На правах рукописи

Моргунова Наталья Львовна

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОБРАБОТКИ ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА С УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИЕЙ ПРОЦЕССА

Специальность
4.3.1. - Технологии, машины и
оборудование для агропромышленного комплекса

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Саратов 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова».

Научный консультант — доктор технических наук, профессор **Рудик Феликс Яковлевич**

Официальные оппоненты:

Курочкин Анатолий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры пищевых производств ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»

Шахов Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технического сервиса ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»

Глобин Андрей Николаевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологии и средства механизации агропромышленного комплекса» Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, г. Зерноград

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I».

Защита состоится «26» сентября 2025 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 35.2.035.03 на базе ФГБОУ ВО «Вавиловский университет» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Вавиловский университет» и на сайте http://www.vavilovsar.ru/ .

Отзывы направлять учёному секретарю диссертационного совета 35.2.035.03 по адресу: 410012, г. Саратов, пр-кт им. Петра Столыпина зд. 4, стр. 3, e-mail: chekmarev.v@yandex.ru

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета — Василий Васильевич Чекмарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Важнейшей задачей агропромышленного комплекса страны является совершенствование технологий и технических средств, обеспечивающих качественный и безопасный процесс получения кормов и продуктов питания.

Зерновые, масличные и бобовые культуры являются основными компонентами, обеспечивающими продовольственную безопасность страны. В 2023 г. Россия получила 43,5 млрд дол. США за экспорт продукции АПК, что на 3,68 % превысило показатели 2022 г. Экспорт зерна из России за 2024 г. составил 83,5 млн т., что превышает показатели 2023 г на 4%. Первое место в этом объеме занимает пшеница (57,5 млн т). Из Саратовской области напрямую экспортировано 135,2 тыс. т зерновых, зернобобовых культур и 21,6 тыс.т продуктов переработки зерна. При этом качество переработки не удовлетворяет современным требованиям, существующие технологии характеризуются потерями качества продукции, длительным технологическим процессом, высокой энергоемкостью и низкой стабильностью результатов. Потери зерновых, масличных и бобовых культур достигают 15 % из-за неправильных условий хранения и несовершенных технологических приемов их переработки.

В Доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации, утвержденной Указом Президента № 20 от 21 января 2020 г., обозначен комплекс мер по обеспечению кормовой, продовольственной и биологической безопасности страны, в том числе создание новых технологий и технических средств производства, переработки и хранения сельскохозяйственной продукции, их внедрение в производство.

При этом отмечается, что реализация положений Доктрины позволит обеспечить продовольственную безопасность как важнейшую составную часть национальной безопасности, прогнозировать и предотвращать возникающие риски социально-экономического развития страны.

Стремление перерабатывающих производств достичь нормируемых показателей при переработке зерновых культур в муку, зернобобовых – в корм животным, нерафинированных растительных масел при хранении, сводится к увеличению количества технологических машин и операций, применению высокотемпературных технологий, которые приводят к денатурации белка, потерям аминокислот и полезных составляющих и увеличению времени обработки сырья. Важной предпосылкой для разрешения возникшей противоречивой ситуации может быть разработка и внедрение современных ресурсосберегающих технологий и технических средств, основанных на низкотемпературной обработке, обеспечивающих получение конкурентоспособной безопасной продукции для производств, в том числе малой мощности фермерских хозяйств, что представляет собой актуальную научно-техническую проблему, решение которой имеет важное хозяйственное значение.

Работа выполнена в соответствии с «Государственной программой развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2025 годы» (подпрограмма «Развитие подотрасли растениеводства, переработки и реализации продукции растениеводства»), а также направлениями научного развития Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии им. Н.И. Вавилова № 01201151795 «Модернизация инженерно-технического обеспечения в АПК» и № 01201151793 «Ресурсосберегающие технологии безопасных пищевых продуктов».

Степень разработанности темы. Исследованиями в области обработки растительного сырья для повышения его кормовой и пищевой ценности занимались такие ученые, как С. А. Бредихин, Г. А. Егоров, С. В. Зверев, А. А. Курочкин, А.Н. Глобин, В. А. Новикова, В. И. Оробинский, А. Н. Остриков, В. А. Панфилов, Ю. Ф. Росляков, В. А. Шахов, А. А. Шевцов, L. A. Johnson, D. R. Erickson и др. Вопросы обеззараживания зерновых культур отражены в работах Д. А. Будникова, Г. Г. Юсупова, В. А. Шаршунова, Yan Zhu, Lu Guoqing и др. Вопросами обеспечения качественных показателей растительных масел занимались В. А. Бербер, А. А. Варивода, И. В. Земсков, П. Б. Разговоров, Г. М. Харченко, O'Brien, D. R. Erickson и другие учёные.

Исследованию вопросов, связанных с повышением эффективности обработки сельскохозяйственного сырья за счет интенсификации технологических процессов ультразвуковой обработкой, посвящены работы Г. Н. Архиповой, Б. В. Акопяна, В. В. Ботвинниковой, И. С. Демчука, Л. А. Донсковой, И. В. Даниловцевой, А. С. Комоликова, Г. А. Остроумовой, Ф. Я. Рудика, А. А. Семерчана, В. Н. Хмелева, А. М. Фрид, В. Б. Флина, Я. И. Френкеля, T. S. Awad, H. Feng, S. D. Jayasooriya, C. A. Parson, M. Kornfeld, P. Haller. Опираясь на исследования ученых, в работе представлен материал по интенсификации процессов увлажнения, экстрагирования, очистки и фильтрации при обработке зерновых, зернобобовых культур и нерафинированного подсолнечного масла.

Исходя из проведенного анализа работ выдвинута **научная гипотеза** о возможности повышения эффективности обработки продукции растениеводства ультразвуковой интенсификацией процессов, обеспечивающей низкотемпературную активацию массообмена и сохранность полезных составляющих обрабатываемых продуктов.

Цель работы – повышение эффективности технологических воздействий и технических средств переработки зерновых, зернобобовых культур и нерафинированных растительных масел при интенсификации технологических процессов ультразвуковой обработкой.

Задачи исследований:

1. Проанализировать по данным литературных и патентных источников особенности технологических процессов инактивации ингибиторов трипсина и уреазы зерна сои, обеззараживания, очистки и увлажнения зерна

пшеницы, фильтрации и очистки нерафинированных подсолнечных масел от первичных и вторичных продуктов окисления существующими технологиями и техническими средствами производства продуктов переработки. Установить их недостатки и обосновать целесообразность использования направленного ультразвукового воздействия.

2. Теоретически исследовать процессы массопередачи, обусловленные гидродинамическими, гидротермическими и физическими закономерностями инициирования и развития движущих сил массоотдачи, обосновать и установить преимущества ультразвукового воздействия. Разработать математические модели повышения интенсивности процесса массопередачи при обработке зерновых, зернобобовых культур и нерафинированного подсолнечного масла.

3. Исследовать в лабораторных условиях качественные показатели зерновых и зернобобовых культур, сырого и нерафинированного растительного масла, обработанных ультразвуком, и обосновать режимные параметры и основные конструктивные направления разработки технических средств.

4. Разработать технологии обработки зерновых и зернобобовых культур, сырого и нерафинированного растительного масла и конструкции установок для их осуществления. Провести производственные испытания технологий и технических средств.

5. Определить технико-экономическую эффективность применения разработанных технологий и конструктивно-технологических решений.

Объект исследований – технологические воздействия и технические средства ультразвуковой обработки зерновых, зернобобовых культур и нерафинированных растительных масел.

Предмет исследований – закономерности технологических воздействий при технологической обработке зерновых, зернобобовых культур и нерафинированных растительных масел с ультразвуковой интенсификацией процессов.

Научную новизну работы представляют:

- аналитические закономерности, описывающие гидродинамические, гидротермические и физические процессы и параметры воздействия, обеспечивающие повышение эффективности массообменных процессов и обоснование технологических режимов и конструктивных параметров оборудования и рабочих органов при обработке продукции растениеводства;
- теоретические закономерности направленного пульсирующего распределения ультразвуковых колебательных движений и кумулятивных течений, регрессионные математические модели, обосновывающие параметры и режимы работы предлагаемых технических средств для технологических воздействий с целью интенсификации процесса и повышения качества продуктов переработки;

- закономерности влияния режимов технологических воздействий и конструктивных параметров универсальной шнековой установки непрерывного действия для обработки зерновых и зернобобовых культур и ультразвуковой фильтрационной установки для очистки растительных масел, позволяющие повысить качество обработки, обеспечить высокие показатели ресурсосбережения и производительности.

Новизна технологических и технических решений подтверждена 2 патентами на изобретение и 4 патентами на полезные модели.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость заключалась в изучении закономерностей, обусловливающих повышение эффективности очистки и экстрагирования твердых и жидких веществ в продукции растениеводства, анализе и теоретическом обосновании гидродинамических и колебательных движений жидкости при технологическом ультразвуковом воздействии на продукцию растениеводства, теоретическом обосновании закономерностей массообменных процессов при проектировании конструкций установок для экстрагирования зерна сои, очистки и увлажнения зерна пшеницы и очистки нерафинированных растительных масел от первичных и вторичных продуктов окисления; в разработке теоретических моделей обоснования и назначения конструктивных параметров оборудования, которые могут быть использованы в НИИ и проектно-конструкторских организациях для обоснования новых технологий ультразвукового воздействия и при проектировании технических средств для обработки продукции растениеводства, а также при подготовке специалистов в профильных вузах. Реализованные результаты исследований позволяют повысить качество подготовки продуктов переработки и обеспечить полную сохранность их полезных свойств. Материалы, представленные в работе, одобрены и рекомендованы к использованию ОАО «Химмаш-Старт», ФГБНУ «Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации», ООО «Анастасьинское», ООО «Мельница», ООО Агрофирма «Биокор-С».

Методология и методика исследований. Теоретические исследования проводили на основе методов прикладной математики, математической статистики, физических и химических процессовых явлений, гидромеханики и физики ультразвука. При проведении экспериментальных исследований применяли методики, установленные соответствующими ГОСТами, дополненные разработанными частными методиками.

Новизна методологии исследований состоит в системном подходе к теоретическому анализу процессов и биологических явлений, происходящих при обработке зерна, зернобобовых культур и нерафинированных растительных масел с использованием гидродинамических, гидротермических и ультразвуковых технологий; в оценке основных качественных признаков протеиновой ценности сои, очистки и увлажнения зерна пшеницы и фильтрации нерафинированных растительных масел от первичных и вторичных продуктов окисления.

Полученные данные экспериментальных исследований обрабатывали с помощью компьютерных программам Microsoft Excel 2010, Statistica.10. В методологии исследований использован системный подход, основанный на взаимном влиянии технологического физико-химического воздействия и технических средств на продукты обработки.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

- результаты исследования закономерностей массопередачи, обусловленных гидродинамическими, гидротермическими и физическими методами обработки зерновых, зернобобовых культур и растительных масел, обосновывающие интенсификацию процессов и технологических воздействий при обработке продукции растениеводства;
- теоретически и экспериментально установленные и подтвержденные технологические, режимные и конструктивные параметры ультразвуковой обработки зерновых и зернобобовых культур, нерафинированных растительных масел, закономерности процессов, протекающих в предложенных технических средствах, повышающих производительность труда, ресурсосбережение и качество обработки;
- теоретическое и экспериментальное обоснование технологических воздействий и технических средств, обеспечивающих значительную интенсификацию процессов обработки с использованием ультразвуковых колебательных микротечений, обеспечивающих повышение качественных показателей обрабатываемого растительного сырья с положительной технико-экономической эффективностью.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность полученных данных обеспечена использованием современных общепринятых методик, ГОСТов, оборудования и приборов, количеством выполненных экспериментов, внедрением полученных результатов в производство, выступлениями на всероссийских и международных конференциях с докладами о результатах исследований, одобрением и публикацией материалов в ведущих журналах. Выводы и рекомендации подтверждены адекватностью полученных уравнений регрессии, физической кинетикой протекающих процессовых явлений, сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Основные результаты исследований доложены на научно-практических конференциях ФГБОУ ВО Вавиловский университет (2013–2024 гг.), на VIII Саратовском салоне изобретений, инноваций и инвестиций (Саратов, 2013 г.), на VII Всероссийской научно-практической конференции «Аграрная наука в 21 веке: проблемы и перспективы» (Саратов, 2013 г.), на Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия» (Москва, 2020 г.), на международных научно-практических конференциях: «Технология и продукты здорового питания» (Саратов, 2013–2020 гг.), «Наука о питании: технологии, оборудование, качество и безопасность пищевых продуктов» (Саратов, 2013 г.), «Perspektywiczne opracowania są

nauką i technikami – 2013» (Польша, 2013 г.), «Актуальные проблемы ветеринарной медицины и пищевых технологий» (Саратов, 2016 г.), «Совершенствование инженерно-технического обеспечения производственных процессов и технологических систем» (Оренбург, 2018 г.), «Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство» (Воронеж, 2019 г.), «Пищевые технологии будущего: инновации в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции» (Саратов, 2020 г.), «Инженерия перспективного продовольственного машиностроения на основе современных технологий» (Воронеж, 2020 г.), на XII Национальной научно-практической конференции с международным участием «Технологии и продукты здорового питания» (Саратов, 2021 г.), на X Международной научно-технической конференции «Новое в технологии и технике функциональных продуктов питания на основе медико-биологических воззрений» (Воронеж, 2022 г.), на национальной научно-практической конференции с международным участием «Национальные приоритеты развития агропромышленного комплекса» (Оренбург, 2022 г.), на V Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием «Образование, наука, производство» (Пенза, 2023 г.), на Всероссийской научно-практической конференции «Разумовские чтения 2024» (Москва, 2024г).

Основные положения диссертации опубликованы в 68 работах, в том числе в 18 статьях в рецензируемых научных журналах по перечню ВАК РФ, в 7 статьях, включенных в международные цитатно-аналитические базы Web of Science и Scopus, в 6 патентах на изобретения и полезные модели. Общий объем публикаций составляет 15,8 печ. л., из которых 10,2 печ. л. принадлежат лично соискателю.

Работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 310 наименований, 29 из которых на иностранном языке, 20 приложений. Материал изложен на 396 страницах компьютерного текста, включает в себя 107 рисунков и 33 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, дана общая ее характеристика, показана степень разработанности темы, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследований, степень достоверности и апробация результатов, изложены научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту.

В **первой главе** ***«Состояние проблемы повышения эффективности технологического воздействия на зерновые, зернобобовые культуры и нерафинированные растительные масла и технических средств для производства продуктов переработки»*** приведен анализ и систематизированы технологические воздействия и технические средства обработки продукции растениеводства, применяемые в нашей стране и за рубежом. Проанализированы осо-

бенности применяемых технологий и технических средств для обеззараживания, мойки и увлажнения зерна при подготовке к помолу, инактивации белка сои от ингибиторов трипсина и уреазы, очистки нерафинированных растительных масел от продуктов окисления. Представлены основные технические средства, используемые для этих целей. Установлено, что применяемые технологии и технические средства не обеспечивают высококачественную обработку и, соответственно, производство качественных продуктов переработки. Низкая эффективность и длительность процессов гидротермической, тепловой, механической и химической обработок ведут к значительным потерям полезных составляющих растительного сырья и не удовлетворяют современным требованиям.

Технические средства, используемые при подготовке зерна к простому помолу, не обеспечивают качественную очистку труднодоступных зон оболочки от следов зараженности и пылевых осаждений. При этом процесс отволаживания занимает очень много времени (от 8 до 48 ч). Это влияет на качество обойной муки. Использование тепловых и химических методов инактивации ингибиторов трипсина и уреазы в зерне сои отрицательно воздействует на аминокислоты макромолекулы белка, резко снижая их питательную ценность. Наличие в произведенном нерафинированном подсолнечном масле продуктов окисления ведет к ухудшению его свойств и к порче при хранении.

Анализ научных трудов и результаты собственных исследований позволили установить, что все недостатки, присущие применяемым технологиям и техническим средствам, устранимы за счет использования ультразвуковых колебательных волн, значительно интенсифицирующих массообменные процессы, кинетику их воздействия на объекты обработки и за счет низкотемпературного состояния обеспечивающих сохранность аминокислот, витаминов и микроэлементов.

Во **второй главе** ***«Теоретическое обоснование повышения интенсивности обработки зерновых, зернобобовых культур и фильтрации нерафинированных растительных масел»*** рассмотрены основные вопросы теоретического исследования, закономерностей технологического воздействия и выделены объекты и границы их изучения.

Низкотемпературные акустические колебания не оказывают вредных воздействий на окружающую среду, на сохранность полезных составляющих обрабатываемого сырья и на потребителя и значительно ускоряют процессы увлажнения, мойки, экстракции и фильтрации.

Их использование будет способствовать повышению продуктовой ценности кормов и продуктов питания, обеспечит автоматизацию процессов за счет создания модульных технических средств и систем с различной производительностью.

Структурная схема методологических основ разработки технологий и технических средств обработки продукции растениеводства представлена на рисунке 1. Программой теоретического обоснования технологий реализована

цель изучения закономерностей взаимодействия колебательных движений и кумулятивных микропотоков в жидкости и в ткани обрабатываемого растительного сырья с последующей разработкой технологий и технических средств.

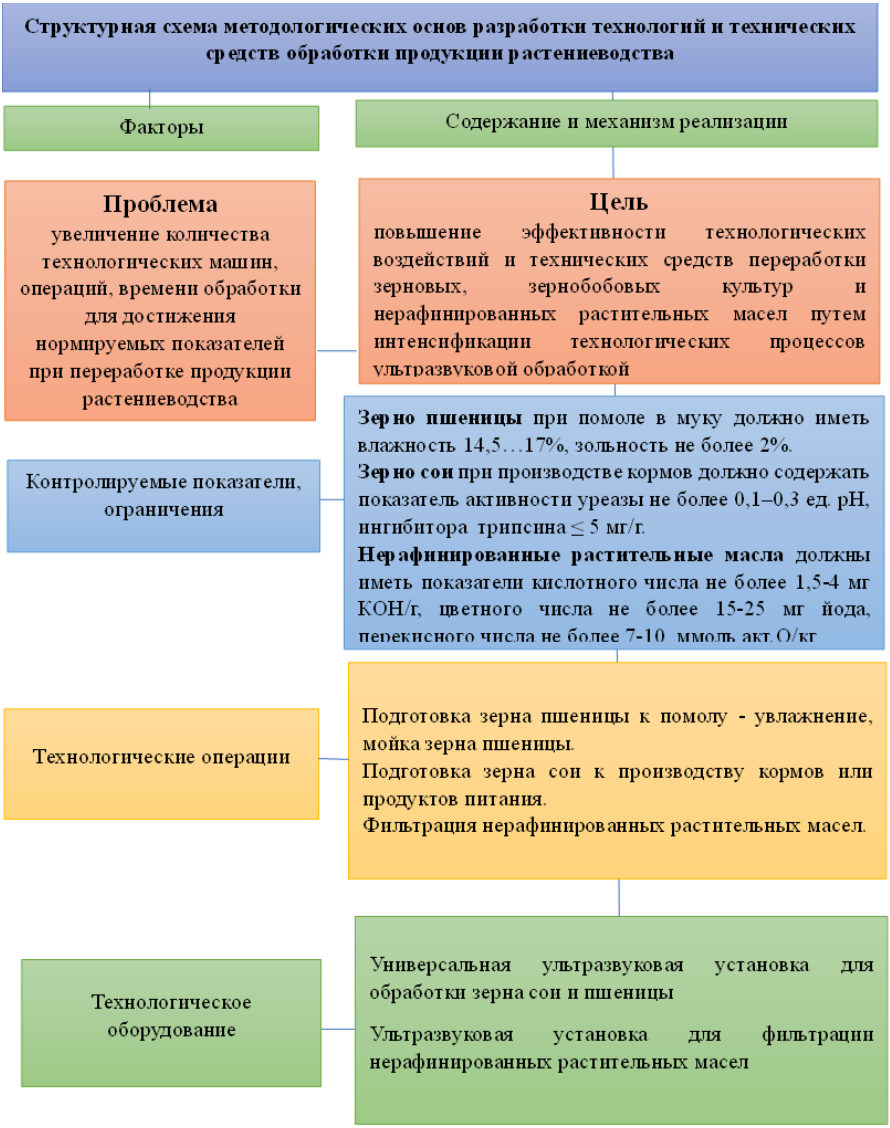


Рисунок 1 – Структурная схема методологических основ разработки технологий и технических средств обработки продукции растениеводства

Основой гидродинамического воздействия жидкости на материалы является способность жидкости проникать во все пустоты и капилляры материала, изменять его структурно-механические и биологические свойства. Этот процесс зависит от внешних факторов, к которым можно отнести состояние окружающей среды, твердость структуры обрабатываемого материала, способность ее насыщения влагой и агрессивность процесса на начальной стадии экстрагирования и экстракции. Наблюдается некоторое раздвоение процессовых явлений и, соответственно, массопередачи. Проникновение жидкости и растворение продукта экстрагирования протекают с большей скоростью, чем две последующие стадии, заключающиеся в переносе экстрагента в капиллярах твердого тела и его выносе в жидкую фазу. Эта закономерность объясняется тем, что скорость экстрагирования прямо пропорциональна движущей силе процесса и обратно пропорциональна диффузионному сопротивлению, имеющему место в капиллярах твердого тела. При экстрагировании выводимые вещества в жидкости переносятся за счет молекулярной диффузии, путь которой возрастает в твердом теле по причине относительно большой длины капилляров и их извилистости, что ведет к повышению трения частиц выводимого вещества о стенки пор при продвижении.

Распространение акустической волны, возникающей вследствии ультразвуковых колебаний, основано на использовании эффекта изменения создаваемого давления. На начальной стадии и затем по мере продвижения слой обрабатываемой жидкости, расширяясь, воздействует на соседний слой, сдавливая его. Происходит импульсная передача энергии, переходящая от одного слоя к другому.

Смещение частицы S обрабатываемой среды от положения равновесия определяется условием:

$$S = ASin(\omega\tau - kx + \varphi_0), \quad (1)$$

где A – амплитуда колебаний, характеризующая максимальное смещение частицы относительно положения равновесия, м; ω – цикличная частота колебаний, характеризующая число колебаний в единицу времени, Гц, $\omega = 2\pi f$, рад/с, $f = 1/T$; T – период колебаний, с; k – волновое число, $k = (2\pi)/\lambda$; λ – длина волны, м; φ_0 – начальная фаза, рад.

Зернобобовые и зерновые культуры обладают капиллярно-пористой структурой с высокой активностью стенок капилляров, что обеспечивает интенсивное поглощение и удерживание молекул воды.

Технологии увлажнения, очистки, экстрагирования и экстракции основаны на массообменных процессах. Вещества, выводимые из растительного сырья, находятся в трех агрегатных состояниях: газообразном, жидком и твердом.

В соответствии с целью и задачами диссертационной работы рассматривались массообменные процессы:

- «твердое тело – жидкость» – для подготовки зерна к помолу (увлажнения и мойки);

- «твердое тело – жидкость» – для экстрагирования зерна сои от антипитательных веществ;
- «жидкость – газ» – для очистки растительного масла от продуктов окисления.

Скорости массообменного процесса, согласно исследованиям Л. Д. Ландау, М. Е. Кишиневского и Икби, зависят от движения жидкости в пограничном слое (учитывают не только ламинарное движение, но и трение). Зарождение и развитие диффузионных массообменных процессов, образуемых гидродинамическими и акустическими колебательными явлениями, идентичны. Процессы диффузии протекают под действием на однородную обрабатываемую среду в одном случае гидродинамических сил, порожденных градиентом плотности диффундирующей жидкости, описываемых уравнением Фика. Коэффициент диффузии (D) зависит от температуры (T) и структуры зерна, и его можно выразить через уравнение Аррениуса:

$$D = D_0 \, exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right), \quad (2)$$

где D_0 — предэкспоненциальный множитель (постоянная), Ea — энергия активации диффузии (Дж/моль), R — универсальная газовая постоянная (8,314), T — температура в Кельвинах (K).

Проникновение жидкости огибающими кумулятивными микропотоками не может быть ограничено никакими препятствиями, связанными с биологическим структурным строением продукта обработки, они обладают исключительными проникающими свойствами.

Для практического использования с целью расчета средней скорости проницаемости для гидродинамического давления жидкости принято уравнение:

$$P_ж = P_к - \rho g l \sin \beta, \quad (3)$$

где $P_к$ – капиллярное давление, Па, $P_к = 2\sigma/r \cos \theta$; σ – поверхностное натяжение, Н; θ – угол смачиваемости; ρ – плотность жидкости, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, м^2/с; l – длина пропитанного участка капилляра, м; β – угол наклона капилляра; r – радиус капилляра, м.

Исходя из формулы (3), средняя скорость $v_г$ течения жидкости в порокапиллярном пространстве в условиях гидродинамического давления жидкости определяется выражением:

$$v_г = \frac{P_ж r^2}{8\mu l} = \frac{(P_k - \rho g l \sin\beta) r^2}{8\mu l}, \quad (4)$$

где r – радиус капилляра, м; μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Средняя скорость $v_а$ течения жидкости в порокапиллярной системе будет повышена на величину акустичесикого давления P_a, создаваемого акустическими микропотоками:

$$v_{\text{а}} = \frac{(\text{P}_{\text{ж}}+\text{P}_{\text{а}})r^2}{8\mu l} = \frac{[(\text{P}_{\text{к}}-\rho g l \sin\beta)+\rho\omega\text{Ac})]r^2}{8\mu l}. \quad (5)$$

С учетом средней скорости $v_{\text{а}}$ течения жидкости в порокапиллярной системе и других параметров, формула для определения качественных показателей зерна ($К_з$) может быть записана следующим образом:

$$К_з = К_{зо} + \psi \cdot v_{\text{а}} \cdot t, \quad (6)$$

где: $К_{зо}$ — начальный показатель качества зерна, %; Ψ – эмпирический коэффициент влияния акустической скорости течения жидкости в порокапиллярной системе при воздействии ультразвука, 1/м; t - время обработки, с.

Эта формула учитывает влияние времени обработки, температуры, частоты и интенсивности ультразвука, а также коэффициента диффузии, что позволяет более точно моделировать процесс изменения качественных показателей зерна.

Исходя из выражений (4), (5) и (6), давление в жидкости и, соответственно, средние скорости течения жидкости в порокапиллярном пространстве будут интенсифицироваться за счет повышенных амплитуд давления P_{max}, создаваемых акустическими микропотоками. Амплитуды давления в частотном диапазоне до 20 кГц создают пульсирующие микропотоки с высокой интенсивностью их продвижения в порокапиллярном пространстве.

Процесс экстрагирования направлен на извлечение вещества, находящегося внутри пористой структуры молекулы путем постепенного проникновения жидкого растворителя внутрь тела, растворения и выноса твердого растворяемого вещества. Последнее, в свою очередь, диффундирует по порам и переходит в основную массу растворителя. Этот процесс характеризуется нестационарными полями концентрации извлекаемого вещества внутри обрабатываемого материала, когда в начальный момент экстрагирования преодолеваются незначительные расстояния от внутренних точек пористого материала до его поверхности. В последующем расстояния увеличиваются, так как извлекаемое вещество поступает из глубинных слоев пор и капилляров. Скорость экстрагирования при этом уменьшается.

Ультразвуковые колебательные движения попеременно образуют волны высокой разницы давления в жидкой среде. Кинетика этого процесса объясняется тем, что при снижении амплитуды низкого давления акустические микротечения генерируют мелкие пузырьки безвоздушного пространства, которые с течением времени, по мере повышения давления, наращиваются и схлопываются, создавая области высоких давлений. Известно, что прочностные свойства реальных жидкостей из-за появления в них зародышей кавитации снижаются. В связи с этим при обработке существенную роль приобретает установление порога кавитации, зависящего от частоты ультразвука. При интенсивности акустических колебаний, превышающих порог кавитации, микропузырьки газа, образованные в жидкой среде, пульсируют относительно равновесного радиуса и увеличиваются в объеме. Это

влечет за собой возникновение резонансных явлений, создающих амплитуду пульсаций, воздействующих на жидкость более активно в диапазоне низких частот ультразвуковых колебаний. Рассмотренное явление вызывает усиление диффузии. В связи с неоднородностью ультразвукового поля пузырьки поступательно передвигаются в виде пульсирующих микротечений, образуемых при их схлопывании. Вследствие этого внутреннего взрыва кавитационных пузырьков возникают значительные гидродинамические силы сдвига, вызывающие деструкцию обрабатываемого материала. Эти явления вызывают в продвигаемой жидкости интенсивные микропотоки и ударные волны, способные перемешивать слои жидкости, продвигать их в нужном направлении и разрушать поверхности, находящиеся в приграничном слое твердого тела с кавитирующей жидкостью. На применении этих явлений и была основана технологическая схема использования акустических микропотоков для разрыва химических макромолекул фермента ингибитора белка сои, эрозии поверхности твердых тел и насыщения порокапиллярного пространства зерна при его очистке и увлажнении, продвижения продуктов окисления и их фильтрации в адсорбционном слое при обработке растительного масла. Наряду с этим ультразвуковые акустические течения обладают уникальными возможностями повышения внутриклеточной диффузии с бактерицидным эффектом путем межмолекулярного взаимодействия.

Механические воздействия ультразвука на микроорганизмы идентичны указанным, поэтому они действенны и при инактивации патогенной микрофлоры, блокируя ее ферментную структуру и нарушая метаболизм, приостанавливая рост микрофлоры и сохраняя высокое качество продукции растениеводства. Установлено, что на эффективность очищаемого воздействия кавитационного пузырька влияют прежде всего частота и интенсивность ультразвуковых колебаний. Повышенная частота колебаний препятствует достижению момента его схлопывания, что технологически не дает положительного решения ввиду отсутствия эффекта микроударного воздействия пузырька. Низкие частоты также нежелательны, так как ведут к появлению акустического шума и к увеличению размеров излучателя. Поэтому для экспериментальных исследований ультразвуковой очистки поверхности зерна были приняты интервал частоты ультразвука 18…35 кГц и его интенсивность 0,5…1,5 Вт/см^2.

Изменение площади пузырька $f_{\text{р}}$, характеризуемой резонансной частотой, определяется выражением:

$$f_{\text{р}} = \left(\frac{1}{2}\pi R\right)\left[3\gamma\left(p_{\text{г}} + \frac{2\delta}{R}\right)\Big/\rho\right]^{0,5}, \qquad (7)$$

где R – радиус пузырька, мм; γ – показатель адиабаты; $p_г$ – давление газа в пузырьке, МПа; δ – коэффициент поверхностного натяжения; ρ – средняя плотность жидкости, кг/м^3.

Важным параметром для проектирования технологического процесса (а в последующем и технических средств) является кинетика процесса зарождения и развития кавитационного пузырька, изменение его объемных параметров за долю периода ультразвуковых колебаний, что дает возможность установления момента его схлопывания:

$$К = (R_{max}^3 - R_{min}^3)\Delta\tau f, \quad (8)$$

где K – параметр схлопывания кавитационного пузырька; R_{max}^3 и R_{min}^3 – максимальный и минимальный радиусы пузырька соответственно, м; Δτ – время схлопывания, с; f – частота колебаний ультразвука, кГц.

При соприкосновении с оболочкой зерна кавитационные пузырьки схлопываются, образуют ударную волну мгновенного действия и отрывают загрязнения от поверхности. Интенсивность очистки зерна обусловлена потенциальной энергией жидкости E:

$$E = \frac{3}{4}\pi R_{max}^3 P_ж, \quad (9)$$

где $P_ж$ – давление в жидкости, МПа, определяется как давление в окружающей жидкости, действующее на кавитационный пузырек в момент достижения им максимального радиуса R_{max}:

$$R_{max} = \frac{0,4}{f}\left(1 - \frac{P_{ст}}{P_а}\right)\sqrt{\frac{P_а}{\rho}}, \quad (10)$$

где $P_{ст}$ – статическое давление жидкости, МПа; $P_{зв}$ – звуковое давление жидкости, МПа; ρ – плотность жидкости, кг/м^3.

Давление, воздействующее на жидкость от ультразвукового поля, характеризуется следующими параметрами:

$$P_a = c\omega A\rho = \sqrt{2\rho cI}, \quad (11)$$

где c – скорость звука в жидкости, м/с; A – амплитуда акустических колебаний, кГц; I – интенсивность ультразвука, Вт/м^2.

Существенное значение при анализе кинетики имеет потенциальная энергия жидкости $E_{об}$ в области, где образуются кавитационные пузырьки:

$$E_{об} = \frac{3}{4}\pi R_{max}^3 P_ж n, \quad (12)$$

где n – количество кавитационных пузырьков, шт.

Из уравнения (11) следует, что общая потенциальная энергия зарождения и развития кавитационных пузырьков управляема за счет изменения давления в жидкости. Теоретически это подчиняется условию: при изменении частоты акустических кумулятивных колебаний в кавитационной области при какой-то определенной частоте f_1 зарождается n_1 пузырьков, а при f_2 зарождается n_2 пузырьков. Тогда с учетом того, что общая потенциальная энергия в жидкости не изменилась, можно принять:

$$\left[\frac{0{,}4}{\mathrm{f_1}}\right]^3 \mathrm{n_1 P_ж} = \left[\frac{0{,}4}{\mathrm{f_2}}\right]^3 \mathrm{P_ж} n_2 \text{ или } \frac{n_1}{f_1^3} = \frac{n_2}{f_2^3}. \quad (13)$$

Таким образом, установлено, что при разработке режимов ультразвуковой обработки и проектировании технических средств необходимо соблюдать правило о том, что количество кавитационных пузырьков и интенсивность процесса зависят от устанавливаемой частоты ультразвукового поля. И эта зависимость ещё раз подтверждает управляемость процессом зарождения кавитационных пузырьков, нахождение которых в обусловленном интервале ведет к интенсификации процессов.

Предварительными экспериментальными исследованиями установлена зависимость частоты акустических кумулятивных колебаний и потенциальной энергии, образуемой от схлопывания пузырьков, от интенсивности процесса.

В результате теоретических исследований установлено, что процесс зарождения гидроокисей и гидроперекисей в произведенном нерафинированном растительном масле связан с наличием в нем продуктов окисления и в последующем – с зарождением и активизацией в нем свободной радикальной реакции.

Согласно исследованному процессу адсорбции, продвижение жидкости и газа осуществляется в нашем случае сквозь пористую фильтрационную поверхность, предназначенную для поглощения газовых включений в дисперсионной среде. Движущая сила процесса системы «жидкость – газ» обусловлена разностью давлений над фильтрационной перегородкой P_1 и под ней P_2. Изменение давления характеризует скорость протекания процесса.

Следовательно, для повышения интенсивности процесса фильтрации необходимо создать условия для увеличения давления под фильтрационной поверхностью и его снижения в фильтрационной перегородке путем подбора сорбента с низким показателями сопротивления продвижению жидкости.

Скорость фильтрования v является величиной, пропорциональной движущей силе процесса и обратно пропорциональной сопротивлению фильтрованию:

$$v = \frac{Q}{F} = \frac{\Delta P}{\mu R_{\text{фп}}}, \quad (14)$$

где Q – расход масла по объему через фильтр, м^3/с; ΔP – перепад давления на фильтре, Па; μ – динамический коэффициент вязкости масла, Па · с; $R_{\text{фп}}$ –

сопротивление фильтровальной перегородки, м$^{-1}$; F – площадь фильтрационной поверхности, м^2.

На основании уравнения (14) скорость фильтрации определяется ее физической зависимостью от свойств выделяемой и накапливаемой на фильтрационной поверхности взвеси твердых составляющих, образуемого перепада давления над фильтрационной перегородкой и под нею:

$$v = \frac{\Delta P \tau}{\mu r_0 l}, \quad (15)$$

где r_0 - удельное сопротивление осадка, м$^{-2}$;

τ – время фильтрации, с;

l - высота слоя осадка, м.

Исходя из факторных параметров, входящих в выражение (14), для обеспечения высокой производительности фильтрации масла особое внимание следует уделять удалению осадка, образованного на фильтрационной поверхности и высвобождению порокапиллярного пространства сорбента для продвижения жидкости и фильтрации в нем продуктов окисления.

Термодинамически неустойчивые дисперсные и коллоидные системы обладают свойством самопроизвольного укрупнения частиц – коагуляции и коалесценции, что разрушает коллоидную систему с превращением ее в грубодисперсную. Седиментационная устойчивость, являющаяся функцией размеров укрупненных частиц дисперсной фазы, понижается по мере их укрупнения и в функции времени насыщает фильтрационную поверхность коагулянтом. Данное обстоятельство ведет к поэтапному снижению производительности фильтрационного процесса и к необходимости демонтажа картриджа, его замене или очистке. Эта операция занимает много времени, возникает также необходимость тщательной очистки всей установки.

В этой связи была принята рабочая гипотеза о необходимости дополнительного колебательного воздействия на седиментационную устойчивость осадка поверхности адсорбента для создания условий всплывания частиц дисперсной фазы и их перемещения в накопитель загрязнений. Отрыв загрязнений от фильтрационной поверхности может быть осуществлен только принудительно за счет дополнительных продольных колебательных движений. На первом этапе наиболее предпочтительны механические гармонические колебания, призванные отрывать и приподнимать путем всплытия загрязнения от фильтрационной поверхности адсорбента.

Природа затухающих колебательных движений едина, их интенсивность зависит прежде всего от параметров колебательной системы и среды, в той или иной степени препятствующей продвижению материальной точки. На рисунке 2 показано нарушение положения равновесия материальной точки колебательными движениями. На рисунке 3 представлена схема установки для фильтрации масла.

Рисунок 2 – Нарушение положения равновесия материальной точки колебательными движениями

Учитывая тот факт, что полная механическая энергия E гармонически колеблющегося смещаемого тела пропорциональна квадрату амплитуды колебания, следует:

$$E = \frac{1}{2}kA^2, \tag{16}$$

где k – коэффициент упругости, Н/м.

В любой момент времени энергия постоянна. Отсюда следует, что принципиально важным становится обоснование значения амплитуды колебательного движения.

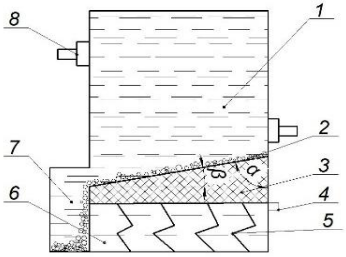


Рисунок 3 – Схема ультразвуковой фильтрационной установки: 1 – ёмкость с маслом; 2 – фильтрующая перегородка; 3 – картридж с адсорбентом; 4 – сливной патрубок; 5 – вибрационный механизм; 6 – очищенное масло; 7 – ёмкость-отстойник; 8 – ультразвуковой возбудитель

На основании закономерности распределения акустических ультразвуковых колебаний в жидкой среде коэффициент затухания α_1:

$$\alpha_1 = \frac{2\eta f^2}{3\rho c^3}, \tag{17}$$

где η – вязкость жидкости, для масла η = 0,0598 Па · с; f – частота акустических колебаний, Гц; ρ – плотность очищаемого масла, ρ = 920 кг/м^3; c – коэффициент сжимаемости масла, c = 20,5 с дополнительными механическими колебательными движениями, создаваемыми гармоническими продольными вибрациями фильтрационной поверхности.

Следовательно, дополнительно прилагаемая частота продольных вибрационных колебаний ω:

$$\omega = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{EG}{m}} \quad (18)$$

где EG – изгибная жесткость материала точки фильтрационной поверхности; E – нормальный модуль упругости; G – модуль упругости при сдвиге кручением; m – масса материальной точки, подвергаемой вибрационным колебаниям, кг.

Качественные показатели растительных масел (кислотное, перекисное, цветное числа) будут определяться по формуле:

$$K_м = K_{мо} + A\cdot \omega \sin(2\pi f t_0) + K_1 \cdot t_x{}^3 - K_2 \cdot t_x \quad (19)$$

где $K_{мо}$ – исходный параметр продукта (для кислотного числа мг КОН/г; для перекисного числа ммоль/кг; для цветного числа мг йода); K_1 – эмпирический коэффициент деградации продукции при хранении (для кислотного числа мг КОН/(г·мес.^{3}); для перекисного числа ммоль/(кг мес.^{3}); для цветного числа мг йода / мес.^{3}); K_2 – поправочный коэффициент для определения параметра (для кислотного числа мг КОН/(г·мес.); для перекисного числа ммоль/(кг·мес.); для цветного числа мг йода·мес.); t_x – время хранения, мес.; t_o – время очистки масла, мин; A – амплитуда колебаний, м; ω – частота вибрационных колебаний фильтрационной установки, с$^{-1}$; f – частота ультразвуковых колебаний, с$^{-1}$.

Для определения скорости движения осадка в масле необходимо рассчитать производительность процесса Q (кг/с):

$$Q = S_{сеч} v \gamma_{уд} K_{распр}, \quad (20)$$

где $S_{сеч}$ – площадь поперечного сечения картриджа, м^2; $\gamma_{уд}$ – плотность осадка, кг/м^3; $K_{распр}$ – коэффициент распределения осадка, $K_{распр} \approx 0{,}6\ldots1{,}0$.

Тогда уравнение скорости перемещения осадка v можно записать в виде:

$$v = \rho_м S_{реш} \eta_м^{-1} K^{(\omega)} f \sin^2\beta \sqrt{(A_в^2 + A_п^2)}, \quad (21)$$

где $\rho_м$ – плотность масла, кг/м^3; $S_{реш}$ – площадь фильтрационной поверхности, м^2; $\eta_м$ – динамическая вязкость масла, Па · с; $K^{(\omega)}$ – коэффициент, учитывающий изменение частоты колебаний, $K^{(\omega)} = \frac{A_в \omega^2}{g}$, с$^{-1}$; f – частота акустических колебаний, Гц; ω – частота механических колебаний, с$^{-1}$; α – угол между направлениями вертикальных колебаний и фильтрационной плоскостью, град.; $A_в$ – амплитуда вертикальных колебаний, м; $A_п$ – амплитуда поперечных колебаний, м; g – ускорение свободного падения, м/с^2; β – угол наклона решетки, град.

Полученная формула (21) позволяет устанавливать скорость перемещения частиц загрязнений, изменяя конструктивные параметры процессов очистки фильтрационной поверхности за счет совместного действия:

• механических колебательных движений в вертикальной плоскости с амплитудой $A_в$, осуществляющих отрыв и подъем частиц и приводящих их во взвешенное состояние над фильтрационной поверхностью;

• акустических колебательных движений в горизонтальной плоскости с амплитудой $A_п$, осуществляющих направленное перемещение взвешенных частиц по наклонной фильтрационной поверхности в емкость-сборник.

В **третьей главе *«Программа и методика экспериментальных исследований»*** приведены программа и структура экспериментальных исследований, представлены описания известных и частных методик, в том числе для обработки экспериментальных данных, лабораторные установки, приборы и оборудование, используемые при выполнении диссертационной работы.

При проведении экспериментальных исследований использовали стандартное и нестандартное оборудование и аппаратуру, позволяющие в лабораторных условиях проводить эксперименты, направленные на подтверждение данных теоретического анализа процессовых явлений массопередачи в условиях гидродинамического, гидротермического и акустического воздействия на обрабатываемый растениеводческий материал.

Для проведения экспериментов применяли установки УЗУ 4-1.6-О (рисунок 4, *а*), УОМ-2 (рисунок 4, *б*), ПСБ-Галс (рисунок 4, *в*), РАП-01 (рисунок 4, *г*), ультразвуковой погружной излучатель.

а

б

в

г

Рисунок 4 – Ультразвуковые установки: *а* – УЗУ 4-1,6-О; *б* – УОМ-2; *в* – ПСБ-Галс; *г* – РАП-01

Программа и структура исследований представлены на рисунке 5.

Рисунок 5 – Программа и структура экспериментальных исследований

При проведении экспериментальных исследований обработке подвергали пшеницу Саратовская 29, сою Злато, Бара, Соер 4, Соер 5, подсолнечник Сара-

товский 82, Саратовский 85. Для изучения процесса фильтрации нерафинированных масел использовали растительные масла, произведенные методом холодного отжима.

В **четвертой главе** ***«Результаты экспериментальных исследований технологических воздействий ультразвуком при обработке продукции растениеводства»*** представлены результаты исследований и дано обоснование количественных и качественных показателей обработки зерна пшеницы, зернобобовых и нерафинированных растительных масел ультразвуковыми колебаниями.

При подготовке зерна к простому помолу по существующей технологии пренебрегают остаточными загрязненностью и зараженностью оболочки зерна микроорганизмами, не устранимыми методом сухого шелушения.

На поверхности зерна пшеницы выделяют несколько типов загрязнений: минеральные частицы (пыль, песок), органические остатки (солома, частицы плевел), микроорганизмы (бактерии, грибки) и химические загрязнители (остатки пестицидов). Адгезия данных загрязнений варьируется от 5 до 1000 Па в зависимости от их природы, размера частиц и локализации на зерне. Наибольшую прочность сцепления демонстрируют микроорганизмы - до 1000 Па в области бороздки и бородки, где плотность микробиологического загрязнения достигает 10^6 КОЕ/см². Плотность распределения минеральных примесей составляет 0,8-1,2 мг/см², при этом до 70% концентрируется в бороздке и бородке зерна. Производителя обойной муки не может удовлетворить длительность процесса очистки и отволаживания, отчего зачастую в размол направляют плохо подготовленное и зараженное зерно. По этой причине ухудшается качество продукции, сокращаются сроки хранения муки и продуктов переработки. Это объясняется тем, что применяемые технологии не обеспечивают полную очистку оболочки зерна, хотя в его бороздке и бородке могут быть сконцентрированы до 2/3 минеральных загрязнений и до 1/3 отложений микроорганизмов.

Степень загрязненности и зараженности исследовали микроаналитическим методом количественного определения загрязненности оболочки зерна, включая зоны бороздки и бородки (рисунок 6).

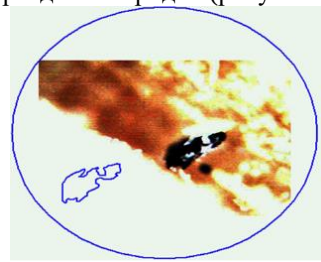


Рисунок 6 – Загрязнения участка оболочки зерна (100×)

Исследования показали, что по причине высокой загрязненности бороздки и бородки зерна невозможно очистить его методом сухой обработки с достижением показателей зольности ниже 1,8 % (рисунки 7, 8).

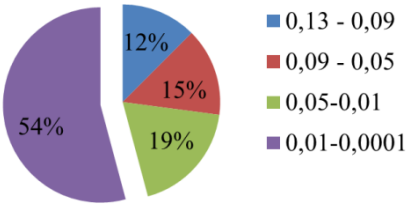


Рисунок 7 – Анализ относительной частоты площади загрязнения зерна минеральными примесями в области бороздки и бородки

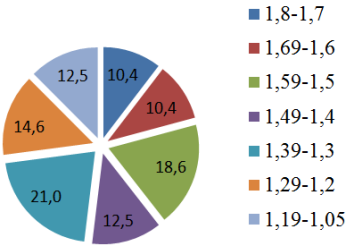


Рисунок 8 – Анализ относительной частоты остаточной зольности зерна, %

Важной составляющей процесса очистки оболочки зерна является время обработки при установленной частоте ультразвуковых колебаний. С этих позиций исследовали зависимость температуры нагрева воды от времени воздействия ультразвуком при постоянной частоте колебаний 18 кГц. Установлено, что даже при незначительном повышении температуры воды (до 30 °С) кавитационное воздействие на загрязнители резко возрастает, и это свидетельствует об увеличении количества кавитационных паровоздушных пузырьков, что соответствует теоретическим предпосылкам, а увеличение частоты и интенсивности ультразвука приводит к разрушению плодовой оболочки и повреждению поверхности зерна (см. рисунок 9), что нежелательно. При нагреве воды до 30 °С и очистке зерна в течение 40 с (рисунок 10) наблюдается практически полное устранение загрязненности оболочки зерна. Выявлена также закономерность снижения загрязненности и зараженности зерна при переменных частотах ультразвука и времени обработки (рисунки 11, 12, 13).

Рисунок 9 – Оболочка зерна пшеницы после воздействия ультразвуком частотой 20 кГц и интенсивностью 3 Вт/см^2 в воде

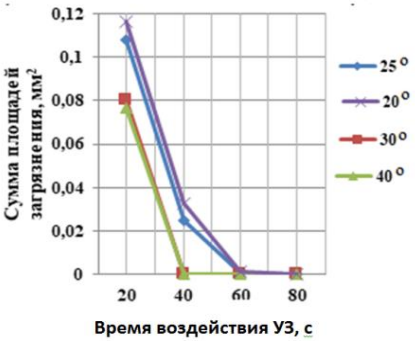


Рисунок 10 – Зависимость изменения суммарной площади загрязненности поверхности зерна от времени обработки и температуры воды (частота УЗ-колебаний 18 кГц)

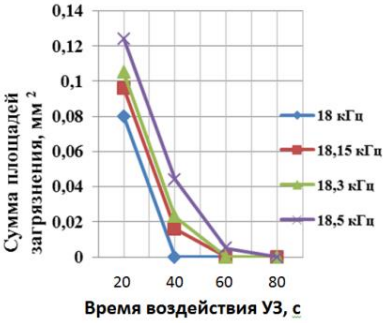


Рисунок 11 – Зависимость изменения суммарной площади загрязненности поверхности зерна от времени обработки и частоты ультразвуковых колебаний (температура обработки 30 °С)

В нативном состоянии в зернах пшеницы и ржи зольность составляет 1,5–2,3 %, а в оболочках – 3,5–24,5 %. При этом большая часть минеральных веществ (до 65 %) находится на оболочке. Это свидетельствует о высокой эффективности процесса очистки зерна с применением ультразвука.

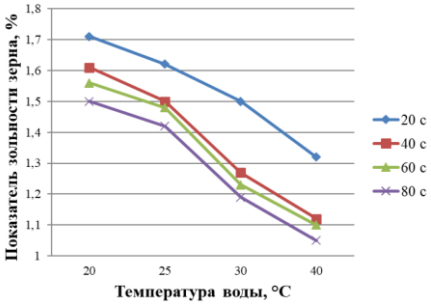


Рисунок 12 – Зависимость изменения зольности зерна от времени обработки и температуры воды (частота УЗ-колебаний 18 кГц)

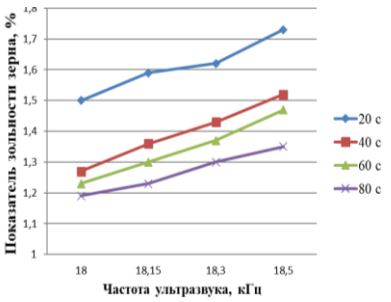


Рисунок 13 – Зависимость изменения зольности зерна от времени обработки и частоты УЗ-колебаний (температура обработки 30 °С)

Для определения рациональных параметров режимов обработки, обеспечивающих достижение необходимого показателя зольности, выполнен многофакторный эксперимент, по результатам которого получены регрессионные уравнения:

$$Y_1 = -6{,}13418 - 0{,}00368X_1 - 0{,}01225X_2 + 0{,}44256X_3; \quad (22)$$

$$Y_2 = 55{,}8439 + 0{,}06879X_1 + 0{,}21939X_2 - 2{,}68774X_3, \quad (23)$$

где Y_1 – зольность, %; Y_2 – влажность зерна, %; X_1 – время обработки, мин; X_2 – температура, °С; X_3 – частота ультразвука, кГц.

В соответствии с экспериментальными данными построена трехмерная поверхность отклика зависимости зольности от температуры и времени обработки (рисунок 14).

Анализ трехмерной поверхности отклика (см. рисунок 14) показал, что с увеличением времени и температуры обработки зольность уменьшается. Минимальных показателей она достигает при времени воздействия УЗ 40 с и температуре не ниже 30 °С.

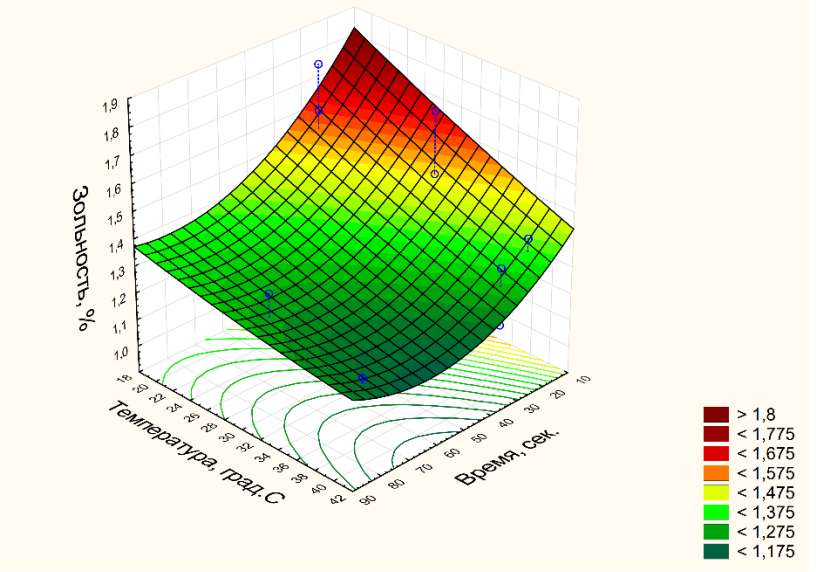


Рисунок 14 – Поверхность отклика зависимости показателя зольности от температуры и времени обработки

В соответствии с теоретическими исследованиями процесса массопередачи установлена возможность значительного повышения интенсивности проникновения влаги в твердую структуру зерна. Это позволяет многократно усилить кинетику процесса. Экспериментально изучены зависимости показателя влажности зерна от времени воздействия УЗ, частоты ультразвука и температуры (рисунки 15 и 16).

Анализ экспериментальных данных показал, что требуемых нормативных помольных показателей влажности зерна можно достичь при обработке ультразвуком частотой 18,0…18,5 кГц, температуре 30 °С и времени обработки 30 с. Несоблюдение установленных времени и температуры обработки приведет к недоувлажнению или переувлажнению зерна с последующим ухудшением его помольных показателей и, как следствие, качества муки. На практике таких показателей влажности зерно достигает после отволаживания в течение 8–48 ч.

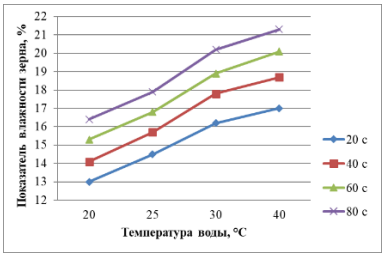


Рисунок 15 – Зависимость изменения влажности зерна от времени обработки и температуры воды (частота УЗ-колебаний 18 кГц)

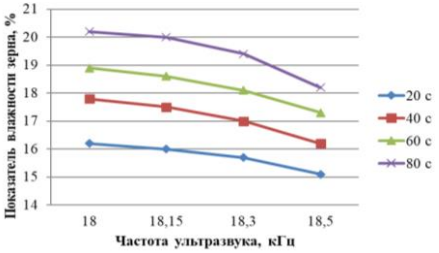


Рисунок 16 – Зависимость изменения влажности зерна от времени его обработки и частоты УЗ-колебаний (температура обработки 30°С)

Анализируя трёхмерную поверхность отклика (рисунок 17), можно сделать вывод о том, что минимальных нормативных значений влажности 14,5 % зерно достигает уже после 25 с обработки при температуре не ниже 26 °С.

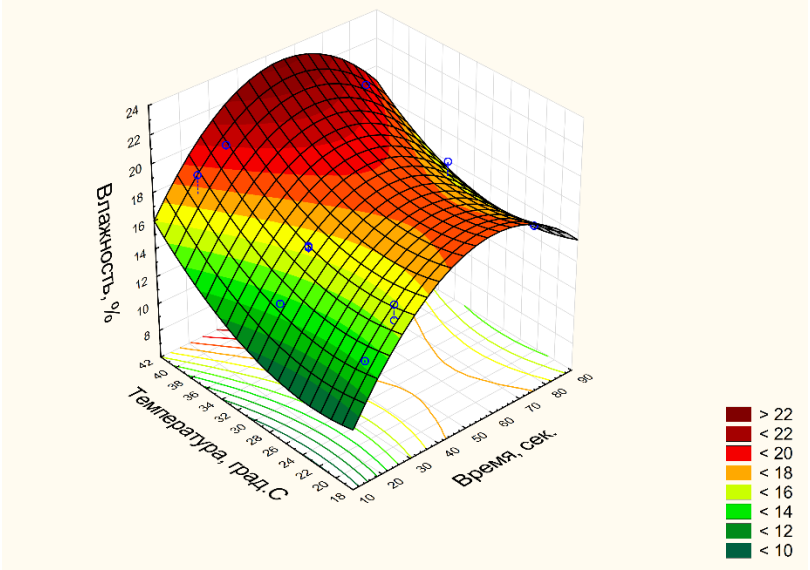


Рисунок 17 – Поверхность отклика зависимости влажности зерна от температуры и времени обработки

Обработка более 60 с даже при минимальной температуре 20 °С приведет к переувлажнению зерна, что недопустимо.

Зерно, поставляемое на зерноперерабатывающие предприятия, может быть поражено плесневыми грибами и микотоксинами (рисунки 18, 19).

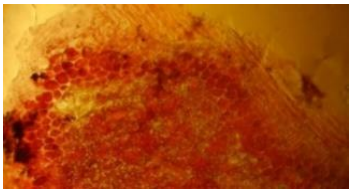


Рисунок 18 – Срез сухого зерна пшеницы, содержащего микотоксины

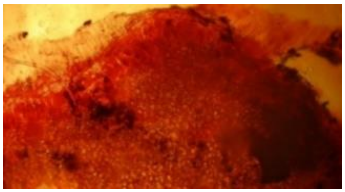
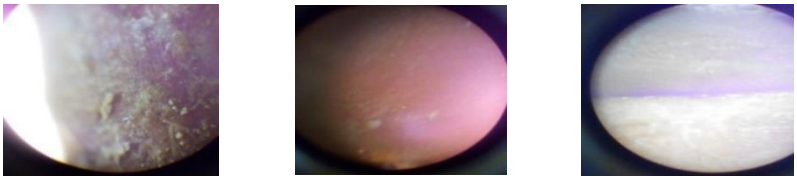


Рисунок 19 – Срез мокрого зерна пшеницы, содержащего микотоксины

Установлено, что ультразвуковая обработка зараженной пшеницы в анолите ведет к 98%-му подавлению микроорганизмов.



а *б* *в*

Рисунок 20 – Влияние ультразвука с частотой волны 26 кГц и анолита АНК на развитие плесневых грибов на поверхности зерновки (160×): *а* – нативное зерно; *б* – в воде; *в* – в среде анолита АНК

Наиболее эффективной оказалась обработка зерна в анолите ультразвуком с частотой 26 кГц при интенсивности волны 1 Вт/см^2 и времени воздействия 30 мин (рисунок 20, *в*).

На рисунке 21 образцы роста колоний нативного зерна (*а*), зерна, обработанного ультразвуком с частотой волны 26 кГц в воде (*б*) и в среде анолита (*в*).

а *б* *в*

Рисунок 21 – Рост колоний микроорганизмов зерна, обработанного ультразвуком в воде и анолите АНК: *а* – нативное зерно; *б* – зерно, обработанное ультразвуком в воде; *в* – зерно, обработанное ультразвуком в среде анолита

Этот способ обработки зерна может применяться для профилактической обработки от продуцентов микотоксинов.

Несмотря на высокую пищевую ценность, обусловленную содержанием белка (до 60%), жира (до 22%), клетчатки (до 7%) и полного набора незаменимых аминокислот, соя характеризуется наличием антипитательных веществ, в частности ингибиторов протеолитических ферментов трипсина и

уреазы, которые оказывают негативное влияние на биологическую ценность конечного продукта. Для инактивации ингибиторов трипсина и уреазы используется термическая обработка, которая оказывает негативное влияние на качество продукта. В процессе нагревания наблюдаются денатурация белковых структур, частичное разрушение незаменимых аминокислот, таких как лизин, а также деградация термолабильных витаминов. Эти изменения приводят к значительному снижению питательной и биологической ценности соевого сырья.

Установлено, что основными факторами, определяющими эффективность и интенсивность обработки, являются: степень измельчения семян, концентрация окислителя в рабочем растворе, частота ультразвука и время обработки.

Определено также, что за счет увеличения площади измельченной сои ускоряется омываемость поверхностей пульсирующими ультразвуковыми микропотоками. Поры и устьица материала становятся легкодоступными для проникновения воды, экстрагирования и выноса ингибиторов трипсина и уреазы, что ведет к более чем 55%-му повышению интенсивности массопередачи.

В нашем случае процесс массопередачи с наложением схлопывающихся парогазовых кавитационных пузырьков при низкочастотном ультразвуковом воздействии (18…20 кГц) создает условия для образования пероксида водорода. Белки, окисленные в среде ультразвука, интенсивно присоединяют воду, проявляются активные гидрофильные свойства. Динамика экстрагирования зерна сои после обработки ультразвуком представлена на рисунках 22, 23.

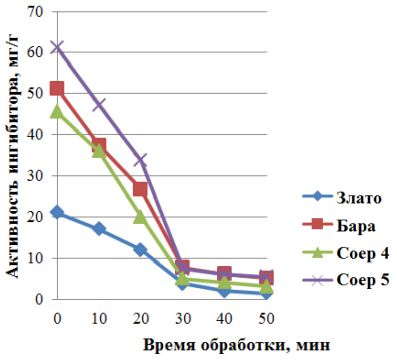


Рисунок 22 – Зависимость активности ингибитора трипсина от времени обработки (частота ультразвука 18 кГц)

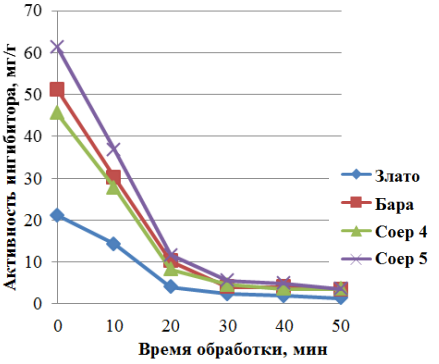


Рисунок 23 – Зависимость активности ингибитора трипсина от времени обработки (частота ультразвука 20 кГц)

Результатами исследований установлено, что в течение первых 10–15 мин обработки начинается процесс инактивации, далее обработка протекает

более интенсивно. Активность ингибитора уже при 30 мин обработки снижается до 3–7 мг/г.

По результатам многофакторного эксперимента было получено уравнение регрессии:

$$Y = 10,236 + 2,3X_1 - 1,079X_2 - 0,077X_3 -$$

$$-0,071X_1^2 + 0,012X_2^2 + 0,014X_3^2, \quad (24)$$

где Y – активность ингибитора трипсина, мг/г; X_1 – частота ультразвука, кГц; X_2 – время, мин; X_3 – температура, °С.

По экспериментальным данным построена поверхность отклика ультразвуковой обработки сои при частоте ультразвука 20 кГц (рисунок 24).

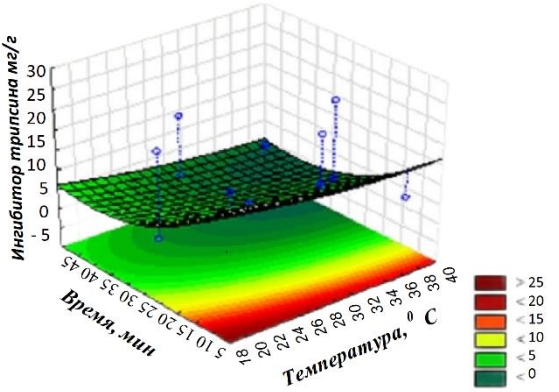


Рисунок 24 – Поверхность отклика обработки сои при частоте ультразвука 20 кГц

В качестве аналога принята тепловая оработка сои в автоклаве при температуре 120 °С и давлении 0,1 МПа в течение 15 мин. Ее сравнивали с 30-минутной ультразвуковой обработкой при частоте ультразвука 20 кГц и его интенсивности 1 Вт/см^2.

Эффективность ультразвуковой обработки сои подтверждается экспериментальными данными (см. таблицу).

Таблица 1 - Качественные показатели нативной сои, обработанной автоклавированием и ультразвуком

Сорт	Контролируемый параметр					
	активность уреазы, ед. pH			активность ингибитора трипсина, мг/г		
	нативная	автоклав	УЗ	нативная	автоклав	УЗ
Злато	2,33	0,68	0,33	21,1	2,53	2,3
Бара	2,26	0,59	0,29	51,2	7,17	4
Соер 4	2,21	0,57	0,24	45,6	5,02	4,6
Соер 5	2,31	0,64	0,21	61,3	4,90	3,6

При отжиме маслосемян в естественных условиях окружающей среды происходит увеличение кислотности нерафенированных масел за счёт окисления и гидролиза липидов. В результате, изменение состава масла приводит к снижению его качества.

Очистку масла от первичных и вторичных продуктов окисления осуществляли путем его пропуска сквозь слой адсорбента, состоящего из специально подготовленных минералов опоки и доломита. Качество и продолжительность очистки зависела от интенсивности прохождения масла сквозь поры и устьица адсорбента, а также от его загрязненности при фильтрации.

Ультразвуковые колебательные движения при частоте ультразвука 18 кГц и интенсивности ультразвука 1 Вт/см^2 при фильтрации масла использовали в качестве дополнительных к гидромеханическим и гравитационным движущим силам, создающим импульсные послойные микропотоки, интенсифицирующие продвижение масла в фильтре. Твердые примеси, находящиеся в масле во взвешенном состоянии, укрупняются за счет коагуляции под воздействием акустических колебаний, не закупоривают поры и устьица адсорбента, оседают на фильтрационной поверхности, с которой их в последующем убирают.

Необработанные нерафинированные подсолнечные масла содержат более 2 % общих примесей, включающих в себя мезгу, жмых, шрот, мыла, воска, следы пестицидов, пигментов и других веществ, ведущих к активизации процесса окисления и ферментации. Все примеси, находящиеся в масле в виде частиц дисперсной фазы, имеют размеры от 0,005 до 1,5 мм и плотность 1,1–1,4 г/см^3 при плотности масла 0,92 г/см^3. Процесс закупоривания пор и устьиц адсорбента, удаления и выноса отложений потоками полидисперсной системы представлен на рисунке 25.

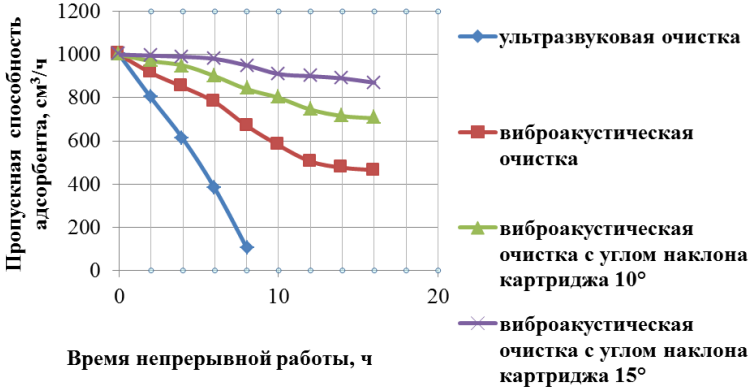


Рисунок 25 – Пропускная способность адсорбента в зависимости от времени непрерывной очистки

Проницаемость фильтра при фильтрации только в акустическом потоке с горизонтально расположенным картриджем замедляется уже в первый двухчасовой цикл исследования на 18 %. Исследованиями совмещенного акустического и гидромеханического процессов установлена необходимость создания направленных продольных акустических микропотоков и поперечных вибрационных пульсирующих колебаний. Наряду с этим определена возможность удаления твёрдых частиц по наклонно установленной поверхности картриджа при угле наклона его поверхности 10°…15°. После 16-часового цикла испытаний скорость фильтрации при угле наклона 10° уменьшается на 29 %, а при 15° – на 13 %.

Интенсивность окисления нерафинированного масла без очистки от продуктов окисления к 3-му месяцу хранения достигает 52,6 %, а к 4-му она находится на рубеже выхода из показателей 1-го сорта масла, после чего его употребление в пищевых целях не допускается.

Аналогично повышению кислотного числа при хранении снижается концентрация антиоксидантов, призванных препятствовать окислительному процессу. Установлено, что если на момент производства масла окислительная стойкость свободных жирных кислот была на достаточном для высшего сорта уровне, составляющем 2,21 $[AO]\cdot10^{-3}$ моль/кг, а интенсивность ее снижения в период инициирования свободной радикальной реакции после 2 мес. хранения не превышала 6 %, то уже к третьему месяцу концентрация антиоксидантов снизилась до 1,52 $[AO]\cdot10^{-3}$ моль/кг.

Это соответствует 32%-му изменению концентрации антиоксидантов и свидетельствует об активизации процесса окисления в условиях разветвления цепной свободной радикальной реакции. В дальнейшем, по мере увеличения срока хранения, концентрация антиоксидантов значительно снижается: к 4 мес. – на 62 %, к 5 мес. – на 96 %, а к 6 мес. она доходит до нулевого состояния.

Показатели кислотного числа характеризуют процесс расщепления молекулы триглицерида с образованием свободных жирных кислот, ухудшающих вкус, запах, цвет и прозрачность масла. При повышении кислотности и появлении масляной, капроновой и каприновой кислот появляются запах разложения и мыльный привкус продукта. При очистке нерафинированных подсолнечных масел в ультразвуковой установке возможно снижение кислотного числа с максимально достигнутого при хранении уровня 5,4 мг КОН/г до показателей, регламентируемых ГОСТ 1129-2013 (рисунок 26). Перекисное число характеризует процесс окисления липидов с образованием перекисей, являющихся продуктом реакции кислорода с ненасыщенными жирными кислотами, представляющими собой первичные продукты реакции окисления. Цветное число отражает качество переработки семян. Оно связано с эффективностью фильтрации и активностью окисления как в процессе производ-

ства, так и при хранении, так и с наличием в перерабатываемом продукте каротиноидов и хлорофилла. Последний нежелателен в масле, так как является сенсибилизатором окисления.

Если при очистке масла после трехмесячного хранения все показатели кислотного, перекисного, анизидинового и цветного чисел можно снизить, и продолжить использование масла как продукта питания, то основной антиоксидант токоферол, в силу своих физико-химических особенностей, регенерации не подлежит. При окислении масла уже после 6 мес. хранения этот показатель достигает нулевого значения. Отсюда следует, что нерафинированные подсолнечные масла следует подвергать очистке после 3 мес. хранения.

Данные анализа изменения показателей кислотного, перекисного, цветного чисел и токоферола представлены на рисунках 26–28.

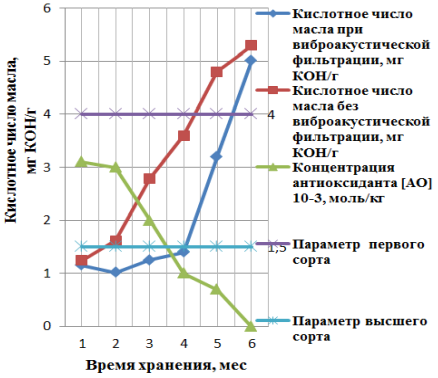


Рисунок 26 – Изменение кислотного числа и концентрации антиоксидантов в зависимости от времени хранения

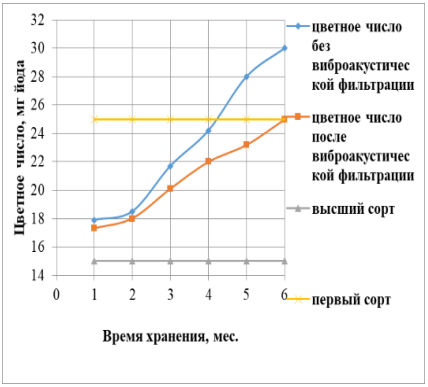


Рисунок 27 – Изменение цветного числа в зависимости от времени хранения

По результатам многофакторного эксперимента было получено уравнение регрессии:

$$Y = 1{,}85 - 0{,}788X_1 - 0{,}01X_2 + 0{,}228X_1^2, \qquad (25)$$

где Y – кислотное число, мг КОН/г; X_1 – время хранения, мес.; X_2 – время очистки, мин.

Поверхность отклика зависимости кислотного числа масла от времени хранения и времени очистки представлена на рисунке 29.

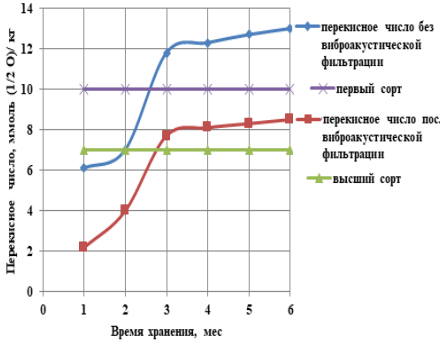


Рисунок 28 – Изменение перекисного числа в зависимости от времени хранения

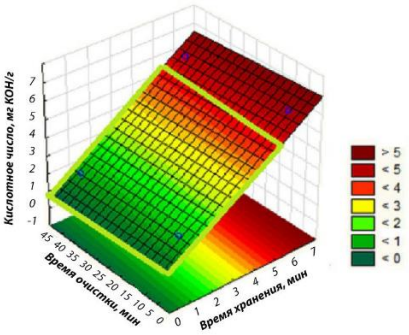


Рисунок 29 – Поверхность отклика зависимости кислотного числа масла от времени хранения и времени очистки

Исходя из анализа параметров технологического воздействия на принятую к исследованию продукцию растениеводства установлены режимные показатели, являющиеся основой для конструирования технических средств, представленных на рисунках 33, 34.

Сравнение теоретических и экспериментальных кривых по зольности в зависимости от времени обработки зерна, представлено на рисунке 30, по влажности зерна – на рисунке 31, по кислотному числу масла – на рисунке 32.

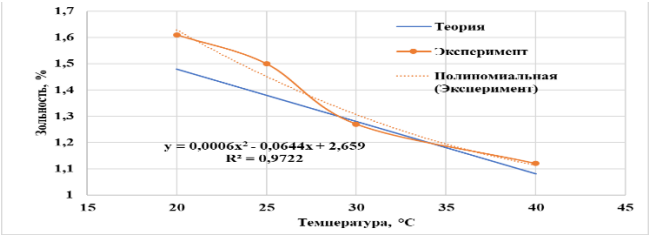


Рисунок 30 – Сравнение теоретических и экспериметнальных кривых по зольности зерна

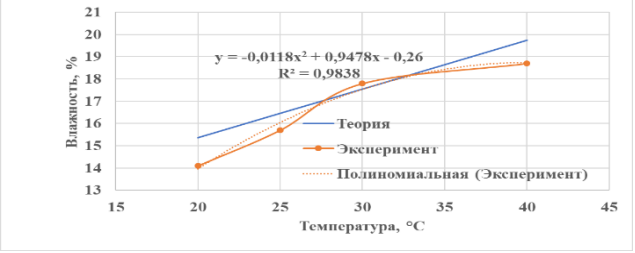


Рисунок 31 – Сравнение теоретических и экспериметнальных кривых по влажности зерна

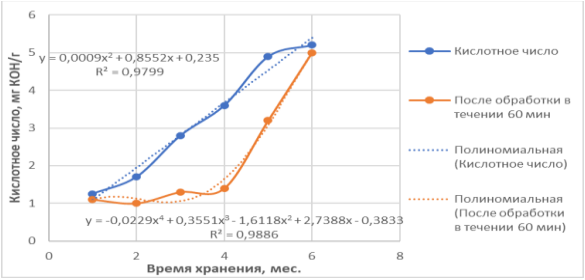


Рисунок 32 – Сравнение теоретических и экспериметнальных кривых по кислотному числу масла

Величина достоверности апроксимации по зольности 0,96-0,97, по влажности 0,98-0,99, по кислотному числу масла – 0,97-0,98, что свидетельствует о высокой точности разработанных моделей.

В **пятой главе *«Производственные испытания технических средств для ультразвуковой обработки зерна, зернобобовых культур и нерафинированных растительных масел»*** приведены результаты производственных испытаний универсальной установки для обработки зерновых и зернобобовых культур, а также фильтрационной установки.

Производственные испытания опытно-промышленных образцов установок для ультразвуковой обработки зерновых, зернобобовых культур и фильтрации масел были проведены в ООО «Химмаш-Старт» (г. Пенза). Они показали, что конструкции обеспечивают все этапы технологического воздействия (рисунок 33).

а

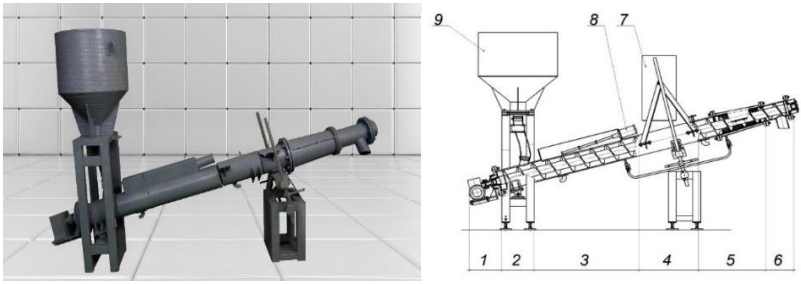
б

в

Рисунок 33 – Производственная сборка ультразвуковых установок:
а - изготовление; б – универсальная ультрзвуковая установка для обработки продукции растениеводства, в - ультразвуковая фильтрационная установка для очистки масла

Универсальную установку (рисунок 34) проверяли на холостом ходу и при полном рабочем режиме. В бункер загружали 50 кг размолотого полножирного зерна сои, рабочую зону заполняли водой, во вращающийся шнековый механизм путем открытия шиберной заслонки подавали обрабатываемое зерно. Излишки воды до достижения пропорции 50:50 автоматически вытеснялись перепускным клапаном, установленным в корпусе шнека. После обработки проверяли степень инактивации ингибитора трипсина и уреазы в зерне сои. Аналогично проводили обработку зерна пшеницы, после чего проверяли параметры влажности и зольности.

Применение установки (см. рисунок 34) показало, что после обработки следы минеральных загрязнений и зараженности отсутствуют; активность ингибитора трипсина после 30 мин обработки ультразвуком снижается с 50–60 до 3–5 мг/г, что подтверждает 6-кратное повышение эффективности инактивации при времени обработки 30 мин.; активность уреазы в исходном состоянии зерна сои уменьшается с 2,5 до 0,2 ед. pH после ультразвуковой обработки, что также свидетельствует о высокой эффективности процесса инактивации.



а *б*

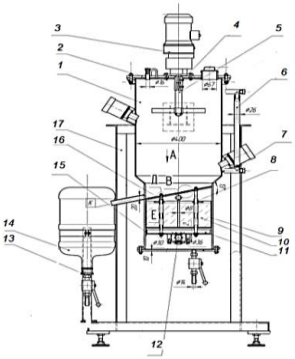
Рисунок 34 –Универсальная ультразвуковая установка для обработки продукции растениеводства

а – общий вид; *б* – схема: 1 – приводная станция; 2 – зона смешивания суспензии; 3 – рабочая зона ультразвуковой обработки; 4 – зона предварительного удаления жидкости; 5 – зона отжима; 6 – зона выгрузки; 7 – ёмкость для подпитки водой; 8 – пьезокерамическая колебательная система; 9 – бункер для зерна

Ультразвуковую фильтрационную установку (рисунок 35) проверяли на холостом ходу и при полном рабочем режиме. В корпус установки загружали 100 л нерафинированного растительного масла, очистку проводили в течение 30 мин. Степень очистки коллоидно-дисперсной взвеси твердых дисперсных частиц в фильтрационной установке (см. рисунок 35) достигает к 30 мин 1,2 тыс. шт./100 см^3 при начальном значении 57 тыс. шт./100 см^3.

После обработки кислотное число сокращается с 1,3 до 1,1 мг КОН/г, перекисное число – с 6 до 2,1 ммоль свободного кислорода/кг, цветное число – с 17 до 15,9 мг йода.

а



б

Рисунок 35 – Ультразвуковая фильтрационная установка для очистки масла: *а* – общий вид; *б* – схема: 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – мотор-редуктор; 4 – винтовое крепление мешалки; 5 – мешалка; 6 – ротаметр; 7 – ультразвуковой излучатель; 8 – нажимная букса; 9 – картридж для сорбента; 10 – сорбент; 11 – днище; 12 – электромеханический вибратор; 13 – кран; 14 – отстойник; 15 – сливной цилиндр; 16 – фильтрационная мембрана; 17 – опора

В **шестой главе** ***«Технико-экономические показатели работы ультразвуковых технических средств»*** определен экономический эффект от внедрения разработанных установок в производство. Он составляет 935,9 тыс. руб. при годовой производительности предприятия 3359,5 т муки; 1271,8 тыс. руб. при годовой производительности предприятия 2371,2 т сои; 1311,9 тыс. руб. при годовой производительности предприятия 276640 л растительного масла. Срок окупаемости установок при производстве муки – 0,68 года, при производстве кормов из зерна сои – 0,51 года, при фильтрации масел – 0,33 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе научно обосновано применение ультразвуковых воздействий в технологиях переработки зерновых, зернобобовых и нерафинированных растительных масел, на основе которых разработаны разнличные технологии и технические средства очистки и увлажнения зерна пшеницы, обработки сои и фильтрации нерафинированных растительных масел с целью интенсификации технологических процессов и повышения качества готовых продуктов переработки.

1. При анализе литературных и патентных источников установлено, что в настоящее время в промышленности доминируют методы обработки зерновых, зернобобовых культур и растительных масел, основанные на высокотемпературных и химических воздействиях. Однако их применение сопряжено с системными недостатками, существенно ограничивающими эффективность производственных процессов и качество получаемого продукта: продолжительность увлажнения зерна при обойном помоле достигает 2–3 часов для достижения нормативных показателей (14,5-17%) влажности зерна; инактивация антипитательных веществ в сое не

соответствует современным требованиям безопасности; потери белка в процессе обработки составляют 15–20%, а незаменимых аминокислот — до 25% вследствие денатурации при термическом воздействии; высокая остаточная загрязненность зерновой оболочки зерна пшеницы минеральными отложениями; высокая зараженность микроорганизмами (10^3–10^4 КОЕ/г) и сохранение патогенной микрофлоры после обработки; в нерафинированных маслах содержание первичных и вторичных продуктов окисления обуславливает превышение нормативных показателей. Нестабильность параметров обработки приводит к 15% потерям сырья. Удельное энергопотребление традиционных процессов на 40–50% выше необхо-димого уровня. При проведении анализа технической литературы установлено, что использование ультразвуковой обработки продукции растениеводства позволит интенсифицировать процессы экстракции, фильтрации и мойки.

2. В результате проведенных теоретических исследований установлены закономерности массопередачи, обусловленные гидродинамическими, гидротермическими и физическими явлениями, возникающими под воздействием ультразвука. Разработаны математические модели и аналитические выражения процессов массообмена при ультразвоковой обработке зерновых, зернобобовых культур и нерафинированного подсолнечного масла для определения качественных показателей зерна и растительных масел в зависимости от времени обработки, температуры и частоты ультразвука. Ультразвуковые колебания повышают среднюю скорость течения жидкости в порокапиллярных системах на 65-70 %, что ускоряет процессы массообмена в 2 – 3 раза. Это позволило интенсифицировать технологические воздействия на обрабатываемую продукцию за счет увеличения амплитудного давления на 30-40 % и оптимизации условий протекания процессов при частоте 18-26 кГц и интенсивности ультразвука 0,9-1,2 Вт/см². Исследованы механизмы влияния ультразвукового воздействия на качественные показатели зерна пшеницы (влажность, зольность, содержание микроорганизмов), сои (активность ингибиторов трипсина и уреазы) и растительных масел (кислотное, перекисное и цветное числа). Установлено, что кавитационные процессы, инициируемые ультразвуковым воздействием, интенсифицируют процессы обработки в 2-3 раза. Теретическими исследованиями установлено, что эффективное разрушение загрязнений с поверхности зерна достигается при диапазоне радиусов (5 - 50 мкм) кавитационных пузырьков и частоты колебаний (18-26 кГц). Также получены зависимости, характеризующие скорость фильтрации мелкодисперсных частиц взвеси и перемещения осадка в отстойник установки. На основе проведенных теоретических исследований впервые установлена математическая взаимосвязь между технологическими параметрами ультразвуковой обработки (частотой, интенсивностью и

временем воздействия) и качественными показателями продукции растениеводства.

3. В результате комплексных лабораторных исследований нормативных показателей зерновых и зернобобовых культур, а также сырого нерафинированного растительного масла выявлены следующие несоответствия: высокая остаточная загрязненность оболочки зерна минеральными отложениями и микроорганизмами, что приводит к превышению допустимых значений зольности на 15–20%; длительный процесс увлажнения, при котором влажность зерна достигает нормируемых значений (14,5–17,0%) для простого помола; потеря белка, аминокислот и витаминов при высоких температурах обработки сои. Установлены режимы обработки пшеницы, сои и фильтрации растительных нерафинированных масел для получения показателей соответствущих нормативным требованиям. При очистке оболочки и увлажнении зерна пшеницы частота колебаний 18,0…18,2 кГц; амплитуда колебаний $1{,}22 \cdot 10^{-3}$ м; интенсивность ультразвуковых волн 0,99 Вт/см^2; время обработки 40 с; температура нагрева суспензии 30…40 °С обеспечивают 100%-ю очистку оболочки, стабильное увлажнение зерна (14,5–17,0%); а при частоте 26 кГц – 98%-е уничтожение микроорганизмов. При очистке нерафинированного растительного масла от продуктов окисления и коллоидно-дисперсных веществ время обработки составляет 30 мин при частоте ультразвука 18 кГц и интенсивности не более 1 Вт/см^2. Кислотное число снижается на 84 %, перекисное число – в 2 раза, цветное число – на 30 %. Исследования показали, что применение ультрафильтрации увеличивает срок хранения масла за счет замедления окислительных процессов.

4. Установлено, что применение разработанных ультразвуковых технологий позволило интенсифицировать скорость процессов массообмена и диффузии влаги в структуре зерна в 2–3 раза за счет кавитации и микропотоков. Установлено, что при частотах ультразвука 18-20 кГц и температурах 30–40°С инактивация антипитательных веществ происходит с потерями белкового комплекса и витаминов не превышающими 5%, что обеспечивает сохранность питательной ценности продукции. Установлено, что аультразвуковая кавитация в растительных маслах ускоряет процесс фильтрации в 1,5-2 раза или на 50 % и снижает перекисное число на 65–70% , цветное число на 30–40%, а кислотное число — на 84–85%, доводя их значения до нормативных показателей ГОСТ, что позволяет хранить масла при температуре +10...+20°С без применения химических реагентов. Установлено, что разработанные ультразвуковые технологии сокращают удельные энергозатраты на 30–45% по сравнению с термообработкой при этом повышается производительность оборудования для обработки зерна на 20–30% , а для очистки масел — на 40–50% .

5. Разработаны инновационные ультразвуковые технологии обработки продукции растениеводства, а также конструкции опытно-промышленных

установок для их осуществления. Универсальная установка непрерывного действия шнекового типа для обработки сыпучей продукции растениеводства (патент на полезную модель №208531, патент на полезную модель №, 223297, патент на изобретение №2707130), характеризующаяся производительностью: для сои – 1200 кг/ч ; для зерна пшеницы – 1700 кг/ч; повышающая эффективность очистки оболочки зерна на 98 %, а также увлажнение и инактивацию антипитательных веществ в сыпучих материалах на 96-98% за счет направленного ультразвукового воздействия.

Установка периодического действия для очистки нерафинированных растительных масел (патент на изобретение № 2677031, патент на полезную модель №218182) увеличенной на 30 % по сравнению с традиционными методами производительностью, величина которой составила 100 л/ч позволяет эффективнее на 84,5 %, по сравнению с существующими технологиями, удалять продукты окисления и коллоидно-дисперсные частицы из масла.

Проведенными производственными испытаниями установлено, что значения всех технологических параметров подтвердили высокую эффективность разработанных технологий и установок, их соответствие нормативным требованиям и экономичность внедрения в промышленное производство.

6. Технико-экономическими исследованиями установлен экономический эффект от внедрения разработанных установок в производство, составляющий 935,9 тыс. руб. при годовой производительности предприятия 3359,5 т муки; 1271,8 тыс. руб. при годовой производительности 2371,2 т сои; 1311,9 тыс. руб. при годовой производительности предприятия 276640 л растительного масла. Срок окупаемости установок при производ-стве муки – 0,68 года, при производстве кормов из сои – 0,51 года, при фильтрации масел – 0,33 года. Установлено, что использование разработанных установок снизило энергозатраты на 20-25 % при производстве муки и повысило на 15-20 % производительность процессов обработки зерновых, зернобобовых культур и фильтрации растительных нерафинированных масел, а также на 30-35 % улучшило следующие показатели качества продукции: снизились потери сырья на 15–20% , увеличился выход готовой продукции на 5–7% и сократилось время обработки в 2–3 раза по сравнению с традиционными методами (высокотемпературной обработкой, химическими способами и механической очисткой), что подтверждает целесообразность их широкого внедрения в перерабатывающую промышленность.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Результаты научных исследований могут быть применены на перерабатывающих предприятиях различной мощности при производстве обойной муки, кормов из сои, растительных масел, а также

при разработке и создании подобного оборудования в конструкторских бюро предприятий. Возможно использование полученных качественных показателей продукции растениеводства при разработке технических средств для ее обработки.

Для процессов увлажнения, мойки и очистки продукции ратениеводства рекомендуется универсальная ультразвуковая установка (патент № 208531, 223297), позволяющая ускорить процессы обеззараживания, очистки, мойки и отволаживания зерна, инактивации ингибиторов трипсина и уреазы зернобобовых (патент № 130519), а также повысить эффективность кормовой и пищевой ценности зерновых и зернобобовых культур.

Для уменьшения содержания в зерне плесневых грибов, предотвращения развития микотоксинов, уменьшения загрязненности минеральными примесями и насекомыми-вредителями рекомендуется применять способ профилактической обработки зерна (патент № 2707130).

Для очистки сырых и нерафинированных растительных масел от продуктов окисления следует применять способ производства растительных масел (патент на изобретение № 2677031, 218182).

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Актуальны дальнейшие исследования, направленные на снижение содержания вредных антипитательных веществ, ускорения процессов переработки растениеводческой и животноводческой продукции с целью повышения качества кормов, продуктов питания и производительности технологических процессов. Разработанные методические основы и технические решения могут быть адаптированы для различных типов сырья и условий производства, что делает их универсальными и применимыми в любых перерабатывающих производствах.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

В научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. *Рудик, Ф. Я.* Интенсификация водной обработки зерна сои с помощью ультразвука / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, Ю. А. Кодацкий // Научное обозрение. – 2013. – № 1. – С. 66–69.

2. *Рудик, Ф. Я.* Закономерность распределения акустических колебаний в среде растительного масла при его очистке / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, М. С. Тулиева, А. К. Гумарова // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2013. – № 8. – С. 75–77.

3. *Рудик, Ф. Я.* Приоритетные направления развития пищевой индустрии и производства растительных масел / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, М. С. Тулиева // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2014. – № 1. – С. 87–89.

4. *Рудик, Ф. Я.* Факторы, обусловливающие процесс порчи масла при хранении / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, М. С. Тулиева // Аграрный научный журнал. – 2015. – № 4. – С. 66–69.

5. *Рудик, Ф. Я.* Ультразвуковая обработка зерна при подготовке к помолу / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова,** Л. Ю. Скрябина, Н. А. Семилет // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2016. – № 2. – С. 53–56.

6. *Рудик, Ф. Я.* Закономерности массообменных процессов при переработке семян сои в корм / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, Ю. А. Кодацкий // Аграрный научный журнал. – 2016. – № 5. – С. 70–73.

7. *Рудик, Ф. Я.* Интенсификация подготовки зерна к помолу / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, Н. А. Семилет // Аграрный научный журнал. – 2018. – № 7. – С. 52–54.

8. *Рудик, Ф. Я.* Технология и технические средства для переработки сои / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, Н. А. Семилет, И. Р. У. Абдумаликов, Д. В. Макаров // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 3. – С. 91–95.

9. *Рудик, Ф. Я.* Факторная взаимосвязь параметров гармонической колебательной системы при очистке фильтрационной поверхности установки для регенерации растительного масла / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, Е. А. Сундуков // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 12. – С. 100–102.

10. *Рудик, Ф. Я.* Технология и средства механизации для обработки зерна / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, Е. С. Красникова, Е. А. Фауст, Н. А. Семилет // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2020. – № 1. – С. 137–147.

11. *Рудик, Ф. Я.* Аналитическое исследование интенсификации процесса массопередачи при инактивации зерна сои в ультразвуковой установке / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, Д. В. Макаров // Аграрный научный журнал. – 2021. – № 2. – С. 95–97.

12. *Рудик, Ф. Я.* Теоретический анализ и обоснование процесса взаимодействия гидродинамических колебательных систем при технологическом воздействии на зернобобовые культуры / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, Д. В. Макаров // Аграрный научный журнал. – 2021. – № 9. – С. 92–94.

13. *Рудик, Ф. Я.* Факторная взаимосвязь кинетики неравновесных процессов в растительном масле при очистке фильтрационной поверхности установки для регенерации растительного масла / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, Е. А. Сундуков, Н. А. Семилет, И. С. Кисилева // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 5. – С. 90–93.

14. ***Моргунова, Н.Л.*** Ультразвуковая технология обработки зерновых и зернобобовых культур/ Н.Л. Моргунова// Аграрный научный журнал. – 2022. – № 12. – С. 86–88.

15. *Макаров, Д.В.*. Разработка установки для инактивации зерна сои ультразвуком / Д.В. Макаров, **Н. Л. Моргунова**, Ф. Я. Рудик, О.С. Фоменко, Н.А.Семилет // Труды Елецкого ГУ, Агропромышленные технологии. – 2023. – вып.3 – №29. – С. 116-128.

16. ***Моргунова, Н.Л.*** Интенсификация технологии переработки зерна сои ультразвуком/ Н.Л. Моргунова, Ф.Я. Рудик, В.С. Куценкова, А.В Банникова., Д.В. Макаров // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2024. № 2. С. 186-192.

17.***Моргунова, Н.Л*** Повышение эффективности подготовки зерна к помолу пульсирующими ультразвуковыми микропотоками/ Н.Л Моргунова., Ф.Я Рудик., В.С Куценкова., А.В. Банникова, С.А .Леонова //Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2024. № 2.

С. 198-204.

18. ***Моргунова, Н.Л.*** Исследование изменения качественных показателей зерна пшеницы при эксплуатационно-технологической обработке ультразвуком в водной среде/ Н.Л. Моргунова, Ф.Я. Рудик, А.А. Жиздюк, В.Н. Буйлов// Аграрный научный журнал. – 2025. – № 4. – С. 111–118.

В научных изданиях, включенных в базы данных Scopus и Web of Science

19. *Rudik, F. Ya.* Improving Soybean Processing Using Ultrasound / F. Ya. Rudik, B. P. Zagorodskih, **N. L. Morgunova**, Yu. A. Kodatsky // Vestnik Mordovskogo Universiteta. – 2018. – 28(2). – 266–286. – DOI: https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.

20. *Rudik, F. Ya.* Improvement of Grain Processing via Ultrasonic Treatment / F. Ya. Rudik, **N. L. Morgunova**, N. A. Semilet, M. S. Tuliyeva // Conference on Innovations in Agricultural and Rural Development : IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science. – 341. – 2019. – DOI:10.1088/1755-1315/341/1/012117.

21. *Rudik, F. Ya.* Decontamination of Grain by Ultrasound / F. Ya. Rudik, **N. L. Morgunova**, E. S. Krasnikova // Conference on Innovations in Agricultural and Rural development : IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science. – 2019. – DOI:10.1088/1755-1315/421/2/022022.

22. *Rudik, F. Ya.* Technology for Reducing Urease Activity in Soybeans / F. Ya. Rudik, **N. L. Morgunova**, N. A. Semilet, L. G. Lovtsova, Z. I. Ivanova, Sh. A. Pfeifer // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – 2020. – DOI:10.1088/1757-899X/862/6/062005.

23. **Morgunova, N. L.** Technologies and Technical Means of Soybean Processing / N. L. Morgunova, F. Ya. Rudik, N. A. Semilet, S. A. Bredikhin, A. S. Bredikhin, D. V. Makarov, E. A. Sundukov // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science, Vol. 640. International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials, Voronezh, Russian Federation Citation. – 2021. – DOI:10.1088/1755-1315/640/2/022059.

24. **Morgunova, N. L.** Optimal Parameters of Processing Wheat Grain in an Ultrasonic Installation / N. L. Morgunova, F.Ya. Rudik, O. S. Fomenko, D. V. Makarov, E. A. Sundukov // IOP Conference Series : Earth and Environmental Sciencethis Link is Disabled. – 2022. – DOI:10.1088/1755-1315/979/1/012080.

25. **Morgunova, N. L.** Ultrasound in the food and processing industry / N. L. Morgunova, F.Ya. Rudik, N. A. Semilet // BIO Web of Conferences 43, 03030. – 2022. – DOI:10.1051/bioconf/20224303030

В авторских свидетельствах и патентах

26. **Пат. на пол. мод. 130519 Российская Федерация, МПК B 02 B 1/04.** Устройство для обработки зерна / Рудик Ф. Я., **Моргунова Н. Л.**, Кодацкий Ю. А. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова». – № 2013112532/13 ; заявл. 20.03.2013 ; опубл. 27.07.2013., Бюл. № 21. – 11 с.

27. **Пат. 2677031 Российская Федерация, МПК C 11 B 1/06.** Способ производства растительных масел / Рудик Ф. Я., **Моргунова Н. Л.**, Севостьянова И. О. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова». – № 2017146289 ; заявл. 27.12.2017. ; опубл. 15.01.2019, Бюл. № 2. – 6 с.

28. **Пат. 2707130 Российская Федерация, МПК A 01 F 25/00.** Способ профилактической обработки зерна / **Моргунова Н. Л.**, Рудик Ф. Я., Красникова Е.

С. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова». – № 2019108524 ; заявл. 25.03.2019, опубл. 22.11.2019., Бюл. № 33. – 7 с.

29. **Пат. на пол. мод. 208531 Российская Федерация, МПК B 02 B 5/00.** Устройство для обработки зерна, пивного солода, семян масличных культур / Макаров Д. В., Сундуков Е. А., Рудик Ф. Я., **Моргунова Н. Л**. ; патентообладатели ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова», ООО «Химмаш-Старт». – № 2021109239 ; заявл. 05.04.2021, опубл. 23.12.2021, Бюл. № 36. – 4 с.

30. **Патент на пол. мод. 218182 Российская Федерация, МПК C11B 3/16.** Установка для очистки пищевых растительных масел от механических примесей/ **Моргунова Н.Л**., Рудик Ф.Я.,Макаров Д.В., Сундуков Е.А. и др. - № 2022133111; заявл.15.12.2022 г.; опубл. 15.05.2023 г., Бюл.№ 14. – 4 с.

31. **Патент на пол. мод. 223297 Российская Федерация, МПК B02B 5/02.** Многофункциональное шнековое устройство для обработки зерновых и зернобобовых культур/ Рудик Ф.Я.,**Моргунова Н.Л**., Макаров Д.В., Сундуков Е.А. и др. - № 2023134013; заявл.20.12.2023 г.; опубл. 13.02.2024 г., Бюл.№ 5. – 5 с.

В журналах, сборниках научных трудов, материалах конференций и семинаров

32. **Моргунова, Н. Л.** Повышение эффективности обработки зерновых культур перед переработкой / Н. Л. Моргунова // Аграрная наука в 21 веке : проблемы и перспективы : сб. статей VII Всерос. науч.-практ. конф. – Саратов, 2013. – С. 264–266.

33. **Моргунова, Н. Л.** Соя – польза или вред / Н. Л. Моргунова // Наука о питании : технологии, оборудование, качество и безопасность пищевых продуктов : матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию СГАУ им. Н. И. Вавилова. – Саратов, 2013. – С. 119–122.

34. *Рудик, Ф. Я.* Особенности подготовки зерна к помолу / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, М. С. Марадудин, Н. А. Семилет // Актуальные проблемы ветеринарной медицины и пищевых технологий : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : ИЦ «Наука», 2016. – С. 137–142.

35. *Рудик, Ф. Я.* Способы гидродинамической обработки зерна / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, М. С. Марадудин, Н. А. Семилет // Актуальные проблемы ветеринарной медицины и пищевых технологий : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : ИЦ «Наука», 2016. – С. 150–154.

36. *Рудик, Ф. Я.* Методика определения загрязнений зерна исследованием состояния микроплощадей / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, И. Ф. Савельев // Технология и продукты здорового питания : матер. VII Междунар. практ. конф. – Саратов : Буква, 2013. – С. 107–109.

37. *Рудик, Ф. Я.* Исследование технологических режимов очистки и отволаживания зерна пшеницы в ультразвуковой среде / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, И. Ф. Савельев // Технология и продукты здорового питания : матер. VII Междунар. практ. конф. – Саратов : Буква, 2013. – С. 105–106.

38. *Рудик, Ф. Я.* Экстрагирование ингибиторов протеолитических ферментов из зерна сои / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, Ю. А. Кодацкий // Аграрная наука в 21 веке : проблемы и перспективы : сб. статей VII Всерос. науч.-практ. конф. – Саратов : Буква, 2013. – С. 277–281.

39. *Рудик, Ф. Я.* Теоретическое обоснование влияния соевых ингибиторов на процесс пищеварения и эффективность их экстрагирования // Ф. Я. Рудик, **Н. Л.**

Моргунова, Ю. А. Кодацкий // Технология и продукты здорового питания : матер. VII Междунар. практ. конф. – Саратов : Буква, 2013. – С. 100–104.

40. *Рудик, Ф. Я.* Физико-химические показатели масла / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, М. С. Тулиева // Наука о питании : Технологии, оборудование и безопасность пищевых продуктов : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2013. – С. 159–162.

41. *Рудик, Ф. Я.* Неомыляемые вещества в составе масел / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, М. С. Тулиева // Наука о питании : Технологии, оборудование и безопасность пищевых продуктов : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2013. – С. 162–164.

42. *Рудик, Ф. Я.* Химико-физические показатели, обусловливающие качество нерафинированных подсолнечных масел / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, М. С. Тулиева // Матер. IX Междунар. науч.-практ. конф. – Польша, 2013. – С. 78–83.

43. *Рудик, Ф. Я.* Очистка масел отстаиванием и фильтрацией / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, М. С. Тулиева // Новые технологии и технические средства в АПК : матер. Междунар. конф., посвящ. 105-летию со дня рождения проф. Красникова В. В. – Саратов : КУБиК, 2013. – С. 156–157.

44. *Рудик, Ф. Я.* Очистка масел центрифугированием / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, М. С. Тулиева // Новые технологии и технические средства в АПК : матер. Междунар. конф., посвящ. 105-летию со дня рождения проф. Красникова В. В. – Саратов : КУБиК, 2013. – С. 158–159.

45. *Рудик, Ф. Я.* Окисление и очистка сырых и нерафинированных подсолнечных масел при хранении / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, М. С. Тулиева // Технология и продукты здорового питания : матер. VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2014. – С. 302–304.

46. *Рудик, Ф. Я.* Особенности технологии производства растительных масел / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, М. С. Марадудин, М. С. Тулиева // Актуальные проблемы ветеринарной медицины, пищевых и биотехнологий : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : ИЦ «Наука», 2016. – С. 142–145.

47. *Рудик, Ф. Я.* Пищевая ценность и развитие масложировой отрасли / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, М. С. Марадудин, М. С. Тулиева // Актуальные проблемы ветеринарной медицины, пищевых и биотехнологий : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : ИЦ «Наука», 2016. – С. 145–150.

48. *Рудик, Ф. Я.* Способы гидротермической обработки зерна / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, М. С. Марадудин, Н. А. Семилет // Актуальные проблемы ветеринарной медицины, пищевых и биотехнологий : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : ИЦ «Наука», 2016. – С. 150–157.

49. *Рудик, Ф. Я.* Распределение ультразвуковых и колебательных волн при очистке сырых и нерафинированных подсолнечных масел / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, М. С. Тулиева // Технологии и продукты здорового питания : матер. X Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2018. – С. 82–89.

50. *Рудик, Ф. Я.* Анализ экспериментального исследования процесса фильтрования сырого и нерафинированного подсолнечного масла / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, М. С. Тулиева // Технологии и продукты здорового питания : матер. X Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2018. – С. 90–98.

51. *Рудик, Ф. Я.* Снижение активности антипитательных веществ сои обработкой в ультразвуковой установке / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, И. О. Севостьянова // Совершенствование инженерно-технического обеспечения производственных процессов и технологических систем : матер. Междунар. науч.-практ. конф. / отв. ред. В. А. Шахов. – Оренбург : Издательский центр ОГАУ, 2018. – С. 148–151.

52. *Рудик, Ф. Я.* Современные способы подготовки зерна к помолу / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, И. О. Севостьянова // Совершенствование инженерно-технического обеспечения производственных процессов и технологических систем : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Оренбург : Издательский центр ОГАУ, 2018. – С. 151–154.

53. **Моргунова, Н. Л.** Обеззараживание зерна / Н. Л. Моргунова, Е. С. Угольникова // Инновационные технологии в пищевой промышленности : наука, образование и производство : сб. матер. VI Междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж, 2019. – С. 66–69.

54.*Рудик, Ф. Я.* Очистка и регенерация нерафинированных растительных масел / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, С. А. Бредихин, М. С. Тулиева // Известия ТСХА. – 2019. – Вып. 1. – С. 113–126.

55. *Рудик, Ф. Я.* Интенсификация процесса массопередачи ультразвуковыми колебаниями / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, Н. А. Семилет, Ф. Хасанов // Пищевые технологии будущего : инновации в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции : сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2020. – С. 314–316.

56. **Моргунова, Н. Л.** Технологическое воздействие ультразвуком при обработке продукции растениеводства / Н. Л. Моргунова, Д. В. Макаров, Е. А. Сундуков, Ф. Я. Рудик, Н. А. Семилет // Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия : сб. статей Всерос. науч.-практ. конф. – М., 2020. – С. 708–711.

57. *Рудик, Ф. Я.* Влияние ультразвука на набухаемость сои / Ф. Я. Рудик, **Н. Л. Моргунова**, Н. А. Семилет, Ш. А. Пфейфер, Е. С. Угольникова // Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия : сб. статей Всерос. науч.-практ. конф. – М., 2020. – С. 705–708.

58. **Моргунова, Н. Л.** Повышение эффективности технологий и технических средств переработки зерновых, зернобобовых и масличных культур с ультразвуковой интенсификацией процесса / Н. Л. Моргунова, Ф. Я. Рудик, Е. А. Сундуков, Н. А. Семилет, Д. В. Макаров, Е. С. Угольникова, Ш. А. Пфейфер // Инженерия перспективного продовольственного машиностроения на основе современных технологий : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Воронеж, 2020. – С. 127–130.

59. **Моргунова, Н. Л.** К вопросу обеспечения кормопроизводства высококачественными белками растительного происхождения / Н. Л. Моргунова, Д. В. Макаров, Ш. А. Пфейфер, Ф. Я. Рудик // Агрофорсайт. – 2021. – № 1. – С. 1–5.

60. **Моргунова, Н. Л.** Развитие производства и контролируемые качества нерафинированных масел / Н. Л. Моргунова, Е. А. Сундуков, Е. С. Угольникова, Ф. Я. Рудик, М. С. Тулиева // Агрофорсайт. – 2021. – № 1. – С. 1–5.

61. **Моргунова, Н. Л.** Целесообразность использования зерна сои в кормопроизводстве и пищевой индустрии / Н. Л. Моргунова, Д. В. Макаров, Ф. Я. Рудик // Технологии и продукты здорового питания : сб. статей XII Национальной науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Саратов, 2021. – С. 401–403.

62. *Сундуков, Е. А.* Технологии производства растительных масел. Преимущества и недостатки / Е. А. Сундуков, **Н. Л. Моргунова**, Ф. Я. Рудик // Технологии и

продукты здорового питания : сб. статей XII Национальной науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Саратов, 2021. – С. 634–637.

63. *Сундуков, Е. А.* Повышение эффективности действия совмещенных ультразвуковых и вибрационных колебательных волн / Е. А. Сундуков, **Н. Л. Моргунова**, Ф. Я. Рудик // Пищевые технологии будущего : инновации в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции : сб. статей II Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2021. – С. 686–688.

64. *Макаров, А. Н.* Анализ и обоснование процесса взаимодействия гидродинамических и акустических колебательных систем при технологическом воздействии на зерно сои / А. Н. Макаров, **Н. Л. Моргунова**, Ф. Я. Рудик, Н. А. Семилет // АПК России : образование, наука, производство : сб. статей III Всерос. (национальной) науч.-практ. конф. – Пенза, 2022. – С. 220–223.

65. **Моргунова, Н. Л.** Интенсификация процесса переработки сои с помощью ультразвука/ Н. Л. Моргунова//Новое в технологии и технике функциональных продуктов питания на основе медико-биологических воззрений: сб. статей X Междунар. науч.- техн. конф. – Воронеж, 2022. – С. 34-37

66. ***Моргунова, Н.Л.*** Универсальная установка для обработки зерновых и зернобобовых культур/Н.Л. Моргунова// Национальные приоритеты развития агропромышленного комплекса материалы национальной научно-практической конференции с международным участием/– Оренбург: 2022. – С.87–89.

67. Макаров, Д.В. Гидродинамические закономерности массообменных процессов при обработке зерна сои/ Д.В. Макаров, **Н.Л. Моргунова**, Ф.Я. Рудик// Сборник: АПК России: образование, наука, производство. Сб. статей V Всерос. (национальной) научно-практической конф. с междунар. участием. - Пенза, 2023. – С. 102-107

68. Сундуков, Е.А. Физико - химические процессы, обусловливающие повышение эффективности адсорбционной очистки растительных масел/ Е.А. Сундуков, **Н.Л. Моргунова**, Ф.Я. Рудик. // Сборник: АПК России: образование, наука, производство. Сб. статей V Всерос. (национальной) научно-практической конф. с междунар. участием. - Пенза, 2023. – С. 119-121.

Подписано в печать 03.06.2025г Формат 60×84 1/16
Печ. л. 2,0 Тираж 100