\tau = 23431C^3 - 44597C^2 + 29666C - 5564,4; \quad (21)$$

$$\tau = 16794C^3 - 31744C^2 + 20776C - 3848,5; \quad (22)$$

где τ – продолжительность сушки, с; C – содержание сухих веществ в печени, кг/кг.

После дифференцирования и математического преобразования зависимостей (21, 22) получены уравнения, описывающие кривые скорости обезвоживания печени сома для двух вариантов проведения процесса при мощности излучения 90 Вт и 180 Вт соответственно (23) и (24).

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{1}{70293C^2 - 89194C + 29666}; \quad (23)$$

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{1}{50382C^2 - 63488C + 20766}. \quad (24)$$

Общая характеристика кривых скорости сушки представлена на рисунке 4. На кривой скорости сушки отчетливо выделяются два периода обезвоживания, что не противоречит основным положениям теории влагоудаления. Первый период соответствует росту скорости обезвоживания до максимума в результате удаления преимущественно свободной влаги с поверхности объекта исследования при заданных режимных параметрах микроволнового влагоудаления. Во втором периоде, после достижения максимальной скорости, наблюдается ее падение, в том числе из-за

снижения содержания влаги в объекте сушки. Как видно из графических закономерностей увеличение мощности микроволновой печи привело к значительному увеличению скорости сушки, а значит сокращается время сушки.

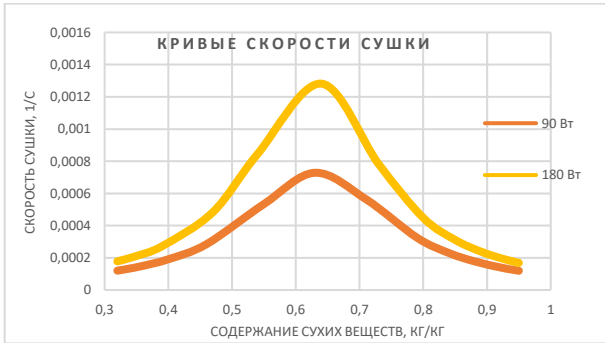


Рисунок 4 – Кривые скорости микроволновой сушки печени сома при толщине высушиваемого слоя 1,5 см и частоте излучения 2,45 ГГц

Аналитический расчет температур в объеме тонкого слоя исследуемой печени сома возможен при решении системы дифференциальных уравнений влаго- и теплопереноса. Решение системы уравнений осуществлялось методом конечных разностей с учетом режимных параметров и кинетики процесса сушки, гигроскопических, теплофизических, диэлектрических и других физико-химических свойств объекта влагоудаления. При построении модели было предположено, что в ходе сушки осуществляется равномерный объемный подвод энергии для печени сома, сформованного в тонкую пластину фиксированной толщины h в равной степени по всей внешней поверхности продукта. В качестве первой координаты x , характеризующей высушиваемый слой субпродукта, полученный вследствие переработки рыбного сырья, и от которого зависит искомая температурная функция $T(c, x)$, была принята толщина пластины по его параметру h , т.е. $x = 0 \dots h$. Влажность W , кг/кг (или содержание сухих веществ C , кг/кг), которая связана установленной в ходе экспериментов функциональной зависимостью со временем процесса микроволновой сушки τ , была принята в качестве второй координаты. В итоге, в случае объемного энергоподвода микроволновым излучением, уравнение переноса тепла при одномерной задаче, с учетом ранее установленных зависимостей принимает вид:

$$\frac{\partial T}{\partial C} = \frac{a}{\partial C / \partial \tau} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{r\rho}{c_v} + \frac{\omega}{\partial C / \partial \tau \cdot c_v}, \quad (25)$$

где x – координата толщины слоя, м; a – температуропроводность материала, $\text{м}^2/\text{с}$; $\partial C / \partial \tau$ – скорость сушки, $\cdot \text{с}^{-1}$, с учетом допущения, что структура материала изотропна; r – энергия затрачиваемая на фазовый переход, Дж/кг; ρ – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_v – объемная теплоемкость материала, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; ω – количество выделяемого тепла в единице объема материала, $\text{Вт}/\text{м}^3$.

Решением уравнения (25) является функция $T = f(c, x)$, которая связана с условиями однозначности, в перечне которых граничные условия для теплообмена на поверхности высушиваемого материала могут быть описаны известной зависимостью:

$$- \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_{sr} - T_{пов}), \quad (26)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); T_{sr} – температура воздуха при атмосферном давлении в СВЧ камере, К; $T_{пов}$ – температура поверхности объекта сушки, К.

Для решения уравнения (25) также необходимо было определить количество выделяемого тепла в единице объема высушиваемого материала ω (Вт/м³):

$$\omega = 5,55 \cdot 10^{-12} \varepsilon_r' \tan \delta f E^2, \quad (27)$$

где f – частота электрического поля, Гц; E – напряженность внешнего электрического поля, В/м, величина которой варьируется в зависимости от выставляемой мощности излучения N , Вт.

Реализация математической модели микроволновой сушки печени сома в тонком слое толщиной 1,5 см в виде дифференциального уравнения (27) при установленных рациональных режимах выполнена в среде специализированного программного обеспечения Mathcad Professional (рис. 5, 6).

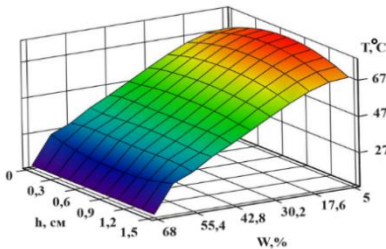


Рисунок 5 – Эволюция полей температур по глубине высушиваемого материала и влажности при микроволновой сушке мощностью излучения 90 Вт

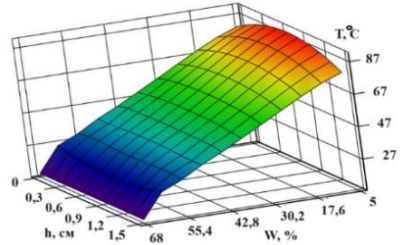


Рисунок 6 – Эволюция полей температур по глубине высушиваемого материала и влажности при микроволновой сушке мощностью излучения 180 Вт

Анализ эволюции полей температур по глубине высушиваемого материала и изменению влажности показал, что в результате обезвоживания продукт достигает предельную температуру в 70°C, однако время его достижения разное, которое, надо отметить, принципиального значения на конечное качество высушенной продукции не оказывает. Дополнительно следует отметить, что при любой влажности или в произвольный момент времени температурные перепады не превышали 2°C. Это свидетельствует о «мягких» режимах сушки, обуславливающих равномерный объемный прогрев и сохранение качественных показателей для сухой печени сома.

После проведения подробного исследования микроволновой сушки печени сома в тонком слое были выделены два наиболее рациональных способа его проведения, при этом, самым рациональным вариантом можно принять проведение процедуры обезвоживания, где его продолжительность составляет 28 минут. Правильность такого выбора доказана результатами дополнительных проведенных исследований техникохимической характеристики рыбной печени сома обыкновенного в нативном и высушенном состоянии, представленных в главе 5. К тому же, с целью недопущения перегрева высушиваемого продукта, продолжительность обезвоживания можно сократить на 5...8 минут и осуществить его досушку используя конвективный подвод энергии при допустимых температурных условиях.

Например, при СВЧ сушке печени сома в тонком слое толщиной 1,5 см в

течение 20 минут при мощности 180 Вт, влажность высушиваемого материала достигнет значения 15%, а его температура будет близка к 70°C. В этом случае достаточно провести конвективное досушивание печени до достижения в ней конечной влажности 5% при температуре сушильного агента 80°C. Рациональной продолжительностью конвективного досушивания печени сома в тонком слое толщиной 1,1 см (с учетом усушки) от начальной влажности 15% до конечной 5% является 90 минут.

Для реализации данной сушильной технологии с целью повышения эффективности обезвоживания печени сома и уменьшения его энергоемкости разработан петлевой аппарат непрерывного действия, который по причине конструктивной специфики может быть реализован, как для микроволновой сушки печени сома, так и для влагоудаления из подобных ей материалов при конвективном энергоподводе. Разработанное устройство (рис. 7) представляет собой петлевую сушилку, которая может работать по нескольким вариантам влагоудаления: используя только микроволновое излучение с конвективным отводом увлажненного воздуха из сушильной камеры; используя только конвективный подвод энергии с промежуточным подогревом воздуха и частичной рециркуляцией его по зонам; используя комбинированный режим влагоудаления.

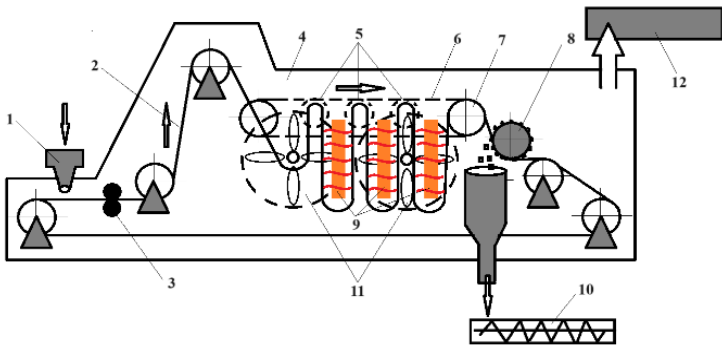


Рисунок 7 – Схема экспериментальной установки для обезвоживания объекта исследования, при микроволновом подводе энергии

1 – питатель влажного материала; 2 – гибкая диэлектрическая сетчатая лента; 3 – обогреваемые паром вальцы; 4 – рабочая камера; 5 – поперечные планки; 6 – цепной конвейер; 7 – направляющий ролик; 8 – барабан очистки высушенного материала; 9 – СВЧ генераторы; 10 – разгрузочный шнек; 11 – осевые вентиляторы циркуляции сушильного агента; 12 – система отвода отработанного сушильного агента

Применение предложенной конструкции (рис. 7) для обработки вторичного сырья позволит эффективно проводить процесс сушки, применяя различные варианты его проведения. Влажность готового сухого продукта составляет не более 6%, что позволяет хранить его длительное время и использовать в отдельных технологиях пищевой промышленности.

В пятой главе представлена технохимическая характеристика рыбной печени сома обыкновенного в нативном и высушенном состоянии, с этой целью определялось в печени сома содержание химических элементов и проводилась оценка микробиологических показателей.

В таблице 5 приведены данные по доле отдельных микроэлементов и тяжелых металлов в нативной и обезвоженной печени сома.

Таблица 5

Данные по доле отдельных микроэлементов и тяжелых металлов в нативной и обезвоженной печени сома

Образцы печени	As	Pb	Ni	Cd	Cu	Zn	Fe	Co
	мкг/кг				мг/кг			
Нативная	н/о	н/о	1,40	1,80	1,410	13,08	54,820	0,068
Сухая	н/о	<5	1,8	2,40	8,960	62,190	245,3	0,420

Полученные данные по содержанию некоторых микроэлементов, а также тяжелых элементов как в сырой печени сома, так и в высушенном образце показали, что их количество в исследуемом сырье не превышает предельно допустимых концентраций. В таблице 6 приведены микробиологические параметры печени сома.

Таблица 6

Микробиологические параметры печени сома

Сырье	КМАФАнМ, КОЕ/г	E. coli, кл. в 1 г	БГКП, кл. в 0,1 г
печень	$5,0 \cdot 10^3$	н/о	н/о
Норма [СанПиН 2.3.2.1078-01]	$1,0 \cdot 10^4$	н/д	н/д
Сырье	Стафилококк, кл. в 1 г	Сальмонел. кл. в 25 г	Плесень и дрожжи, кл. в 1 г
печень	н/о	н/о	н/о
Норма [СанПиН 2.3.2.1078-01]	н/д	н/д	200 кл.

* н/о – не обнаружено; н/д – не допускается

Определение состава липидно-кислотного комплекса осуществлялось на газовом хроматографе Nexis GC-2030AF (Япония). Полученные данные по составу липидно-кислотного комплекса сырой и высушенной печени представлены в таблицах 7 и 8 соответственно.

Таблица 7

Состав липидно-кислотного комплекса сырой печени

№	Длительность удержания	Наименование жирных кислот	Площадь экстремума	Доля, %¶
Насыщенные (НЖК).				27,310
1	6,61290	Каприновая	1099	0,0940
2	10,5620	Миристиновая	12506	1,0750
3	12,0960	Пентадекановая	1209	0,1040
4	13,9760	Пальмитиновая	184507	15,8600
5	16,1820	Маргариновая	1485	0,1280
6	18,730	Стеариновая	115087	9,8930
7	27,9950	Генэйкозановая	1814	0,1560
Мононенасыщенные (МНЖК), в т.ч.				52,880
8	11,1450	Миристолеиновая	1271	0,1090
9	14,5750	Пальмитолеиновая	179384	15,42
10	16,7870	Гептадеценная	2927	0,2520
11	19,32	Олеиновая ω9	380923	32,7430
12	25,2270	Гадолеиновая ω9	50635	4,3530

Полиненасыщенные (ПНЖК).				19,810
13	20,634	Линолевая ω6	2516	0,2160
14	26,769	Эйкозодиеновая	3150	0,2710
15	27,674	Эйкозатриеновая ω6	3121	0,2680
16	28,444	Эйкозатриеновая ω3	49914	4,2910
17	28,937	Арахидоновая ω6	4740	0,4070
18	30,644	Эйкозапентаеновая ω3	19543	1,680
19	38,424	Эйкозапентаеновая ω3	147529	12,6810

Таблица 8

Состав липидно-кислотного комплекса высушенной печени

№	Длительность удержания	Наименование жирных кислот	Площадь экстремума	Доля, %
Насыщенные (НЖК)				34,610
1	10,570	Миристиновая	12158	1,0010
2	12,1030	Пентадекановая	4186	0,3450
3	13,9790	Пальмитиновая	205390	16,9120
4	16,1820	Маргариновая	5113	0,4210
5	18,7240	Стеариновая	140434	11,5640
6	37,4280	Лигноцериновая	53049	4,368
Мононенасыщенные (МНЖК).				47,020
7	14,5740	Пальмитолеиновая	71175	5,8610
8	16,7860	Гептадеценовая	5231	0,4310
9	19,3080	Олеиновая ω9	211887	17,4470
10	25,2070	Гадоленовая ω9	39487	3,2510
11	38,4330	Нервоновая ω9	243285	20,0330
Полиненасыщенные (ПНЖК).				18,370
12	20,63	Линолевая ω6	15729	1,2950
13	21,5350	γ-линолевая ω6	3401	0,2800
14	22,5690	α-линолевая ω3	5278	0,4350
15	26,7570	Эйкозодиеновая	10651	0,8770
16	27,6630	Эйкозатриеновая ω6	8735	0,7190
17	28,4380	Эйкозатриеновая ω3	120756	9,9430
18	28,9160	Арахидоновая ω6	6599	0,5430
19	30,6390	Эйкозапентаеновая ω3	51901	4,2740

Результаты исследования долей жирных кислот свидетельствуют о том, что в печени превалирует сумма МНЖК (52,88% – в сырой печени сома, 47,02% – в высушенной печени сома), НЖК по долевному участию находится на второй позиции (27,31% – в сырой печени сома, 34,61% – в высушенной печени сома), а ПНЖК на третьей позиции (19,81% – в сырой печени сома, 18,37% – в высушенной печени сома). В числе НЖК в высушенной печени сома преобладает пальмитиновая (16,91%) и стеариновая (11,56%) кислоты. Основными среди МНЖК считают олеиновую (17,45%) и нервоновую (20,03%) ЖК. Известно, что МНЖК являются источником энергии и включены в состав клеточных стенок. Среди ПНЖК выделяются эйкозатриеновая (9,94%) и эйкозапентаеновая (4,27%) ЖК, которые играют важную роль в нашем организме и являются омега-3 ПНЖК.

Биологическая эффективность белковой составляющей обусловлена долевым участием аминокислот (АК) при учете доли незаменимых аминокислот (НАК) по отношению к эталонной белковой составляющей. В связи с этим были проведены

исследования аминокислотного состава белка содержащего печени сома как в сухом, так свежем технологическом состоянии (табл. 9, 10).

Таблица 9

Аминокислотный состав сырой печени сома

Наименование АК	Доля АК, г/кг	Ошибка (неопределенность), г/кг	Доля АК, %	Относительная ошибка %
Аспарагиновая	21,650	1,790	9,580	0,180
Треонин	10,330	0,860	4,570	0,090
Серин	11,350	0,940	5,020	0,090
Глутаминовая	29,280	2,430	12,950	0,240
Пролин	15,220	1,260	6,730	0,130
Глицин	22,230	1,840	9,830	0,180
Аланин	14,850	1,230	6,570	0,120
Валин	11,990	0,990	5,300	0,100
Изолейцин	9,750	0,810	4,310	0,080
Лейцин	17,270	1,430	7,640	0,140
Тирозин	8,420	0,700	3,720	0,070
Фенилаланин	10,910	0,900	4,820	0,090
Гистидин	5,770	0,480	2,550	0,050
Лизин	15,740	1,300	6,960	0,130
Аргинин	16,760	1,390	7,420	0,140
Метионин	4,380	0,360	1,940	0,040
Итого:	226 г/кг или 22,60%	-	100%	-

Таблица 10

Аминокислотный состав высушенной печени сома

Наименование АК	Доля АК, г/кг	Ошибка (неопределенность), г/кг	Доля АК, %	Относительная ошибка %
Аспарагиновая	65,990	7,050	9,790	0,710
Треонин	33,470	3,580	4,960	0,360
Серин	35,520	3,800	5,270	0,380
Глутаминовая	95,260	10,180	14,130	1,020
Пролин	40,150	4,290	5,950	0,430
Глицин	60,430	6,460	8,960	0,650
Аланин	45,550	4,870	6,760	0,490
Валин	37,560	4,010	5,570	0,400
Изолейцин	31,060	3,320	4,610	0,330
Лейцин	58,170	6,220	8,630	0,620
Тирозин	20,540	2,190	3,040	0,220
Фенилаланин	30,670	3,280	4,550	0,330
Гистидин	19,550	2,090	2,900	0,210
Лизин	41,120	4,400	6,100	0,440
Аргинин	46,050	4,920	6,830	0,490
Метионин	12,630	1,350	1,870	0,140
Итого:	673,80 г/кг или 67,38%	-	100%	-

Исследование аминокислотного состава белка содержащего печени сома как в сухом, так свежем технологическом состоянии показало, что: в сырой печени общее

количество белков составляет 22,6%; в сухой печени общее количество белков составляет 67,38%; в исследуемых образцах присутствуют семь аминокислот из восьми важных для организма человека: валин, изолейцин, лейцин, метионин, треонин, фенилаланин, лизин, кроме триптофана. Сумма незаменимых аминокислот дефицитного печени сома практически такое же, что и в идеальном белке в независимости от технологического состояния рыбного субпродукта, среди которых доминируют лейцин, лизин и валин, которые обеспечивают рост и нормальное функционирование организма человека.

Также в образцах печени оценивалось содержание витаминов А и Е, необходимых для разработки биологически активных премиксов, добавляемых в пищевые продукты с целью придания им функциональной направленности (табл. 11).

Таблица 11

Доли витамина А и Е в дефростированной печени сома мг/г высушенной ткани

Наименование витамина	Витамин А	Витамин Е
Средняя величина	0,00920	0,00340

Из таблицы 11 следует, что 100 г обезвоженной печени восполняет суточную дозу витамина А человеческого организма, равную 900 мкг рет. экв., а витамина Е в 100 г печени восполнит менее 2,5%, поскольку суточная доза равна 15 мг токоф. экв.

В шестой главе представлено экономическое обоснование переработки печени сома в сухой порошок для использования в производстве пищевых добавок, а также даны рекомендации по практическому применению результатов диссертационного исследования.

Экономический расчет показывает, что при внедрении разработанной технологии себестоимость получаемого полуфабриката при сушке 1 тонны печени сома составит порядка 560 рублей за килограмм. Это свидетельствует о том, что практическая реализация предлагаемой технологии на выходе дает конечный продукт с вполне приемлемой для рынка ценой.

Сухая печень сома, используемая в виде порошка или кусочков, представляет собой перспективное сырье для обогащения пищевых продуктов или может быть их основой. Например, обезвоженный полуфабрикат, особенно в форме тонкодисперсного порошка, является готовой основой для производства БАДов, направленных на коррекцию дефицита железа и витаминов. Высокая концентрация и биодоступность гемового железа делают ее ключевым компонентом в добавках для профилактики и комплексной терапии железодефицитных анемий. Порошок может быть расфасован в капсулы, прессован в таблетки или использоваться в виде монодозы. Технологическая простота его применения, длительный срок хранения и стандартизация по содержанию нутриентов отвечают всем требованиям индустрии функционального и специализированного питания. Кусочки сушеной печени сома обладают уникальной способностью к регенерации жировой фазы и нежной консистенции при контролируемой регидратации в растительном масле (например, оливковом, подсолнечном) с добавлением специй. После восстановления такой продукт приобретает схожую с печенью трески маслянистую, пастообразную текстуру и богатый вкус. Это позволяет создать полноценный, более доступный и управляемый по составу аналог, лишенный специфических рисков, связанных с накоплением тяжелых металлов в печени диких морских рыб. Готовый продукт в итоге может позиционироваться как пащтет или деликатесная консервация.

Следует отметить, что высокая питательная ценность и привлекательный для

плотоядных животных вкус и запах делают сухую печень сома идеальным сырьем для сегмента зоорациона. Кусочки могут использоваться как готовые сухие лакомства для кошек и собак или после измельчения вводиться в состав витаминизированных подушечек и мясных паст. Порошок служит высокобелковым и гипоаллергенным вкусоароматическим усилителем и обогатителем для сухих и влажных кормов премиум-класса, повышая их привлекательность и питательную полноценность.

Что касается перспектив дальнейшей разработки данной актуальной темы, то они заключаются в масштабировании разработанного способа комбинированной микроволновой сушки для других видов ценного вторичного рыбного сырья с целью создания линейки специализированных пищевых ингредиентов. Также актуальна интеграция полученного порошка в рецептуры функциональных продуктов направленного действия, например, для коррекции микронутриентного статуса у спортсменов или пастообразных рационов геродиетического питания, что требует углубленных исследований реологических свойств и биодоступности нутриентов в сложных пищевых системах.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты исследований позволили сделать следующие основные выводы по работе.

1. Проанализированы данные литературных источников на предмет современного состояния и перспектив развития технологии промышленной переработки отходов рыбной промышленности, в частности внутренностей сома обыкновенного, в аспекте выработке из них биологически активных соединений в виде добавок к пище.

2. Определены и математически аппроксимированы зависимости теплофизических, гигроскопических, диэлектрических и плотностных характеристик печени сома, как объекта микроволновой сушки, при реальных температурных и влажностных диапазонах, проведен термодинамический анализ статических закономерностей процесса сорбции им влаги.

3. Изучены, в том числе и экспериментальным путем, и проанализированы кинетические закономерности микроволнового обезвоживания рыбного вторичного сырья и проведена их математическая аппроксимация.

4. Решена, посредством численного метода конечных разностей, математическая модель микроволновой сушки печени сома, адаптированной к объекту исследования, и рекомендованы, на основе ранее проведенных исследований, рациональные режимные параметры организации процесса обезвоживания вторичного рыбного сырья, добытого на Каспии.

В качестве рациональных режимных параметров проведения микроволновой сушки печени сома в тонком слое следует принять следующие:

- начальная влажность высушиваемого сырья, % – 68 ± 2 ;
- начальная температура высушиваемого сырья, °C – 10 ± 1 ;
- толщина высушиваемого слоя, см – $1,5 \pm 0,1$;
- площадь высушиваемой поверхности должна находиться строго в рамках воздействия поля высокочастотного излучения электромагнитных волн, частотой. МГц – 2450;
- мощность микроволнового излучения, Вт – 180 ± 10 ;
- конечная влажность высушиваемого сырья, % – 5 ± 1 ;
- конечная температура высушиваемого сырья, °C – 85 ± 1 ;

- продолжительность обезвоживания, мин – 28 ± 1 .

В качестве рациональных режимных параметров проведения конвективно-микроволновой сушки печени сома в тонком слое следует принять следующие:

- начальная влажность высушиваемого сырья, % – 15 ± 1 ;
- начальная температура высушиваемого сырья, °С – 70 ± 2 ;
- толщина высушиваемого слоя, см – $1,1 \pm 0,05$;
- температура сушильного агента, °С – 80 ± 2 ;
- скорость сушильного агента, м/с – $2,5 \pm 0,5$;
- конечная влажность высушиваемого сырья, % – 5 ± 1 ;
- конечная температура высушиваемого сырья, °С – 75 ± 1 ;
- продолжительность обезвоживания, мин – 90 ± 3 .

5. Проведены исследования теххимических показателей печени сома, как вторичного рыбного сырья, и полученные сведения аккумулированы для их практического использования, определены особенности качественного состава веществ, входящих во вторичное рыбное сырье, оценена его безопасность, пищевая и биологическая ценность.

6. Даны рекомендации по практическому использованию результатов исследований сушки печени сома, а также по аппаратурному оформлению этой процедуры.

В качестве заключения хотелось бы отметить, что цель исследования достигнута, благодаря анализу и обобщению классических и современных аналитических и эмпирических методов изучения тепломассопереноса, на базе известных научных достижений и основополагающих работ в области глубокой переработки рыбного сырья и, отдельно, сушильных технологий, положениям которых соответствуют выводы и рекомендации, представленные в работе.

Полученные результаты проведенного диссертационного исследования имеют перспективу дальнейшего развития особенно в аспекте интеграции полученного сухого порошка из печени сома в рецептуры целевых функциональных продуктов, что позволит инновационно модернизировать переработку рыбных отходов, расширив ассортимент вырабатываемой продукции, а также при масштабировании комбинированной микроволновой сушки на другие виды ценных рыбных отходов для создания широкой линейки специализированных пищевых ингредиентов.

Список публикаций по теме диссертации:

Публикации в изданиях из перечня, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Яснов А.С.** Исследование плотности и гигроскопических характеристик печени сома как объекта обезвоживания / **А. С. Яснов, С. А. Бредихин, А. Х. Х. Нугманов** [и др.] // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 110-120.
2. **Яснов А.С.** Исследование свойств и состава печени сома обыкновенного / **А. С. Яснов, С. А. Бредихин, А. Х. Х. Нугманов** [и др.] // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2024. – Т. 70, № 4. – С. 68-82.
3. **Яснов А.С.** Моделирование операции микроволнового обезвоживания печени сома на основе выявления ее кинетических закономерностей / **А. С. Яснов, А. Х. Х. Нугманов, И. Ю. Алексанян** [и др.] // Индустрия питания. – 2024. – Т. 9, № 4. – С. 58-67.
4. **Яснов А.С.** Выявление теплофизических характеристик и параметров процесса сушки печени сома в тонком слое / **А. С. Яснов, А. Х. Х. Нугманов, И. Ю. Алексанян** [и др.] // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2024. – № 4. – С. 110-120.

Публикации в иных изданиях:

5. **Яснов А.С.** Технология силосования субпродуктов сома обыкновенного как эффективный метод переработки его отходов / **А. С. Яснов** // Природноресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России : Сборник статей XXIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 20–21 января 2025 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2025. – С. 252-256.
6. **Яснов А. С.** Печень сома как перспективный источник полезных компонентов для продовольственного обеспечения РФ / **А. С. Яснов** // Научная статья года 2025: сборник статей XVIII Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 15 января 2025 года. – Пенза: Наука и Просвещение, 2025. – С. 46-48.
7. **Яснов А. С.** Оценка потенциала использования рыбьих отходов сома обыкновенного для производства биодизеля с применением СВЧ-технологий / **А. С. Яснов** // Инновационная наука. – 2025. – Т. 2, № 1-2. – С. 57-62.
8. **Яснов А.С.** Перспективы использования отходов и субпродуктов рыбной промышленности в качестве сырья для производства биологических активных добавок и фармацевтических препаратов / **А. С. Яснов** // Актуальные экологические проблемы и экологическая безопасность в современных условиях: сборник статей III Международной научно-практической конференции, Саратов, 3-4 апреля 2025 года. – Саратов: ФГБОУ ВО Вавиловский университет, 2025. – С. 268-271.
9. **Яснов А. С.** Разработка алгоритма определения оптимальных режимов микроволновой сушки печени сома обыкновенного как способ повышения ценности вторичных рыбных ресурсов / **А. С. Яснов**, А. Х. Х. Нугманов // 69-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета, посвящённая 95-летию со дня основания АИРХ-АТИРПИХ-АГТУ: Материалы докладов, Астрахань, 26–30 мая 2025 года. – Астрахань: Астраханский государственный технический университет, 2025. – С. 442-445.

Свидетельства и патенты:

10. Патент на полезную модель № 231633 U1 Российская Федерация, МПК F26B 15/24, F26B 3/347. петлевая сушилка: заявл. 29.11.2024; опубл. 04.02.2025 / А. Х. Х. Нугманов, И. А. Бакин, **А. С. Яснов** [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева".