МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ГЕНЕТИКИ,
БИОТЕХНОЛОГИИ И ИНЖЕНЕРИИ ИМЕНИ Н. И. ВАВИЛОВА»

На правах рукописи

Моргунова Наталья Львовна

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

Специальности
4.3.1 – Технологии, машины и
оборудование для агропромышленного комплекса

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор

Рудик Феликс Яковлевич

Саратов 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ……. 10

1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗЕРНОВЫЕ, ЗЕРНОБОБОВЫЕ КУЛЬТУРЫ И НЕРАФИНИРОВАННЫЕ РАСТИТЕЛЬНЫЕ МАСЛА И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ ……..……. 21

1.1 Значение зерновых, зернобобовых и масличных культур для России…… 21

1.2 Особенности способов подготовки зерновых культур к помолу …….. 24

1.2.1 Особенности строения и технологические свойства зерновых культур ……..……. 24

1.2.2 Требования, предъявляемые к зерновым культурам 28

1.2.3 Способы и средства механизации обеззараживания зерна …….. 29

1.2.4 Способы и средства механизации технологического процесса подготовки зерна к помолу …… 37

1.3 Особенности способов подготовки зернобобовых культур ……. 47

1.3.1 Особенности строения и технологические свойства зернобобовых культур ……..…… 48

1.3.2 Требования, предъявляемые к зернобобовым культурам ……. 53

1.3.3 Способы и средства механизации подготовки зернобобовых культур к кормопроизводству ……..…… 53

1.4 Особенности способов очистки растительных масел …….. 59

1.4.1 Особенности строения и технологические свойства 59

масличных культур ……
1.4.2 Требования, предъявляемые к масличным культурам
и нерафинированным маслам …… 61
1.4.3 Способы и средства механизации очистки нерафинированных
растительных масел ……... 63
1.5 Применение ультразвука в пищевых и перерабатывающих
производствах ……. 69
Выводы по главе ……. 72
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ЗЕРНОВЫХ, ЗЕРНОБОБОВЫХ КУЛЬТУР И ФИЛЬТРАЦИИ НЕРАФИНИРОВАННЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ
…….. 74
2.1 Закономерности, обусловливающие повышение эффективности очистки
и экстрагирования продукции растениеводства …….…….. 77
2.2 Анализ и обоснование взаимодействия гидродинамических
и колебательных процессов при технологическом воздействии
на продукцию растениеводства …….…… 79
2.2.1 Теоретиеское обоснование закономерностей массообменных
процессов при определении конструктивных параметров установки
для экстрагирования зерна сои и увлажнения зерна пшеницы ……. 81
2.2.2 Гидродинамические закономерности массообменных процессов ….. 90
2.2.3 Повышение интенсивности массообменных процессов
акустическими колебательными микропотоками ……... 96
2.3 Теоретическое исследование закономерности растворения
ингибитора трипсина ……. 104
2.4 Теоретическое исследование процесса очистки фильтрационной
поверхности от накопленных частиц осадка ……... 107

2.4.1 Фильтрация нерафинированных подсолнечных масел
от продуктов окисления ……. 107

2.4.2 Факторная взаимосвязь параметров гармонической
колебательной системы ……. 113

2.4.3 Исследование физических кинетических факторов,
воздействующих на колебательную систему при нарушении
ее равновесия …….. 122

2.4.4 Повышение эффективности действия совмещенных
ультразвуковых и вибрационных колебаний …….. 126

2.4.5 Математическое моделирование показателей качества продукции расте-
ниеводства……. 130

Выводы по главе ……. 134

3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ……. 135

3.1 Обоснование программы экспериментальных исследований ……. 135

3.2 Применяемые лабораторное оборудование и аппаратура …… 140

3.3 Методика определения показателей зерна пшеница …… 142

3.3.1 Методика и средства лабораторных исследований 143

3.3.2 Методика определения абсолютного количества минеральных
загрязнений на поверхности зерна ……... 143

3.3.3 Методика определения микробиологических показателей
пораженного зерна ……. 144

3.4 Методика определения основных качественных показателей
зерна сои ……. 145

3.4.1 Методика определения степени измельчения зерна сои …….. 146

3.4.2 Методика определения активности ингибитора трипсина ……... 147

3.5 Методика определений качественных показателей 148

нерафинированных растительных масел высокой пищевой ценности…..
3.5.1 Методика определения токоферолов …….. 149
3.5.2 Методика исследования проницаемости фильтрующей перегородки в зависимости от её загрязнённости …….. 149
3.5.3 Методика исследования взвешенных частиц в масле ……... 151
3.6 Методика производственных испытаний технологий и технических средств ……... 151
3.6.1 Методика производственных испытаний универсальной шнековой ультразвуковой установки непрерывного действия ……. 152
3.6.2 Методика производственных контрольных испытаний опытного образца ультразвуковой шнековой установки ……... 154
3.6.3 Методика производственных испытаний ультразвуковой установки для фильтрации растительного масла…… 155
3.6.4 Методика производственных контрольных испытаний опытного образца ультразвуковой фильтрационной установки ……... 156
3.6.5 Обработка экспериментальных данных и оценка их точности…….. 156
Выводы по главе…… 157
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА УЛЬТРАЗВУКОМ ……..... 158
4.1 Результаты экспериментальных исследований зерна при стандартной схеме подготовки зерна к простому помолу в обойную муку …….. 158
4.1.1 Исследование загрязненности оболочки зерна …….. 158
4.1.2 Исследование зольности зерна …… 161
4.1.3 Исследование влажности зерна ……... 162

4.1.4 Исследование прочностных свойств зерна …… 164

4.1.5 Исследование содержания клейковины в зерне …… 165

4.2 Результаты экспериментальных исследований показателей зерна после ультразвуковой обработки …….. 167

4.2.1 Исследование загрязненности оболочки зерна …….. 169

4.2.2 Исследование зольности зерна …… 171

4.2.3 Исследование влажности зерна ……... 173

4.2.4 Исследование прочностных свойств зерна ……. 179

4.2.5 Исследование микробиологических показателей зерна, пораженного микроскопическими грибами и микотоксинами ……. 181

4.2.6 Анализ экспериментальных данных технологического процесса обработки зерна ……..…. 185

4.2.6.1 Анализ экспериментальных данных технологического процесса увлажнения зерна ……. 186

4.2.6.2 Анализ экспериментальных данных технологического процесса очистки зерна ……..……. 188

4.2.6.3 Анализ экспериентальных данных профилактической обработки зерна ……...…190

4.3 Результаты экспериментальных исследований обработки зерна сои …. 193

4.3.1 Исследование качественных показателей зерна сои ……. 194

4.3.2 Исследование активности уреазы от степени измельчения обрабатываемых нативного зерна сои …….. 195

4.3.3 Исследование концентрации окисляющего раствора …… 196

4.3.4 Исследование зависимости изменения активности ингибитора трипсина от времени замачивания зерна сои …….. 198

4.3.5 Исследование качественных показателей зерна сои после гидротермической обработки …… 200
4.4 Динамика процесса экстрагирования зерна сои ультразвуком ……... 201
4.4.1 Исследование активности ингибитора трипсина ……... 201
4.4.2 Исследование изменения показателя активности уреазы ……. 203
4.4.3 Исследования основных показателей качества зерна сои после ультразвуковой обработки …… 204
4.4.4 Анализ экспериментальных данных технологического процесса обработки зерна сои ……. 206
4.4.5 Обоснование конструкции универсального оборудования непрерывного действия для обработки зерна пшеницы и сои ……. 209
4.5 Результаты экспериментальных исследований очистки нерафинированных растительных масел от продуктов окисления и взвеси загрязнений …….. 219
4.5.1 Исследование количества взвешенных частиц в обрабатываемом масле …… 220
4.5.2 Результаты исследования проницаемости фильтрующей перегородки в зависимости от ее загрязненности …….. 223
4.5.3 Результаты исследования параметров кислотного числа и антиоксиданта токоферола ……. 225
4.5.4 Результаты исследования цветного и перекисного чисел …… 226
4.5.5 Анализ экспериментальных данных технологического процесса очистки масла ……... 229
4.5.6 Обоснование режимов очистки растительного нерафинированного масла ……. 233
Выводы по главе ……. 241

5 ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА, ЗЕРНОБОБОВЫХ КУЛЬТУР И НЕРАФИНИРОВАННЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ ……..…… 243

5.1 Результаты производственных испытаний ультразвуковой установки для непрерывной обработки зерна сои …….. 243

5.2 Результаты производственных испытаний ультразвуковой установки для очистки нерафинированных растительных масел ……. 249

Выводы по главе ……. 253

6 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ……... 254

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ……...……... 261

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ …… 265

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ …… 266

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ …….. 267

ПРИЛОЖЕНИЯ …….. 301

Приложение А …….. 302

Приложение Б …….. 303

Приложение В …….. 305

Приложение Г …….. 306

Приложение Д ……...……... 307

Приложение Е …….. 308

Приложение Ж ……. 309

Приложение З ……... 310

Приложение И …….. 312

Приложение К …….. 314

Приложение Л …….. 321

Приложение М …….. 322

Приложение Н …….. 326

Приложение О …….. 328

Приложение П ……. 329

Приложение Р …….. 330

Приложение С …….. 331

Приложение Т …….. 334

Приложение У …….. 335

Приложение Ф……..……..…….. 343

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей задачей агропромышленного комплекса страны является совершенствование технологий и технических средств, обеспечивающих качественный и безопасный процесс получения продуктов переработки.

Зерновые, масличные и бобовые культуры являются основой продовольственной безопасности страны. В настоящее время в Российской Федерации достигнута почти полная обеспеченность населения продуктами, производимыми сельскохозяйственной отраслью 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) [1]. Из Саратовской области напрямую экспортировано 135,2 тыс. т зерновых, зернобобовых культур и 21,6 тыс.т продуктов переработки зерна [2].

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 производства, переработки и хранения сельскохозяйственной продукции, их внедрение;
- разработка и реализация программ технической и технологической модернизации, включая внедрение новой техники и технологий, обеспечивающих повышение производительности труда, энергоэффективность, ресурсосбережение и снижение потерь в сельском хозяйстве;
- обеспечение соответствия продукции обязательным требованиям технических регламентов Евразийского экономического союза;
- продолжение гармонизации международных требований, характеристик и параметров качества и безопасности кормов и пищевой продукции на основе фундаментальных исследований;

• обеспечение снижения зависимости от импорта технологий, машин и оборудования.

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

Исходя из этого важным направлением повышения эффективности использования зерновых, зернобобовых и масличных культур являются разработка и внедрение современных ресурсосберегающих технологий и технических средств, обеспечивающих получение конкурентоспособной, безопасной продукции для производств, в том числе для предприятий малой мощности и фермерских хозяйств.

Актуальность темы исследования. Потери зерновых, масличных и бобовых культур достигают 15 % из-за неправильных условий хранения и несовершенных технологических приемов их обработки. В России потенциал зерновых, масличных и бобовых культур не используется на 100 % [3]. Отсутствуют современные технологии, обеспечивающие сохранность полезных веществ. Зачастую применяют такие, которые не совместимы с продуктами питания. Например, химические операции отбеливания и улучшения муки в зерноперерабатывающей промышленности в последние годы заменили новые технологические приемы переработки. Это привело к тому, что в хлебе присутствуют улучшители, разрыхлители, которые ухудшают качество муки и губительно влияют на здоровье нации.

Нерациональное использование основных культур, выращиваемых в России, является главной проблемой, не решенной до настоящего времени. Поэтому необходимы научно обоснованные щадящие ресурсосберегающие технологии, позволяющие продлевать сроки хранения, минимизировать потери и улучшать ценность продуктов переработки.

Актуальность совершенствования процесса подготовки зерна к простому помолу обусловлена необходимостью его тщательной очистки от минеральных примесей, продуцентов микотоксинов, вредителей, а также доведения до необходимых кондиционных нормативных помольных показателей.

Актуальность совершенствования процесса обработки зерна сои обусловлена необходимостью удаления антипитательных веществ – ингибиторов трипсина, которые резко снижают эффективность усвоения белка пищеварительным трактом сельскохозяйственных животных, вызывая угнетение роста и панкреатическую гипертрофию. По этой причине усвояемость белка зерна сои крайне низкая. На практике возникает необходимость обязательного снижения активности ингибиторов и нейтрализации уреазы, что осуществляют различными гидротермическими методами, которые характеризуются низкими показателями эффективности обработки зерна сои как с позиции качества получаемого продукта, себестоимости, так и с позиции потерь биологической ценности.

Актуальность совершенствования производства растительных сырых и нерафинированных масел, обладающих высокой пищевой ценностью, обусловлена необходимостью увеличения сроков их хранения за счет фильтрации от первичных и вторичных продуктов окисления и регенерации на стадии производства и хранения.

Исходя из этого, исследования, направленные на повышение эффективности технологий и технических средств обработки зерновых, зернобобовых и масличных культур, являются актуальными и имеют важное народнохозяйственное значение для страны.

Актуальность работы обусловлена также тем, что она была 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 аграрного университета № 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 их пищевой и кормовой ценности занимались та-

кие ученые, как С. А. Бредихин, А.Н. Глобин, Г. А. Егоров, С. В. Зверев, А. А. Курочкин, 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. [4–16]. Вопросы обеззараживания зерновых культур отражены в работах Д. А. Будникова, В. А. Шаршунова, Г. Г. Юсупова, Yan Zhu, Lu Guoqing и др. [17–22]. 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 [23–29].

Исследованию отдельных вопросов, связанных с повышением эффективности обработки сельскохозяйственного сырья за счет интенсификации технологических процессов ультразвуковой обработкой, посвящены работы Г. Н. Архиповой, В. В. Ботвинниковой, И. В. Даниловцевой, И. С. Демчука, Л. А. Донсковой, А. С. Комоликова, Ф. Я. Рудика, В. Н. Хмелева, T. S. Awad, H. Feng, S. D. Jayasooriya и других отечественных и зарубежных ученых [30–40]. Теоретический анализ взаимодействия обрабатываемых объектов с жидкостью при использовании ультразвука представлен в работах Б. В. Акопяна, Д. В. Герасимова, В. А. Константинова, Г. А. Остроумова, А. А. Семерчана, А. М. Фрид, В. Б. Флинна, Я. И. Френкеля, M. Kornfeld, C. A. Parson, P. Haller и др. [41–51].

На сновании проведенного анализа работ выдвинута **научная гипотеза** о возможности повышения эффективности обработки продукции растениеводства ультразвуковой интенсификацией процессов, обеспечивающих 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.

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

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

Задачи исследований:

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

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 воз-действия 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 составляющих. 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».

Практическая значимость обусловлена разработкой технологий и технических средств, позволяющих значительно интенсифицировать процессы очистки сырых нерафинированных растительных масел от продуктов окисления, их регенерации, подготовки зерна к помолу, хранению и низкотемпературной инактивации ингибиторов трипсина и уреазы в сое (патенты № 2677031, 130519, 2707130, 218182, 208531, 223297).

Шнековая ультразвуковая установка внедрена в ООО «Мельница», ООО «Анастасьинское», ООО Агрофирма «Биокор-С» (приложения *Н, О, Р*), а фильтрационная ультразвуковая установка – в ООО «Анастасьинское», ООО Агрофирма «Биокор-С» (приложения *П, Р*).

Практическая значимость подтверждена уведомлениями о соответствии проектов 131306 «Разработка промышленной технологической установки для ультразвуковой обработки зерновых и зернобобовых культур», 134452 «Разработка промышленной технологической установки для очистки нерафинированных растительных масел ультразвуком» требованиям Положения о положительном решении присвоения статуса участника проекта Сколково и грантом на изготовление установок.

Результаты исследований могут быть использованы в производственных целях конструкторскими организациями при выборе технологий и предложенных технических средств, а также учебными заведениями и специалистами АПК.

Методология и методика исследований. Теоретические исследования проводили на основе методов прикладной математики, математической статистики, физических и химических про-цессовых 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 зер-

новых 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, достаточным количеством выполненных экспериментов в соответствии с действующими ГОСТами, сертифицированного оборудования и приборов, совпадением части полученных результатов с данными других исследователей по соответствующей тематике, производственными испытаниями установок и внедрением полученных результатов в производство (приложения *И, К, Л, М, Н, О, П*), выступлениями на всероссийских и международных конференциях с докладами о результатах исследований, одобрением и публикацией материалов в ведущих научных журналах.

Сделанные 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.) (приложение *А*), 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.), на Международной научно-практической конференции «Наука о питании: технологии, оборудование, качество и безопасность пищевых продуктов»

(Саратов, 2013 г.), на IX Международной научно-практической конференции «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami – 2013» (Польша, 2013 г.), на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы ветеринарной медицины и пищевых технологий» (Саратов, 2016 г.), на Международной научно-практической конференции «Совершенствование инженерно-технического обеспечения производственных процессов и технологических систем» (Оренбург, 2018 г), на VI Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство» (Воронеж, 2019 г.), на Международной научно-практической конференции «Пищевые технологии будущего: инновации в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции» (Саратов, 2020 г.), на Международной научно-практической конференции «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 научно-практической конференции с международным участием «Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК» (Пенза, 2023г.), на Всероссийской научно-практической конференции «Разумовские чтения 2024» (Москва, 2024г).

Публикации. 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, 6 патентах на изобретения и полезные модели. Общий объем публикаций составляет 15,8 печ. л., из которых 10,2 печ. л. принадлежат лично соискателю.

Личный вклад автора состоит в обосновании и решении проблемы совершенствования обработки ультразвуком продукции растениеводства на примерах инактивации зерна сои, подготовки зерна к помолу и очистки нерафинированных растительных масел от первичных и вторичных продуктов окисления, в получении результатов экспериментальных данных и участии во всероссийских и международных конференциях, в разработке способов (патенты № 2707130 и 2677031) и конструкций установок (патенты № 130519, 208531, 218182, 223297), а также в публикации всех результатов исследований.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Материал изложен на 396 страницах компьютерного текста, включает в себя 33 таблицы, 105 рисунков, 20 приложений. Список литературы содержит 312 наименований, в том числе 29 на иностранном языке.

1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗЕРНОВЫЕ, ЗЕРНОБОБОВЫЕ КУЛЬТУРЫ И НЕРАФИНИРОВАННЫЕ РАСТИТЕЛЬНЫЕ МАСЛА И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ

1.1 Значение зерновых, зернобобовых и масличных культур для России

Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2025 гг. направлена на сохранение природного потенциала и повышение безопасности пищевых продуктов за счет применения новых экологичных технологий в растениеводстве, кормовой и пищевой промышленности [52].

По данным Федеральной службы государственной статистики, на территории России в 2024 г. было выращено 125 млн. тонн зерна, из которых 82,6 млн. тонн пшеницы, 5,4 млн.тонн зернобобовых культур от общего валового сбора (рисунок 1.1) [53].

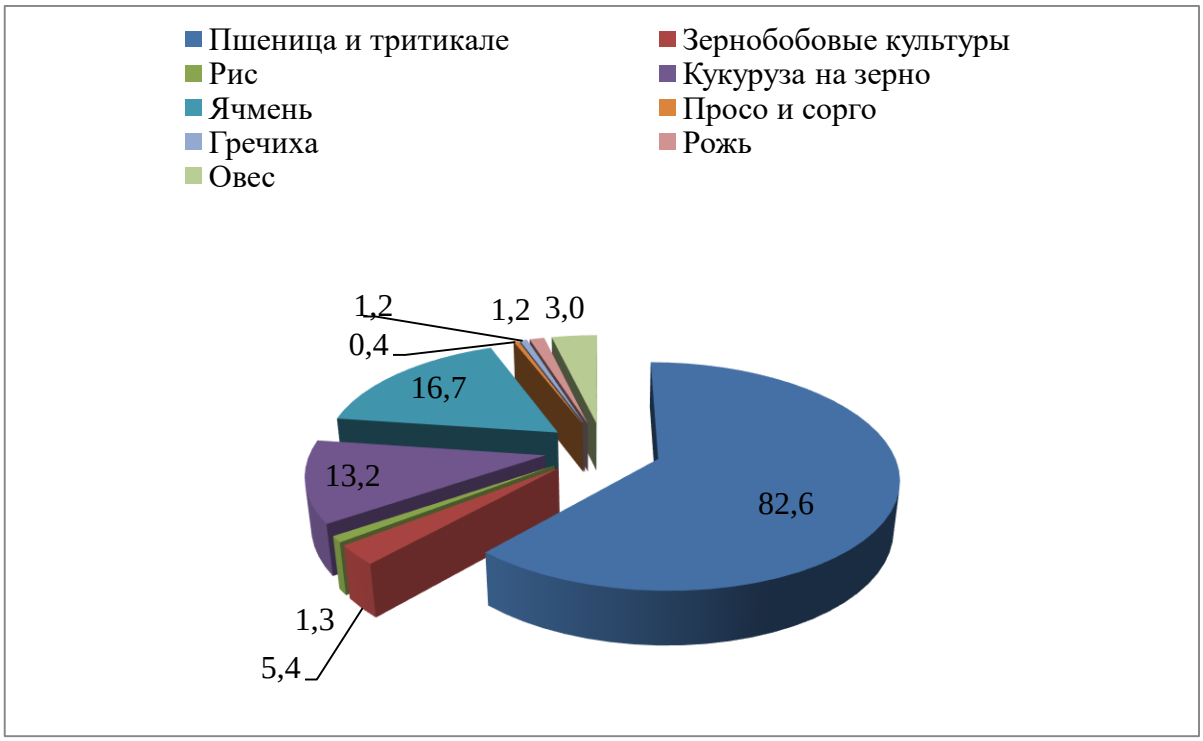


Рисунок 1.1 – Структура производства зерна по видам культур, млн.тонн

На долю фермерских (крестьянских) хозяйств (включая индивидуальных предпринимателей) приходится 29,1 % всего зернового запаса и 31,5 % подсолнечника.

По показателям сельского хозяйства в России наблюдается стабильный рост валового сбора пшеницы, зерна сои и подсолнечника (рисунок 1.2).

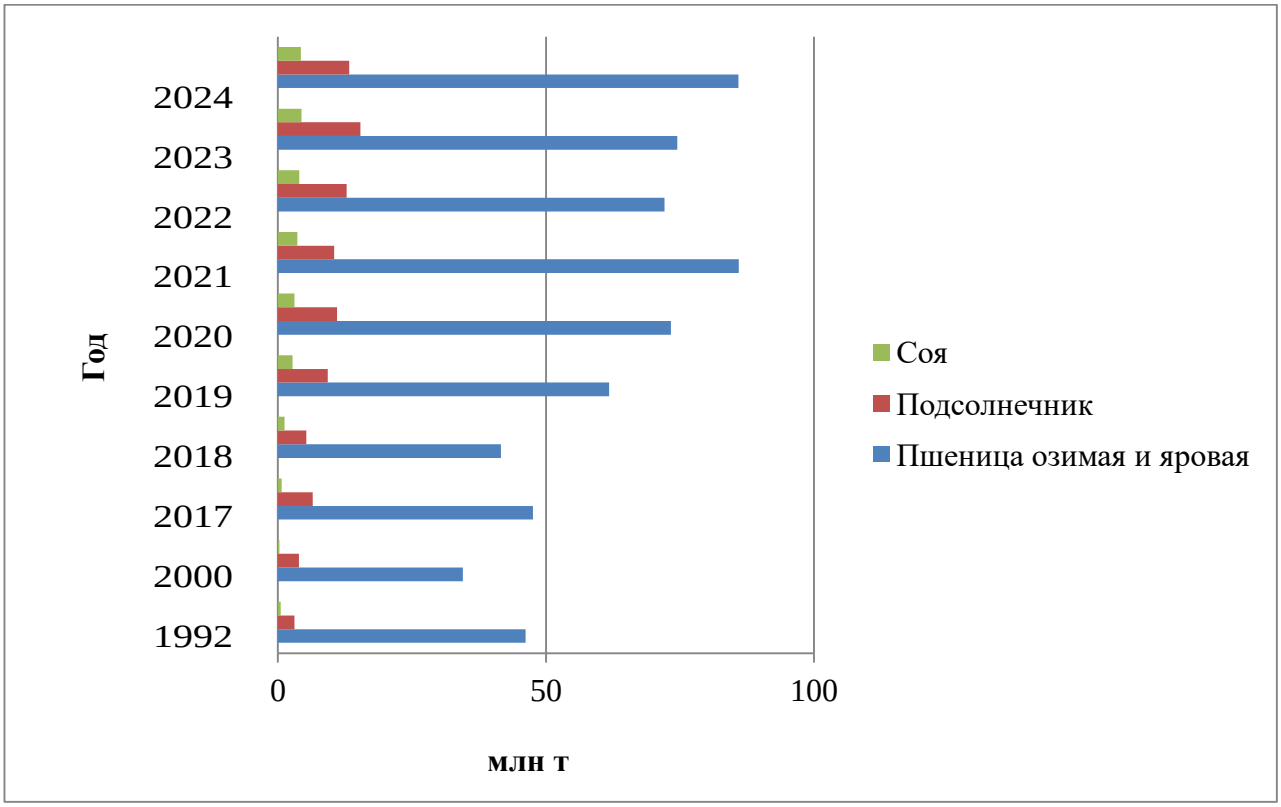


Рисунок 1.2 – Валовой сбор основных сельскохозяйственных культур в России, млн т

Под выращивание зерновых, зернобобовых и масличных культур в России задействовано 46660 тыс. га, из которых на первом месте посевные площади пшеницы (28091 тыс. га), 14615 тыс. га отведено под масличные культуры. При этом лидирующее место по масличным культурам занимает подсолнечник (8584 тыс. га), сою выращивают на 3079 тыс. га, что численно превосходит все посевные площади, занятые под остальными зернобобовыми культурами [53, 54].

Пшеница, подсолнечник и соя являются самыми востребованными, социально значимыми культурами как по производству, так и по запросам потребительского рынка. Потребности сферы животноводства и человека в энергии, белке, биологи-

чески активных соединениях и минеральных веществах в большей степени обеспечиваются за счет продуктов на основе их переработки. Продовольственная безопасность страны основана на обеспечении животноводства кормами высокой протеиновой ценности, а населения – высококачественными продуктами, имеющими высокую пищевую ценность, обеспечиваемыми совершенными технологиями на всех стадиях производства и переработки сырья.

При таких объемах производства и возделывания сельскохозяйственных культур перед фермерскими крестьянскими хозяйствами возникают проблемы их обработки и хранения. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (Food and Agriculture Organization – ФАО), потери только при хранении могут достигать 10–15 %. Из-за развития плесневых грибов и зараженности насекомыми-вредителями снижаются качество и сроки хранения сырья. Операции технологического процесса подготовки и переработки зерна на малых предприятиях сокращены до минимума, а качество муки, особенно обойного помола, оказывается низким по причине плохой очистки от минеральных отложений и следов зараженности, что не отвечает установленным требованиям. Выход готовой продукции составляет 60–65 %, вследствие чего ежегодно теряется около 1,5 млн т зерна [3]. Техническое оснащение действующих мельзаводов и крупозаводов находится на низком уровне. Срок службы около 50 % предприятий составляет 30–40 лет, по своей технической оснащенности они устарели, используют несовершенные технику и технологии, энергоемки, не автоматизированы, что не позволяет вырабатывать продукцию с высокими показателями качества [3].

Не решена проблема полноценного кормления сельскохозяйственных животных. Использование в корм необработанного фуражного зерна, сои и отходов подсолнечника приводит к низкому усвоению питательных веществ и проблемам с желудочно-кишечным трактом. Усвоение крахмала зерновых культур в сыром виде не превышает 20–25 % [57], сырой белок зерна сои не усваивается животными и вызывает гипертрофию поджелудочной железы. Нерасщепленный белок ускоряет перистальтику кишечника и приводит к диарее [58].

1.2 Особенности способов подготовки зерновых культур к помолу

Зерновые культуры составляют неотъемлемую часть ежедневного рациона жителей России. Объем производства муки из зерновых культур за 2019 г. в России составил 9,5 млн т. На долю пшеничной и пшенично-ржаной муки приходится 93 %, в том числе муки пшеничной хлебопекарной высшего сорта – 67 %, муки пшеничной хлебопекарной первого сорта – 22 %, прочей пшеничной муки – 3,4 % [59].

Технология изготовления муки достаточно сложна и требует больших капиталовложений. Технологические процессы подготовки зерна к помолу имеют решающее значение для выпуска качественной муки. Наряду с крупными производителями в России переработкой зерна занимаются малые предприятия и фермерские хозяйства. Мукомольная промышленность России обеспечивает потребности населения в необходимом объеме, но её эффективному развитию препятствуют низкое техническое оснащение и технологическая отсталость многих мельниц [3].

Для существенного развития кормовой и пищевой индустрии необходимы инновационные подходы и решения для модернизации технологического оборудования и совершенствования производства как системы [60].

1.2.1 Особенности строения и технологические свойства зерновых культур

Технологические свойства зерна определяют три основных показателя: удельный выход готовой продукции, качество готовой продукции и удельный расход энергии на единицу массы готовой продукции [61].

Широко распространённой зерновой культурой в России является зерно пшеницы. В зависимости от технологических, пищевых и товарных свойств, пшеницу подразделяют на типы: I – мягкая яровая, II – твердая яровая, III – мягкая яровая белозерная, IV – мягкая озимая краснозерная, V – мягкая озимая белозерная, VI – твердая озимая.

Пшеница V и VI типов промышленного значения не имеет, для производства хлебопекарной муки обычно используют мягкую пшеницу I, III, IV типов, а пшеницу II типа – для макаронных изделий [62].

Строение зерна пшеницы типично для всех типов злаковых растений (рисунок 1.1) [63]. Эта культура отличатся высокими биологическими особенностями и содержит элементы, необходимые для физиологического развития человека (таблица 1.1).

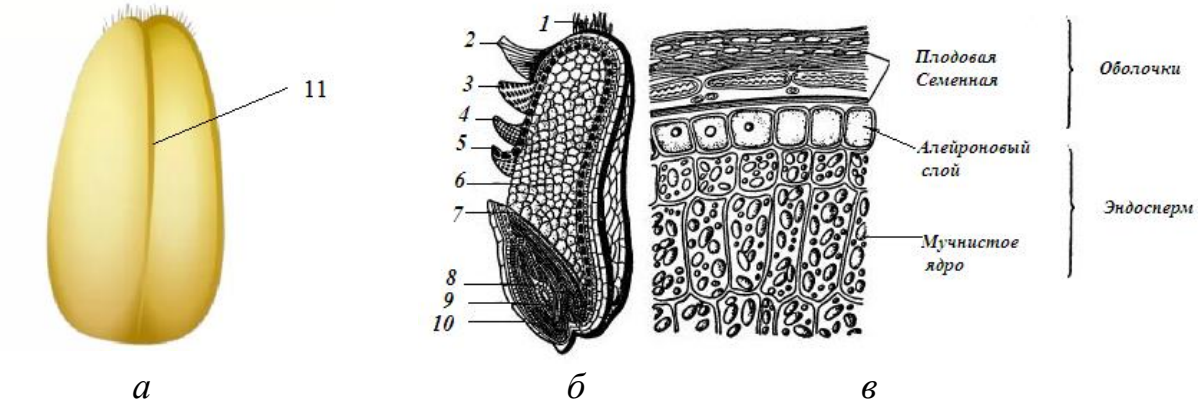


Рисунок 1.3 – Строение зерна пшеницы: *а* – обший вид; *б* – продольный разрез; *в* – поперечный разрез; 1 – бородка, 2, 3, 4 – оболочки; 5 – алейроновый слой; 6 – эндосперм; 7 – щиток; 8 – зачаточные листы; 9 – зародыш; 10 – зачаточный корешок; 11 – бороздка

Таблица 1.1 – **Химический состав анатомических частей зерна пшеницы, %**

Часть	Белок	Углеводы				Липиды	Зола
		клетчатка	пентозаны	крахмал	сахар		
Наружные плодовые оболочки	1,7–4,5	24,0–27,0	29,2–48,4	–	–	0,7–1,0	0,9–1,5
Внутренние плодовые оболочки	6,3–9,6	17,0–19,6	27,2–41,5	–	–	0,3–0,5	6,3–9,6
Семенная оболочка	12,0–19,5	1,0–1,2	13,8–36,0	–	–	0,2–0,3	7,0–20,2
Зародыш	24,3–34,0	–	3,5	–	25,0	16,3–27,6	3,6–9,5
Эндосперм	12,6–15,0	0,3–0,5	3,3–4,0	72,0–80,0	0,2	0,8–1,6	0,4–0,6

Химический состав анатомических частей зерновки пшеницы наглядно показывает, что наибольшее содержание белка находится в зародыше и эндосперме, клетчатки и пентозанов – в плодовых оболочках, крахмалов – в эндосперме, сахара и липидов – в зародыше, золы – в семенной и внутренней плодовой оболочке [64].

Самой ценной частью зерна, обеспечивающей получение высших сортов муки, является эндосперм. В нём белки распределены неравномерно, их концентрация возрастает к периферийным слоям. К белкам зародыша и алейронового слоя

относятся альбумины и глобулины, выполняющие каталитическую функцию при прорастании зерна, а к белкам эндосперма – альбумины, глобулины, проламины и глютелины. Белки состоят из аминокислот, соединенных между собой ковалентными пептидными связями [65].

Основными белками эндосперма являются глиадин и глютенин, которые составляют две трети всех белков зерна [66]. Глиадин относят к группе проламинов, при его гидролизе образуются пролин и глутаминовая кислота. Он незначительно растворяется в воде, но его соли в растворе с щелочами и кислотами хорошо растворимы в водных растворах спиртов (метанола, этанола и др.) при концентрации спирта 60–70 %. Глютенин относят к группе глютелинов, он не растворим ни в солевых растворах, ни в спирте, но может быть экстрагирован из молотого зерна разбавленными кислотами [67]. Глютенин обеспечивает клейковину упругими свойствами, а глиадин придает растяжимость тесту.

При сортовом помоле все оболочки, зародыш и алейроновый слой удаляют. Количественное содержание этих частей зерна определяет выход готовой муки. Известно, что алейроновый слой богат жиром и состоит из белковых веществ. На его долю приходится 5,2–8,0 %. Зародыш составляет 1,4–3,1 % и содержит белки, жиры, витамины и минеральные вещества [62, 68, 69].

В последние годы особое внимание уделяют производству хлебобулочных изделий здорового питания из муки простого помола, когда измельчают в муку цельное зерно. При таком помоле отбор оболочек не превышает 2 % [68].

Основными характеристиками зерна пшеницы, определяющими тип и подтип, являются: цвет, запах, массовая доля белка, количество и качество клейковины, число падения, стекловидность, натура, влажность, содержание сорной и зерновой примесей [69]. Все эти биологические показатели составляют основу качественных признаков переработанной продукции. Расчет отношения выхода муки к зольности оценивает технологические свойства зерна [69].

Величина зольности и качественный состав золы зависят от вида, сорта и почвенно-климатических условий выращивания. В золе пшеницы преобладают фосфор,

калий и магний, а также содержится большое число микроэлементов: 3,0–6,9 % марганца, 0,3–0,6 % никеля, 3,7–7,9 % цинка, 0,72–0,75 % меди, 0,035 % молибдена, 7,9–8,1 % кобальта [63]. Биологически на показатель зольности в зерне они оказывают постоянное воздействие, но практически всегда неучтенной является дополнительная зольность, зависящая от чистоты оболочки зерна. Она состоит из остатков минеральных (пылевых) отложений и следов зараженности, прочно объединенных с оболочкой. И если минеральные составляющие в зерне полезны, то на оболочке они являются загрязнениями, влияющими на качество обойной муки, а наличие следовых количеств зараженности ведет к порче продукта.

Стекловидность влияет на режимы подготовки зерна к помолу [71]. Она зависит от преломления света. При этом стекловидными называют такие зерна, которые слабо преломляют луч света и при просвечивании кажутся прозрачными. Мучнистые зерна при рассмотрении на свету непрозрачны, а при просвечивании кажутся темными. Распределение извлекаемых участков эндосперма по потокам сортовой муки зависит от стекловидности: чем она выше, тем больше крахмалистого ядра переходит из центральной части зерна [64]. Влажность зерна напрямую зависит от его стекловидности (таблица 1.2) [62].

Таблица 1.2 – **Нормативная влажность зерна пшеницы при хлебопекарных помолах**

Тип пшеницы	Общая стекловидность, %	Влажность зерна на I драной системе, %
I и III	менее 40	14,5–15,0
	от 40 до 60	15,5–16,0
	более 60	16,0–16,5
IV	менее 40	15,5–16,0
	от 40 до 60	16,0–16,5
	более 60	16,5–17,0

При хранении влажность 14,0–15,5 % считается критической, при таких показателях зерно переходит из состояния покоя к активной жизнедеятельности, что недопустимо [68]. Влага в зерне находится в связанном состоянии, но при изменении технологических параметров связь нарушается и изменяются свойства зерна. Энергия связи воды зависит от паров, показывающих влажность зерна в гигроскопической области [61]. Твердые сорта пшеницы имеют толстые стенки клеток и

впитывают большое количество воды из-за наличия гемицеллюлозы. У мягких сортов пшеницы стенки тонкие, практически отсутствует гемицеллюлоза, что является следствием низкой поглотительной способности. Эти свойства фотопоглощения передаются и муке [73].

Разные анатомические части зерновки поглощают разное количество воды с неодинаковой интенсивностью. Так, наиболее быстро поглощает воду зародыш. При этом чем больше белка в зерне, тем больше поглощается воды, однако скорость поглощения больше у крахмалистого зерна. При подготовке зерна к помолу особое внимание уделяют влажности зерна. Исходя из этого технология увлажнения имеет большое значение.

1.2.2 Требования, предъявляемые к зерновым культурам

Основными правовыми документами, которые действуют на территории России в отношении пшеницы, являются:

- ГОСТ 9353-2016. Пшеница. Технические условия [69];
- технический регламент ТР ТС 015/2011 Таможенного союза «О безопасности зерна» [74].

Состояние зерна, запах, цвет, влажность, содержание сорной и зерновой примесей, зараженность вредителями регламентируются для каждого типа пшеницы. В зависимости от класса твердой пшеницы варьируются показатели по массовой доле белка (от 10,0 до 13,5 %), количеству клейковины (от 18 до 28 %), числу падения (от 80 до 200), стекловидности (от 70 до 85 %), натуре (710–770), содержанию сорной примеси (0,3 % для минеральной, 5,0 % для зерновой). При этом для 5 класса пшеницы многие показатели не ограничиваются, и содержание сорной примеси может достигать 5 %, а зерновой – 15 %.

Для мягкой пшеницы показатели массовой доли белка варьируются от 10 до 14,5 %, количества клейковины – от 18 до 32 %, числа падения – от 80 до 200, стекловидности – от 40 до 60 %, натуры – от 710 до 750, содержания сорной примеси 0,3 % для минеральной и 5,0 % для зерновой.

Также регламентированы содержание токсичных элементов, микотоксинов, бензапирена, пестицидов, радионуклидов, вредных примесей, генно-модифицированных организмов, зараженность вредителями и загрязненность мертвыми насекомыми-вредителями в зерне пшеницы [74].

С 1 июля 2018 г. внесены изменения в ТР ТС 015/2011 [74] в части установления нулевого порога по показателям зараженности вредителями хлебных запасов, а также содержания горчака ползучего в зерне, поставляемом на пищевые и кормовые цели.

Необходимо использовать на пищевые и кормовые цели зерно с показателями, не превышающими требования нормативных документов. Зараженность зерна вредителями и плесневыми грибами происходит на стадии его транспортирования с полей, а также при нарушении условий хранения и обработки.

Главными задачами при переработке зерна в муку являются сохранение зерна с нормируемыми показателями, не превышающими требования ГОСТ и ТР, а также высокоэффективная подготовка зерна к помолу, позволяющая достичь требуемых технологических параметров.

1.2.3 Способы и средства механизации обеззараживания зерна

Зерно подвержено заражению плесневыми грибами и вредителями хлебных запасов, что является серьезной проблемой в кормопроизводстве и пищевой промышленности. Поражение зерна микотоксинами плесневых грибов может привести к отравлениям и даже смертельному исходу при значительной концентрации [75]. Насекомые-вредители зерна ухудшают его хлебопекарные свойства, снижают массу, способствуют развитию патогенной микрофлоры и приводят к самосогреванию зерна, вызывая его порчу и необходимость утилизации [76].

Всем известна картофельная болезнь хлеба, которая возникает из-за спорообразующих термофильных бактерий Bacillus subtilis. Они присутствуют в больших количествах на растениях и в почве, поэтому споры попадают в муку [77]. Это продвижение необходимо устранить на ранней стадии, до момента размола зерна.

Причиной глобального распространения вредителей, по мнению А. А. Жученко [78], является широкое распространение неустойчивых сортов пшеницы. Особенно за последние 50 лет заметно увеличение численности вредной черепашки в Поволжье. Также отмечается рост болезней растений при поражении плесневыми грибами, которые являются продуцентами микотоксинов: дезоксиниваленола, ниваленола, зеараленона, афлатоксинов, охратоксинов и других.

Главными источниками заражения зерна и зернопродуктов служат необеззараженные хранилища, приемные площадки, прискладская территория, зерноочистительные машины и механизмы, тара, инвентарь и транспортные средства, а также зараженное зерно, поступающее от зернопроизводителей [79].

Зерно поступает на помол с высокой степенью зараженности ($5 \cdot 10^6 \ldots 8 \cdot 10^8$ КОЕ/г). Сухая очистка зерна при хранении и подготовке к помолу незначительно снижает зараженность путем удаления оболочки, однако при последующем увлажнении и взаимодействии с водой происходит вторичное заражение здоровых зерен, поэтому снижения обсемененности микроорганизмами не наблюдается [80].

Среди способов биологического обезвреживания микотоксинов известны ферментативные способы, где ферменты катализируют природные процессы деструкции микотоксинов, которые протекают в условиях, благоприятных для окружающей среды, не требующих повышенных температур, атмосферного давления, присутствия агрессивных щелочных или кислотных реагентов и растворителей [83].

Эффективность способов биологического обезвреживания микотоксинов, основанных на ферментативных окислительных процессах, относительно высока. Скорость разложения микотоксинов составляет 5,85 мг/л/ч. Однако применяемые способы обладают рядом существенных недостатков: нестабильность используемых ферментов; требования к особым условиям их хранения; необходимость применения дополнительных дорогостоящих редокс-медиаторов; обеспечение повышенных концентраций кислорода в средах, содержащих микотоксины, и др. [84]. Однако главный недостаток заключается в том, что в результате применения этих окислительных способов ферментативной обработки микотоксинов образуются новые продукты, не менее, а иногда и более токсичные, чем исходные токсины [84].

Также существуют способы обработки зерна перед закладкой на хранение с использованием органических консервантов – пропионовой кислоты, содержащей добавку хитозана [85], и смесь пропионовой кислоты с калием сорбата [86]. Химия в продуктах питания неприемлема, поскольку все применяемые вещества переходят в продукт.

Недостатком данных способов является ещё и то, что при продолжительном употреблении животными таких кормов велика вероятность получения ими химического ожога пищевода и желудка. За счет повышенного содержания пропионовой кислоты зерно теряет всхожесть и приобретает кислый привкус [87].

В настоящее время известны разнообразные способы обезвреживания микотоксинов, но они не обладают оптимальным эффектом и имеют достаточно большое количество недостатков. Поэтому более целесообразно предотвращать развитие плесневых грибов, а не бороться с результатами их жизнедеятельности.

Существует способ обеззараживания зернового сырья, предусматривающий увлажнение зерна, его обработку в водной среде в акустическом поле с широким спектром частот при кавитационно-пороговом значении звукового давления, создаваемого гидроакустическим излучателем, с одновременным диспергированием в среде воздуха, поступающего в импульсном режиме в резонаторные камеры излучателя [88]. Недостатком данного способа является снижение содержания плесневых грибов только на 80 %, а это не решает проблему устранения токсичности. Высокая интенсивность ультразвуковых волн (4 Вт/см^2) нарушает структуру зерна и его оболочку, что является препятствием к сохранению свойств при хранении.

Существует способ деконтаминации сельскохозяйственных кормов, загрязненных микотоксинами, путем их предварительной обработки активированным средством перед процессом экструдирования корма. В качестве активированного раствора используют раствор, полученный на установке типа СТЭЛ при плотности тока 0,06–0,15 А/см^2, напряжении 40–50 В, скорости протока католита и анолита 2,8–4,5 л/ч, содержащего 4,0–5,0 г/л NaCl и 0,3–0,7 г/л глицина, с показателями кислотности 2,0–3,0 pH [89]. Недостатком данного способа является то, что строение зерновки (а именно наличие в

ней бородки и бороздки) затрудняет очистку зерна от плесневых грибов, и в этой связи статичная обработка только анолитом не эффективна.

Существует устройство обеззараживания зерна для зерно- и семяочистительного агрегата [90], которое содержит модуль СВЧ-обработки, установленный на выходе зернового потока из зерноочистительной машины.

Недостатком СВЧ-обработки является использование повышенной температуры, что ведет к денатурации белка и отражается на качественных характеристиках зерна и его протеиновой ценности.

Известны технологии и технические средства обеззараживания зерна в электростатическом поле [91].

Устройство для обеззараживания зерна в электростатическом поле (рисунок 1.4) содержит корпус с генератором высокого напряжения 5. Обрабатываемый продукт подается шнеками, выполненными в виде электропроводящего стрежня 1 с диэлектрическими лопатками 2, расположенными по винтовой линии, которые вместе с металлическим корпусом, являющимся экраном, представляют собой высоковольтную пару электродов, образующих в объеме корпуса электростатическое поле. Устройство включает в себя также вибратор 6, обеспечивающий возможность обработки зерна различной степени влажности.

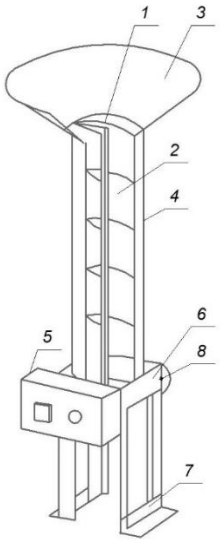


Рисунок 1.4 – Устройство для обеззараживания зерна:
1 – электропроводящий стрежень; 2 – диэлектрические лопатки;
3 – загрузочный бункер; 4 – цилиндрическая труба; 5 – генератор высокого напряжения; 6 – корпус; 7 – крепеж; 8 – вибратор

Недостатком данной технологии является то, что при обработке в электростатическом поле происходит стимуляция зёрен к прорастанию, поэтому такой способ следует применять только при предпосевной обработке зерна.

Известны способы ультрафиолетового обеззараживания зерна [92, 93, 94]. Однако для успешной реализации процесса необходимо подавать зерно тонким, проницаемым для УФ-излучения слоем, что требует больших временных затрат.

Известно устройство для охлаждения зерна [95], которое обеспечивает вакуумное холодильное хранение. Однако это устройство не обеззараживает зерно, а только приостанавливает на короткое время развитие микроорганизмов.

В некоторых странах для обеззараживания обрабатывают зерно небольшими дозами радиоактивного ионизирующего гамма-излучения [96, 97]. Применение этой технологии предполагает высокотехнологичное производство и дорогостоящие вложения. Производство и сырье являются радиоактивными, поэтому необходимо получать на такую технологию разрешение.

Известно устройство для гидратации биополимеров [98]. Оно предназначено для обработки зерна, семян, плодов и иной биомассы перед закладкой на хранение (рисунок 1.5).

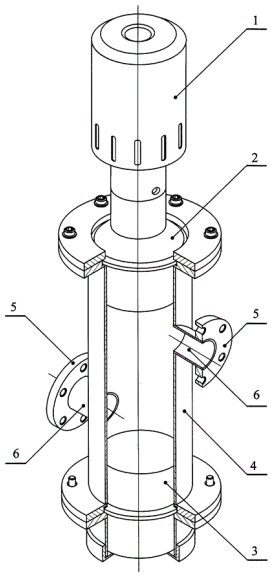


Рисунок 1.5 – Устройство для гидратации биополимеров:
1 – электроакустический преобразователь; 2 – акустический волноводный трансформатор; 3 – отражатель-резонатор; 4 – реактор; 5 – фланцы; 6 – патрубки

Способ позволяет снизить микробиологическое загрязнение зерна за счет интенсификации обеззараживания гидратирующей их воды и увеличения содержания синтезируемого в результате кавитационного воздействия бактерицидного средства – пероксида водорода. Недостатком данного устройства является ограниченный объём камеры и невозможность технически обрабатывать в устройстве само зерно, так как активируется только вода.

Известно устройство – барабанный стерилизатор для обеззараживания сыпучих продуктов при совмещенном воздействии озона и ультрафиолетового излучения (рисунок 1.6) [99].

Рисунок 1.6 – Барабанный стерилизатор

Стерилизатор барабанного типа содержит цилиндрическую камеру дезинфекции, раму, пульт управления, электропривод и лоток для выгрузки обеззараженной продукции. С его помощью осуществляют дезинфицирование продукции обработкой озоном с коротковолновым УФ-излучением. Недостатком озонирования явля-

ется то, что вырабатывается предельная доза концентрации озона, которая губительна для зерна. Наряду с этим озон провоцирует всхожесть и прорастание зерна, что неприемлемо при его хранении [100].

На практике применяют также устройство для комбинированного обеззараживания зерна с использованием электромагнитного поля сверхвысокой частоты (рисунок 1.7). Сухое зерно, очищенное от примесей, увлажняют обеззараживающим водным раствором и обрабатывают в электромагнитном поле сверхвысокой частоты с высокой плотностью потока энергии [101].

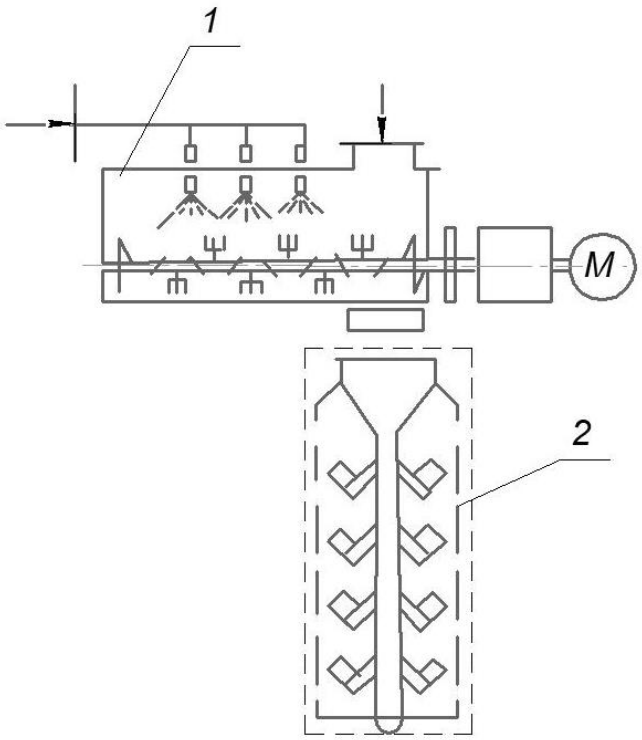


Рисунок 1.7 – Комбинированное обеззараживающее устройство:
1 – увлажнительная машина; 2 – вертикальная проточная рабочая камера волноводного типа для СВЧ-обработки зерна

Недостатком данного способа является отрицательное воздействие СВЧ, основанное на высокотемпературной обработке зерна, ведущее к денатурации и ухудшению его качественных характеристик.

Все существующие способы обеззараживания зерна можно представить следующим образом (рисунок 1.8).

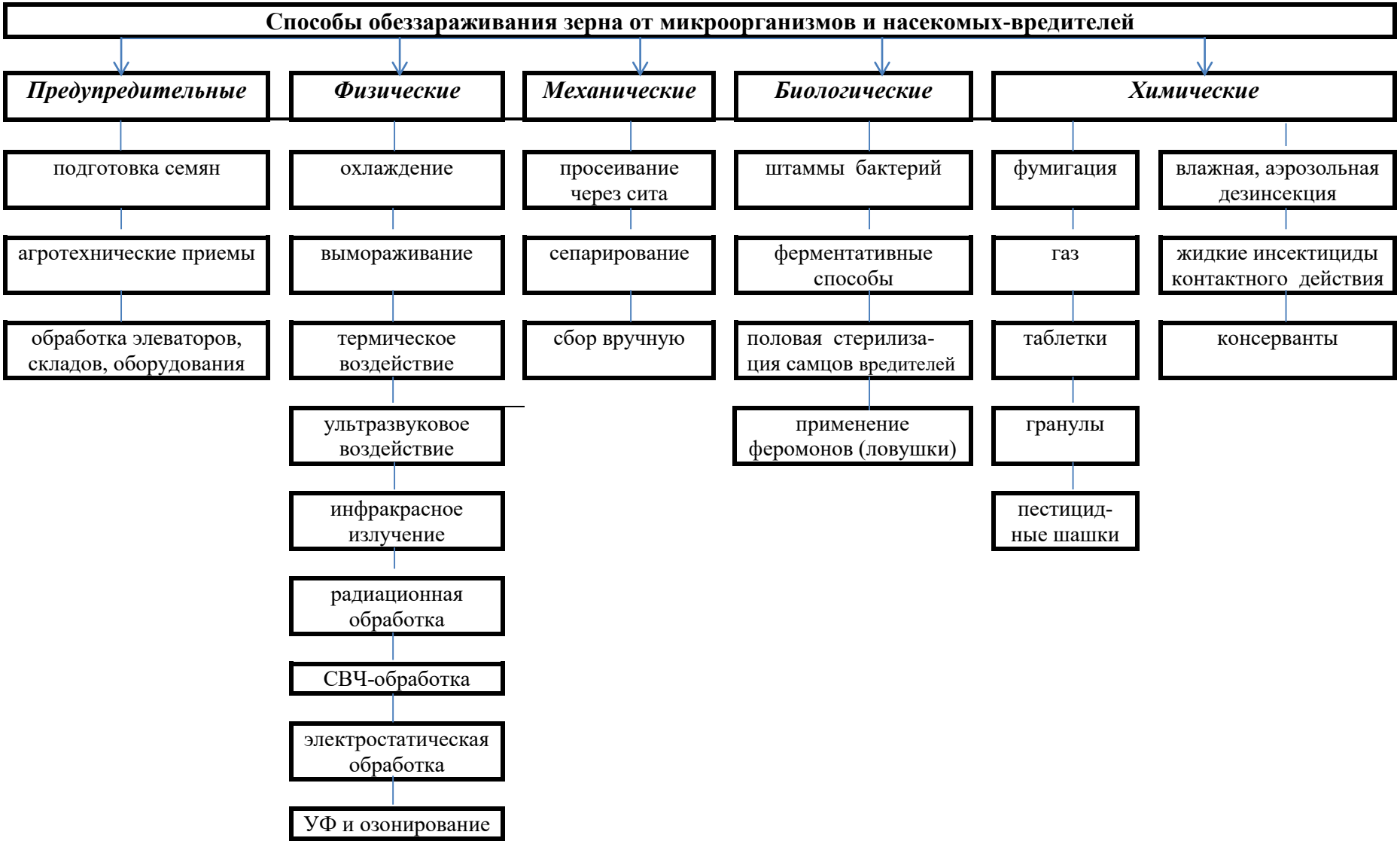


Рисунок 1.8 – Классификация способов обеззараживания зерна от микроорганизмов и насекомых-вредителей

Исходя из данных приведенного анализа и классификации очевидно, что необходимы новые, более прогрессивные способы повышения эффективности обеззараживания зерна от следовых количеств насекомых-вредителей и микроорганизмов.

1.2.4 Способы и средства механизации технологического процесса подготовки зерна к помолу

Одной из основополагающих технологических операций при производстве муки, обеспечивающих ее последующие качественные показатели, является подготовка зерна к помолу. В современных условиях обработкой в зерноочистительном отделении добиваются снижения зольности удалением пыли и следов зараженности. Общее снижение зольности в зерноочистительном отделении составляет 0,1–0,15 %.

Современные крупные зерноперерабатывающие предприятия оснащены значительным парком различных технологических машин, осуществляющих очистку зерна от примесей, а также выполняющих другие операции, необходимые для придания зерну заданных свойств, обеспечивающих оптимальные мукомольные показатели [102].

В зависимости от сорта получаемой муки используют технологии подготовки зерна к помолу, различающиеся интенсивностью технологических операций и набором оборудования [103] (рисунки 1.9 и 1.10).

При сортовом помоле пшеницы на мельзаводах к процессу подготовки зерна предъявляют очень высокие требования. Кроме очистки от минеральных примесей, осуществляют гидротермическую обработку зерна для придания ему оптимальных технологических свойств. Зерно проходит очистку на поточно-технологической линии с использованием 15–20 машин (см. рисунок 1.9). Режимы увлажнения и длительность отволаживания зерна устанавливают в зависимости от его физико-механических свойств [62, 102].

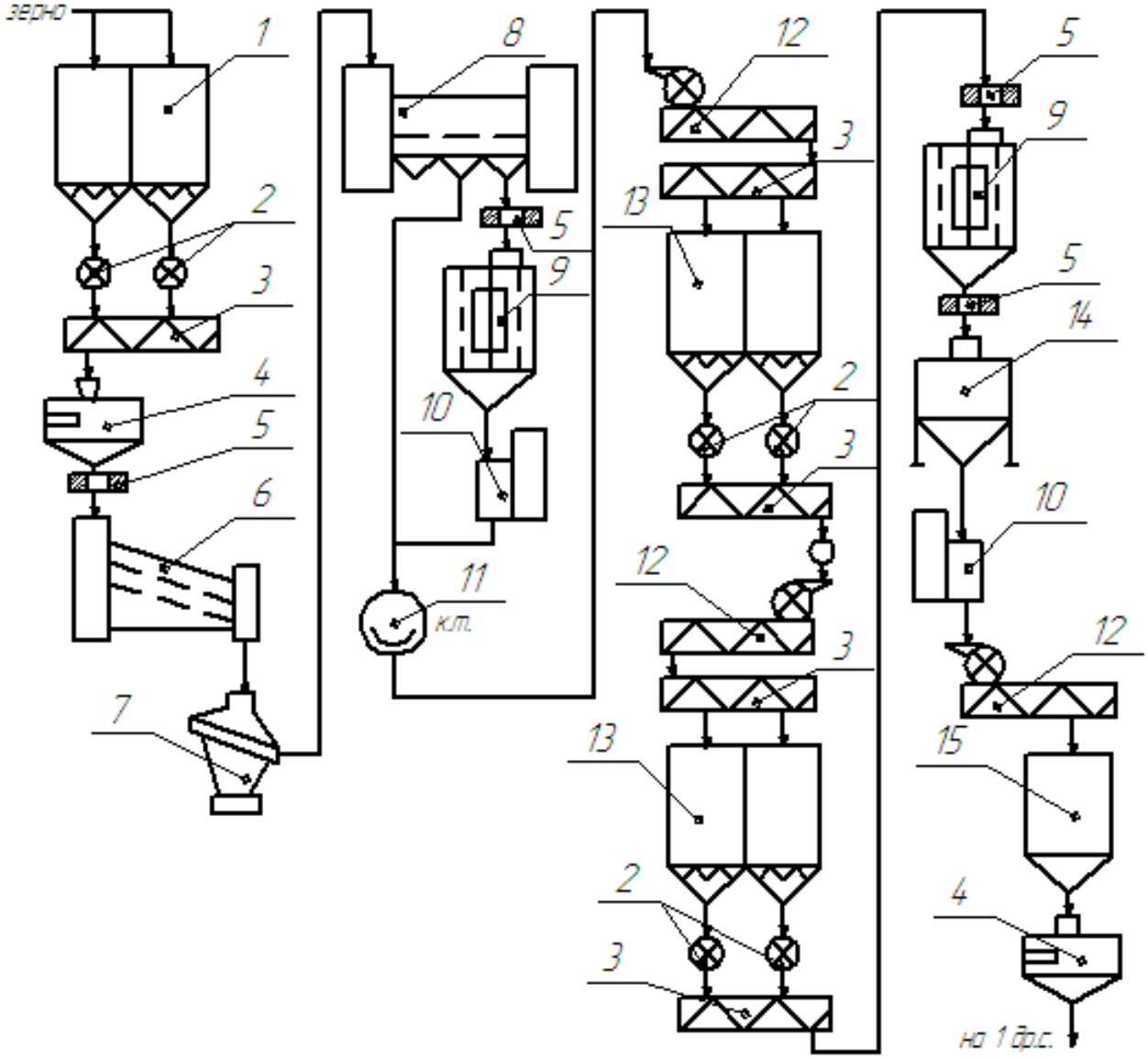


Рисунок 1.9 – Технологическая схема подготовки зерна к сортовому помолу пшеницы:
1 – бункеры для неочищенного зерна; 2 – дозатор; 3 – шнек-смеситель;
4 – автоматические весы; 5 – магнитный сепаратор; 6 – воздушно-ситовой сепаратор; 7 – камнеотборник; 8 – концентратор; 9 – обоечная машина;
10 – аспиратор; 11 – триер-овсюгоотборник, куколеотборник;
12 – увлажнительная машина; 13 – бункеры для отволаживания;
14 – энтолейтор; 15 – бункер для доувлажнения

При простом помоле пшеницы получают обойную муку, показатели качества которой практически соответствуют показателям качества зерна. Часто такую муку называют цельнозерновой. Выход муки – 96 %, отрубей – 1 %, зольность – не менее чем на 0,07 % ниже зольности зерна до очистки. Массовая доля сырой клейковины – не менее 20 %. Мука получается сероватого оттенка с заметными частицами оболочек зерна [102].

При обойном помоле особое внимание уделяют удалению примесей из зерна с помощью воздушно-ситовых сепараторов 3 (см. рисунок 1.10), камнеотборников 4 и триеров 5, 6. Шелушение поверхности зерна осуществляют методом сухого шелушения на обоечных машинах 8 в один или два прохода. Гидротермическую обработку проводят, если влажность зерна ниже 14 %.

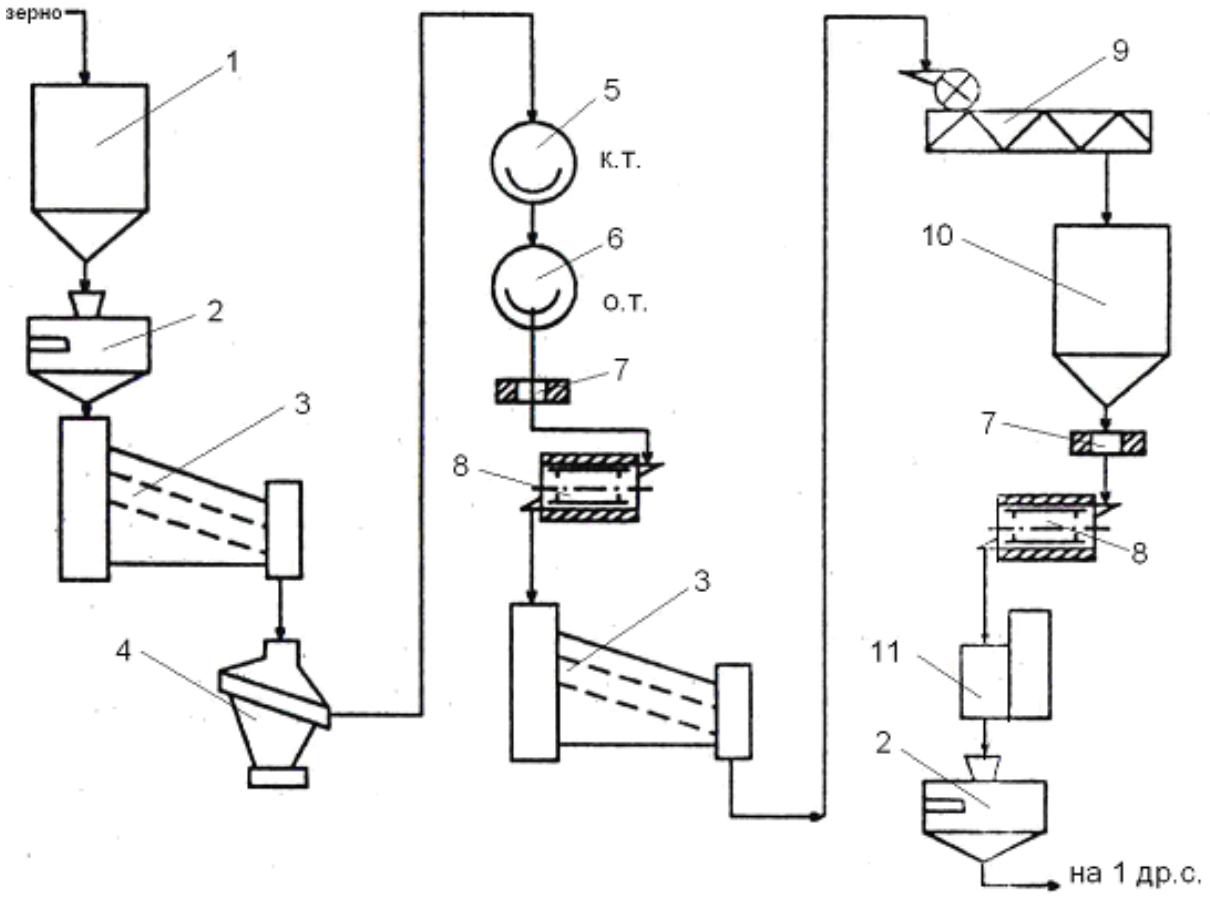


Рисунок 1.10 – Технологическая схема подготовки зерна к простому помолу для производства обойной муки: 1 – бункер для неочищенного зерна; 2 – автоматические весы; 3 – воздушно-ситовой сепаратор; 4 – камнеотборник; 5 – кукольный триер; 6 – овсюжный триер; 7 – магнитный сепаратор; 8 – обоечная машина; 9 – увлажнительная машина; 10 – бункер для отволаживания; 11 – аспиратор

Однако при простом помоле используемые операции подготовки зерна к помолу не эффективны, уменьшение зольности при использовании обоечных машин снижается только на 0,07 %, шелушильных ЗШН – до 0,15 %, что негативно сказывается на качестве обойной муки.

В связи с низкой эффективностью подготовительных операций при простом помоле возникает необходимость научного обоснования новых технологий путем интенсификации процесса подготовки зерна к помолу, повышающих качество обработки.

Подготовительные операции нацелены на доведение зерна до кондиционного состояния, когда оно подается далее на размол. Операции подготовки зерна к помолу представлены на рисунке 1.11.

Рисунок 1.11 – Принятая система подготовки зерна к простому помолу

Для подготовки зерна к простому помолу используют различное оборудование, классификация которого представлена на рисунке 1.12.

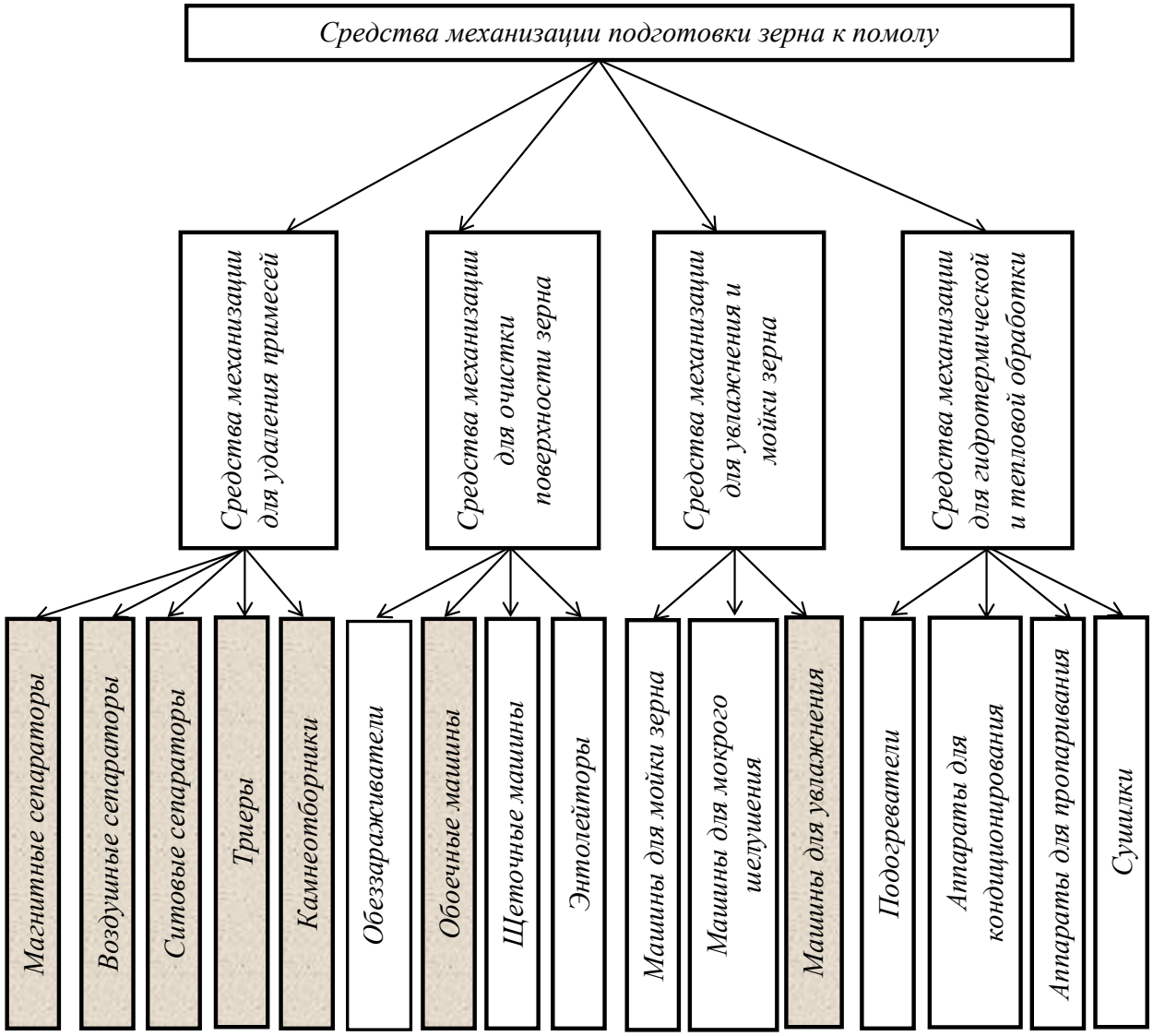


Рисунок 1.12 – Классификация средств механизации подготовки зерна к помолу:
▭ – простой помол; ▭ – сортовой помол

Первой технологической операцией подготовки зерна к помолу является сепарирование, позволяющее отделить от зерна различные примеси (сорные культуры, минеральные и металломагнитные примеси, легкие относы). Его осуществляют специальные сепараторы. На следующей ступени производят очистку поверхности зерна, степень очистки различна. Из-за особенностей анатомического строения зерна очистка его поверхности при сухом шелушении затруднена. Бороздка и бородка являются препятствием для достижения высокой степени очистки и полного отшелушивания оболочки.

Одним из основных критериев готовности зерна является его влажность, обеспечивающая оптимальные размольные параметры прочности и пластичности, влияющие на качество помола. Поэтому зерно проходит несколько стадий обработки: мойку или мокрое шелушение, увлажнение и гидротермическую обработку. Зерно пшеницы подвергают гидротермической обработке, при этом ее режимы зависят от реологических свойств клейковины, стекловидности и других показателей [63].

Существует четыре основных типа гидротермической обработки, обеспечивающих нормативное увлажнение зерна:

- холодное кондиционирование (используют при простом помоле);
- горячее кондиционирование (может быть использовано как при простом, так и при сортовом помоле);
- скоростное кондиционирование (используют только при сортовом помоле);
- вакуумное кондиционирование (используют крайне редко только при сортовом помоле).

Холодное кондиционирование проводят при температуре 18…20 °С или водой, подогретой до 30…35 °С. Зерно увлажняют, после чего его отправляют на отволаживание, длящееся от 8 до 48 ч в зависимости от исходной влажности. В течение этого времени влага перераспределяется по анатомическим частям зерна. Данный процесс необходим для набухания и разрыхления эндосперма, развития микротрещин, ослабления связей между алейроновым слоем и эндоспермом, что улучшает процесс размола [105].

Однако холодное кондиционирование имеет ряд недостатков:

1. При несоблюдении временных режимов отволаживания могут изменяться показатели клейковины в худшую сторону. Так, для слабой клейковины холодное кондиционирование нежелательно из-за уменьшения упругости и возрастания пластичности структуры зерна.

2. Невозможность достижения высокой интенсивности процесса отволаживания, так как процесс протекает под действием статических гидродинамических сил, а они интенсивны только в самом начале [106].

3. Процесс зависит от увлажнения каждого отдельного зерна [107], поэтому оно должно насыщаться водой равномерно [108], а это не представляется возможным, так как не обеспечивается обмывание каждого зерна.

4. Холодное кондиционирование не обеззараживает зерно; наоборот, оно интенсифицирует активность заражения.

При горячем кондиционировании наблюдаются более глубокие изменения структуры зерна за счет термодинамического воздействия, а также ускорение процесса массопередачи. Эндосперм быстрее становится рыхлым, а оболочки – эластичными. У слабой клейковины возможно улучшение реологических свойств, при этом происходят активация ферментных систем зерна и перемещение в зону, где расположен зародыш, для синтеза и формирования нового растения [109, 110].

При скоростном кондиционировании увлажнение и нагрев осуществляются паром при давлении, близком к атмосферному. Этот способ интенсифицирует процесс увлажнения [111, 112] и ускоряет разрыхление эндосперма.

На конечный результат насыщения зерна влагой при скоростном кондиционировании влияют такие факторы, как температура зерна и в помещении, скорость подачи зерна и др. [113]. Пар способствует распределению влаги в зерновке более равномерно, чем при холодном или горячем кондиционировании, однако из-за высокой температуры пара происходит неравномерное упрочнение клейковины зерна и может возникнуть денатурация белка [115]. Процесс увлажнения зерна необходим для доведения зерна до необходимых технологических параметров и облегчает отделение оболочки и размол [115].

Следует отметить, что все способы кондиционирования не обеззараживают зерно, так как многие микроорганизмы устойчивы к воздействию повышенных температур.

Оборудование для мокрой обработки зерна на мукомольных предприятиях представлено машинами для увлажнения А1-БШУ, А1-БУЗ, А1-БАЗ и оборудованием для мойки и мокрого шелушения зерна Ж-БМБ, А1-БМШ.

Машина А1-БМШ (рисунок 1.13) предназначена для мойки, отжима и шелушения зерна.

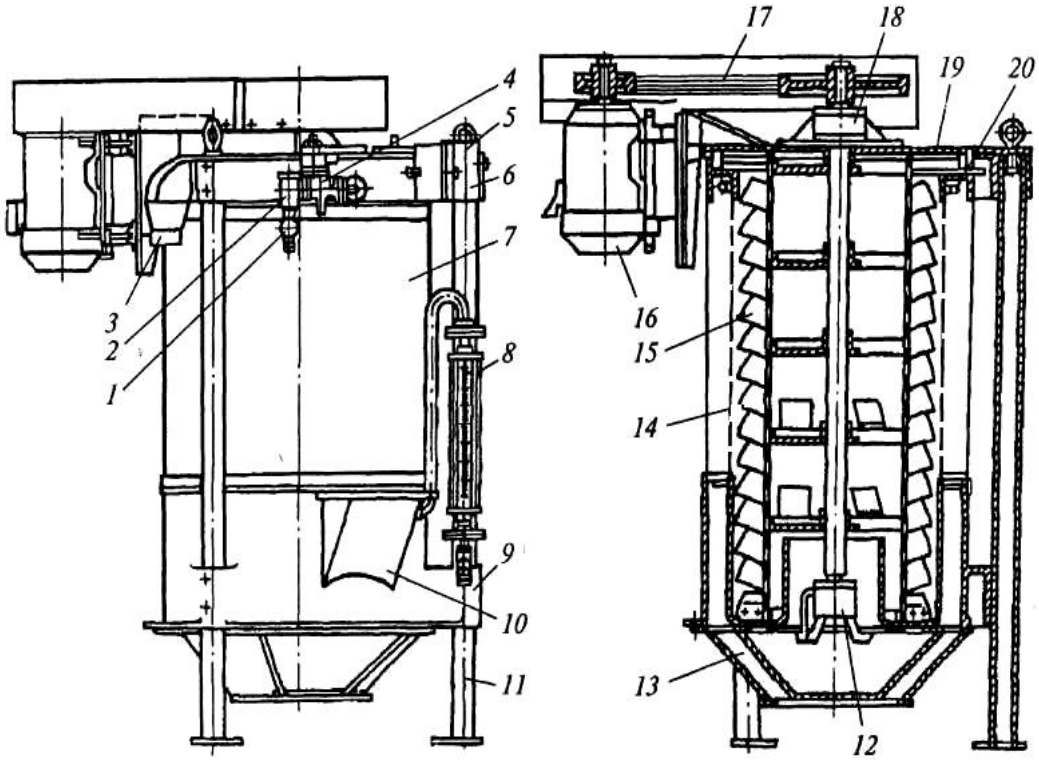


Рисунок 1.13 – Машина А1-БМШ: 1 – запорный вентиль; 2 – фильтр; 3 – выпускной патрубок; 4 – мембранный вентиль; 5 – прибор для контроля подачи воды; 6 – траверса; 7 – кожух; 8 – ротаметр; 9 – корпус; 10 – приемный патрубок; 11 – стойки; 12 – нижний подшипниковый узел; 13 – кольцевой конусный канал; 14 – чешуйчатый (ситовой) цилиндр; 15 – ротор; 16 – электродвигатель; 17 – клиноременная передача; 18 – верхний подшипниковый узел; 19 – крышка; 20 – трубчатое пластмассовое кольцо

Зерно, загружаемое в машину через приемный патрубок, подается в моечную зону, куда поступает вода. Гонками зерно поднимается вверх, проходя зону мойки, отжима, шелушения и камеру выброса. В результате трения зерна о ситовой цилиндр его поверхность частично очищается от надорванных оболочек. Недостатками этого устройства являются большой расход воды и высокие энергозатраты.

Моечная машина Ж9-БМБ (рисунок 1.14) предназначена для очистки поверхности зерна от мелких фракций пыли, почвы, органических и минеральных примесей.

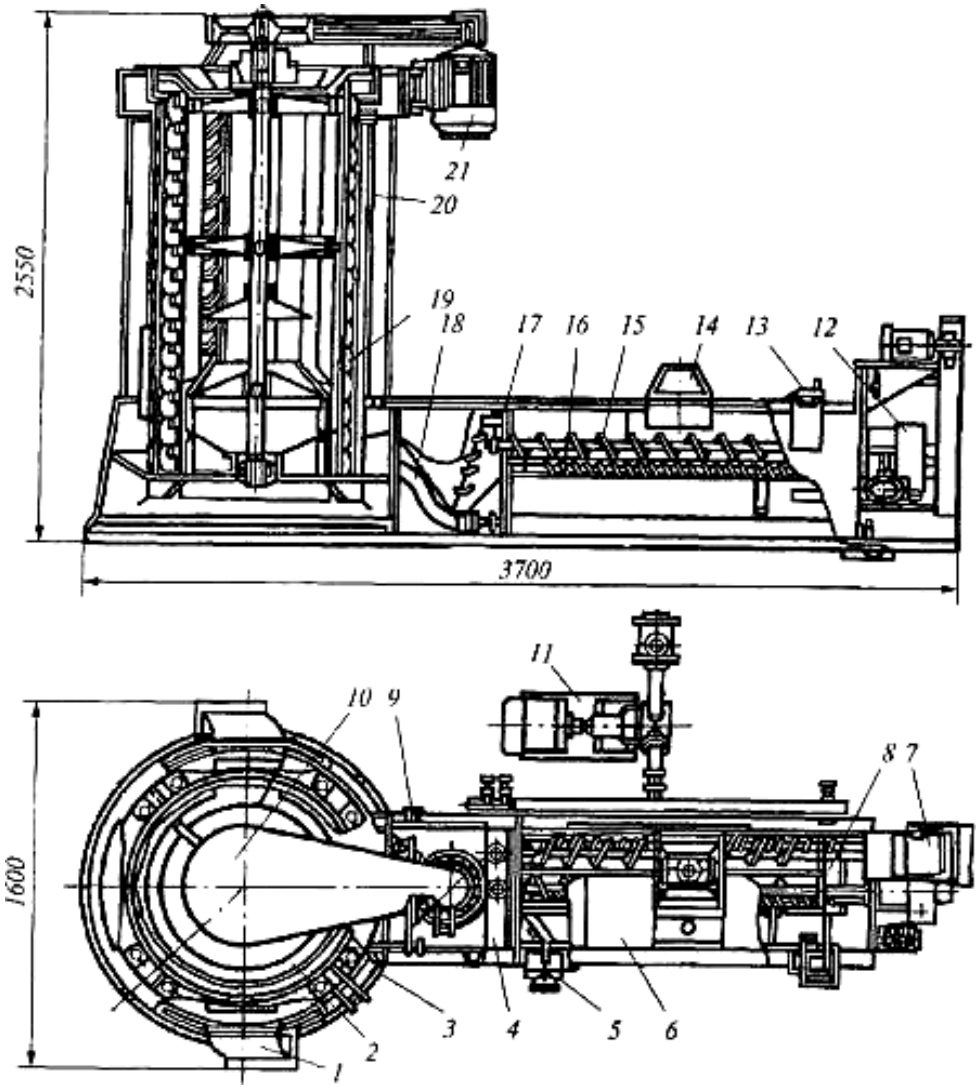


Рисунок 1.14 – Моечная машина Ж9-БМБ: 1, 5 – выпускные патрубки; 2 – отжимная колонка; 3 – ороситель; 4 – сплавное устройство; 6 – ванна; 7 – электродвигатель; 8 – воронка; 9 – патрубок; 10 – защитное ограждение; 11 – насосная установка; 12 – редуктор; 13 – камнеотделитель; 14 – приемное устройство; 15 – шнек зерна; 16 – камнеотделительный шнек; 17 – промежуточная стенка; 18 – воронка трубы; 19 – лопатки барабана; 20 – ситовая обечайка; 21 – электродвигатель

Зерно поступает через приемное устройство в ванну с водой, где оно отделяется от минеральных примесей, и шнеком передается в отжимную колонку. Под действием центробежной силы влажное зерно прижимается к сетчатому цилиндру и поднимается к выпускному патрубку. Недостатками этого

устройства являются большие габаритные размеры и низкая эффективность очистки зерна от минеральных примесей.

Машины типа А1-БШУ выпускают в двух вариантах: А1-БШУ-1 и А1-БШУ-2. А1-БШУ-1 устанавливают в начале третьего этапа холодного кондиционирования над бункером для увлажнения зерна перед I драной системой, а машину А1-БШУ-2 (рисунок 1.15) используют для основного увлажнения и устанавливают ее вместо моечной машины Ж9-БМА или машины А1-БМШ-1 для мокрого шелушения зерна, т. е. в начале I этапа холодного кондиционирования перед распределительными винтовыми конвейерами, направляющими зерно в бункеры для отволаживания.

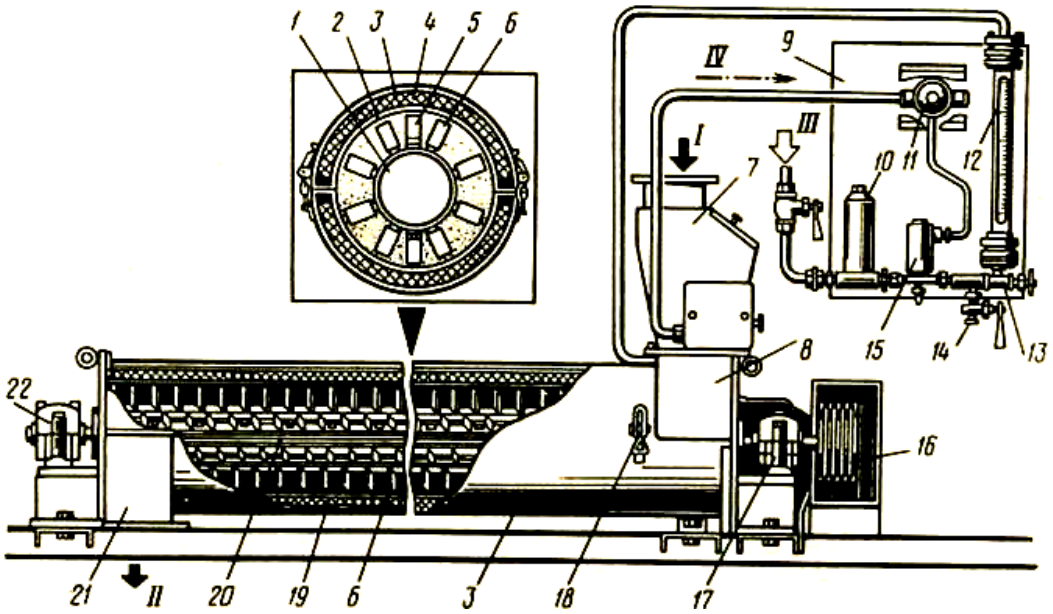


Рисунок 1.15 – Машина А1-БШУ-2 для увлажнения зерна: 1 – вал; 2 – корпус; 3 – кожух; 4 – прокладка; 5, 6 – гонки; 7 – индикатор наличия зерна; 8, 21 – приемный и выпускной патрубки; 9 – панель; 10 – фильтр; 11 – электророзетка; 12 – ротаметр; 13 – игольчатый вентиль; 14 – спускной кран; 15 – электромагнитный вентиль; 16 – привод; 17, 22 – корпуса подшипников; 18 – запор; 19 – бич; 20 – шпилька

Зерно подается в машину, перемещается бичевым ротором и под действием центробежных сил отбрасывается к кожуху. Интенсивное перемешивание зерна с водой позволяет использовать увлажнительную машину для закладки зерна в бункеры отволаживания или для доувлажнения. Установки А1-

БШУ только увлажняют зерно, но не способствуют его очистке от минеральных примесей, плесневых грибов и вредителей.

Технологии подготовки зерна к сортовому помолу основаны на использовании большого числа технологических машин и площадей, что приводит к длительному процессу подготовки и высоким экономическим затратам.

Анализ показал, что технические средства для увлажнения и мойки зерна при его подготовке к сортовому или обойному помолу по своему составу различны. В случае сортового помола в ходе подготовки зерно тщательно моют, с него удаляются оболочка, алейроновый слой, зародыш. Оставшийся эндосперм обладает повышенной чистотой и минимальной зольностью. При простом помоле биологическая структура сохраняется полностью.

При сухой обработке зерна применяют минимальное количество машин, что не обеспечивает качественную очистку оболочки от минеральных загрязнений и следов зараженности. И если при сортовом помоле очистка зерна соответствует всем нормативным требованиям, то при простом помоле она неудовлетворительна.

1.3 Особенности способов подготовки зернобобовых культур

Белок необходим для всего животного мира, так как он выполняет пластическую, регуляторную и энергетическую функции. Он является строительным материалом органов и тканей, а также основой ферментов, гормонов и иммунных тел, служит источником энергии. Потребность в белке для недойной коровы составляет 500–800 г/сут., для дойной – до 1500, для молодой свиноматки – до 500 г/сут. [116, 117]. Физиологическая потребность в белке для взрослых людей – от 65 до 117 г/сут., для детей до 1 года – 2,2–2,9 г на 1 кг массы тела, для детей старше 1 года – от 36 до 87 г/сут. [119].

Из-за дефицита белка в рационе животных снижается их продуктивность, замедляется прирост, увеличивается время выращивания и откорма, снижаются эффективность питательных веществ и в целом протеиновая ценность кормов [119, 120].

Из всех зернобобовых культур соя имеет самую высокую урожайность (до 40 ц/га), а содержание белка в ней достигает 60 %. Это позволяет производство и переработку зерна сои считать абсолютно перспективным направлением устранения дефицита белка в кормопроизводстве и пищевой индустрии [121].

Однако при всех своих достоинствах соя имеет существенные недостатки, заключающиеся в наличии антипитательных веществ, прежде всего ингибиторов трипсина и уреазы, которые препятствуют ее ферментативному усвоению в сыром виде. При поедании животными необработанного зерна сои нарушается ферментативная деятельность желудочно-кишечного тракта, развивается диарея, теряется значительное количество неусвоенных кормов.

В зерне сои присутствуют антипитательные вещества белковой (90 %), углеводной (8 %) и гликозидной (2 %) природы. Поэтому особенностью подготовки этой культуры в кормопроизводстве считается необходимость её обработки для удаления антипитательных веществ. Наибольшее внимание уделяют ингибитору трипсина, который не расщепляется пепсином желудка и сразу попадает в кишечник, где, взаимодействуя с ферментом поджелудочной железы трипсином, нарушает его работу. На этой стадии переваривание белка зерна сои прекращается, и его потери могут составить до 30 %.

1.3.1 Особенности строения и технологические свойства зернобобовых культур

Бобовые культуры – это двудольные растения, у которых питательные вещества находятся в зародыше и семядолях. Семенная оболочка защищает семя

и не пропускает ни воду, ни газ [122]. Наиболее широко распространённой зернобобовой культурой в России является соя.

Строение зерна сои представлено на рисунке 1.16.

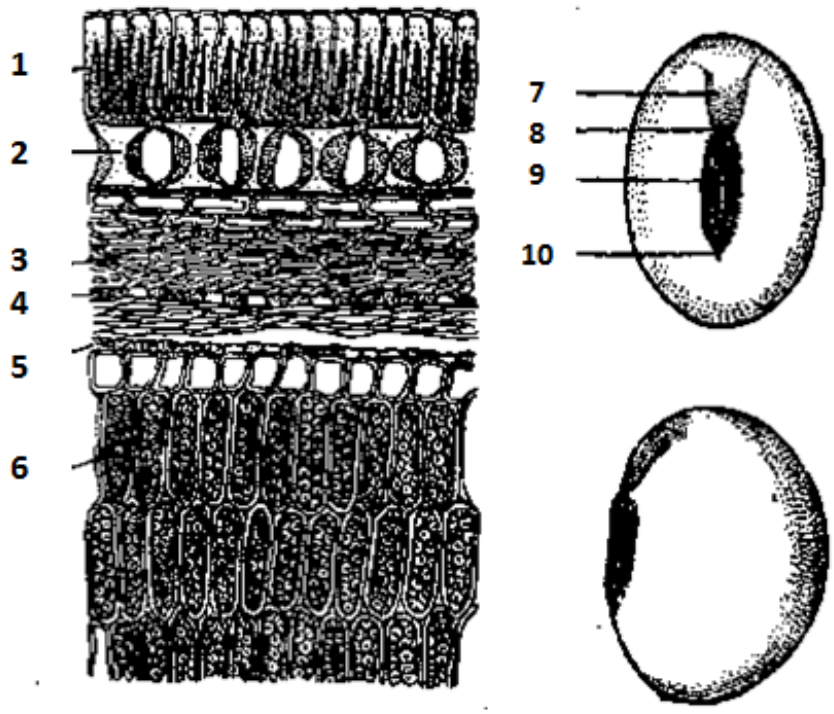


Рисунок 1.16 – Строение зерна сои: 1 – палисадный эпидермис; 2 – гиподерма; 3 – губчатая паренхима; 4 – алейроновый слой; 5 – эпидермис семядолей; 6 – клетки семядолей; 7 – подсемядольное колено, видимое через оболочку; 8 – микропиле; 9 – рубчик; 10 – халаза

У всех бобовых на поверхности семян различается семенной рубчик, где происходит прикрепление семяножки к семяпочке. Это то место, от которого отрывается семя от материнского растения. Содержание белков в разных частях семени неодинаково, наибольшая часть находится в ростках. Основной фракцией являются глобулины. Важным отличием белка зерна сои является высокое содержание лизина, которого мало в зерновых культурах [122].

Химический состав зерна сои зависит от сортовых особенностей и условий выращивания. Она может содержать от 27 до 60 % белка, от 15 до 28 % масла и от 14 до 33,2 % углеводов. Оптимальное содержание в зерне сое минеральных солей (от 3,2 до 4,2 %), кальция (от 320 до 350 мг), железа (от 9,2

до 14,9 %) и фосфора, а также большое количество витаминов Р, С, РР, Е и небольшое содержание витаминов А, B_1, B_2, B_3, B_6 и К свидетельствуют о высоких потенциальных возможностях, заключенных в этой культуре природой. Химический состав зерна сои представлен в таблице 1.3 [124].

Таблица 1.3 – **Химический состав зерна сои**

Показатель	Содержание, %
Липиды	15–28
Белки	27–60
Целлюлоза	4,3–5,3
Зола	2,8–5,6

В белках зерна сои, как и в других бобовых культурах, содержатся ингибиторы протеолитических ферментов. При этом у зерна сои два ингибитора трипсина, которые связывают цистин и метионин. Наиболее отрицательное воздействие оказывают водорастворимый ингибитор трипсина Кунитца и спирторастворимый Баумана – Бирка [124, 125]. Известно, что, попадая в желудок, часть ингибиторов теряют свою активность на 30–40 % [126]. Корма и пищевые продукты не перевариваются полностью.

Негативно также воздействие уреазы, представляющей собой гидролитический фермент из группы амидаз, обладающий свойством катализировать гидролиз мочевины в диоксиды углерода и аммиака, что вызывает неприятный вяжущий вкус, запах и обусловливает низкую перевариваемость. Нативному зерну сои необходима обработка, во время которой осуществляется экстракция бобов, что ведет к значительному изменению химических и биологических характеристик и в значительной мере снижает антипитательные свойства.

Необходимо, чтобы белок зерна сои усваивался животными или человеком, как и другие, всасываясь в кровь в виде свободных аминокислот [127]. Это должно происходить за счет ферментов, участвующих в химическом вза-

имодействии. Однако ингибиторы образуют с протеолитическими ферментами животного происхождения (в частности, с трипсином и химотрипсином) устойчивые комплексы, в составе которых фермент теряет активность [128]. Ингибиторы резко снижают эффективность усвоения белка, вызывая угнетение роста и панкреатическую гипертрофию [129].

Однако на долю водорастворимых соединений приходится до 90 % ингибиторной активности, поскольку массовое отношение водно- и спирторастворимой групп составляет примерно 2,3:1,0, поэтому для удаления антипитательных веществ возможна экстракция в растворитель [36, 128].

С удалением ингибитора реакция гидролиза восстанавливается. Таким образом, в расщеплении белкового субстрата участвуют радикалы аспарагин (Асп102), гистидин (Гис57) и серин (Сер195). Гистидин и серин образуют нестабильную водородную связь H–N, далее прекращаются связи между аминокислотами C–N, а затем и между гистидином и серином, а сами радикалы присоединяются к тирозину и изолейцину. Появляется первый продукт распада – тирозин. При достижении им электролитической нейтральности связанный с ним радикал участвует в роли донора протонов.

Необходимо наличие молекулы воды для продолжения реакции. Вода, притянутая остатком гистидина, возвращает ему утраченный протон, а сама превращается в отрицательно заряженный ион гидроксила OH^-, который соединяется с углеродом изолейцина.

На рисунке 1.17 представлен ход взаимодействия между активным центром фермента химотрипсина и белком, образованным аминокислотами тирозином и изолейцином.

Далее остаток серина восстанавливается протоном, а его связь с углеродом лишается устойчивости и разрушается. Появляется второй продукт распада – свободный изолейцин, а радикалы гистидин и серин опять связываются друг с другом, завершая расщепление белка и регенерируя активный центр фермента [130].

К основным отрицательным технологическим свойствам зерна сои можно отнести наличие примесей, повышенную влажность, зараженность вредителями, содержание белковых экстрактивных и антипитательных веществ и их высокую активность. Все эти показатели нормируются соответствующими ГОСТами [131–138].

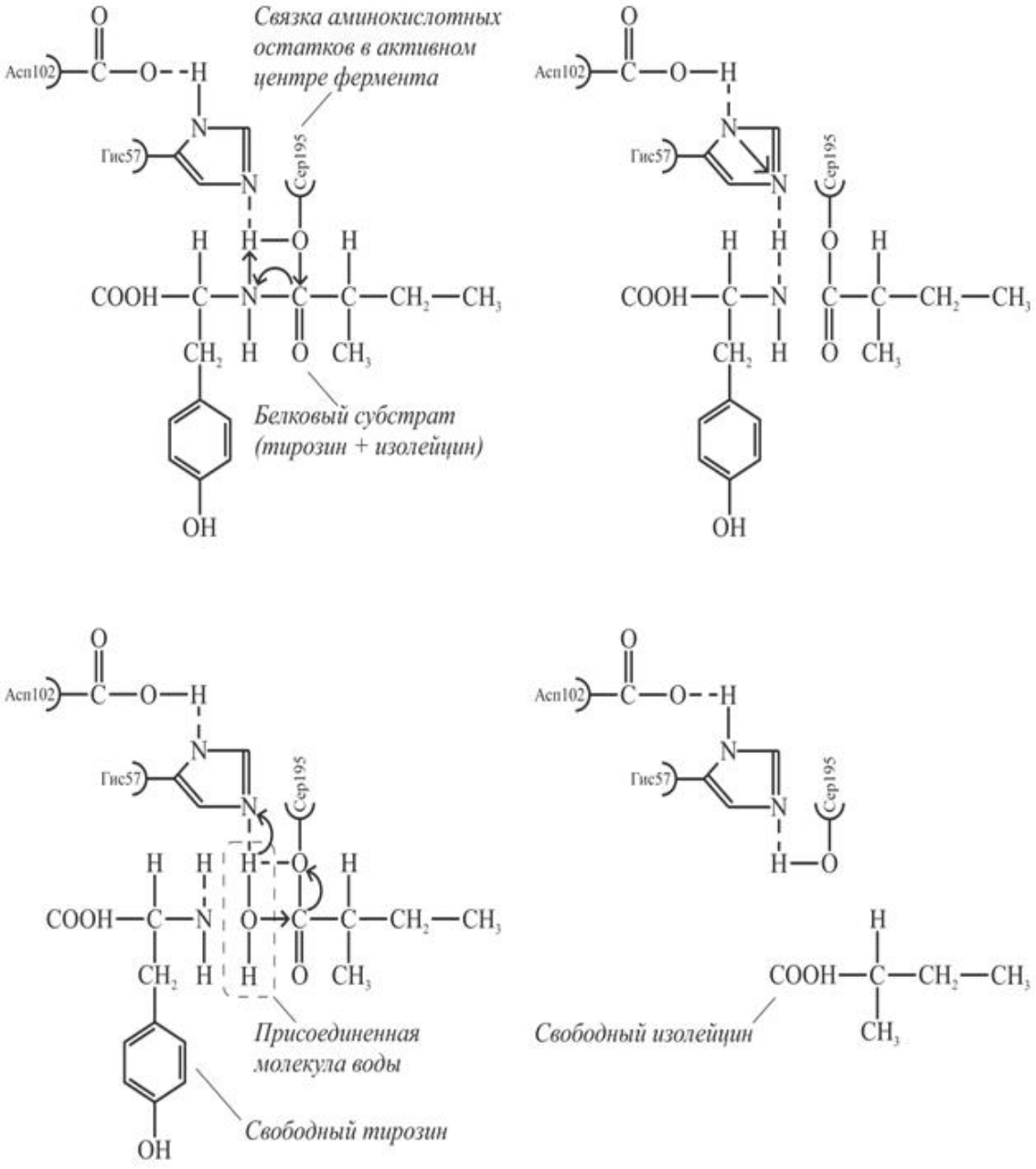


Рисунок 1.17 – Кинетика ферментативных реакций в активном центре химотрипсина

1.3.2 Требования, предъявляемые к зернобобовым культурам

Основными правовыми документами, которые действуют на территории России в отношении зерна сои, являются:

- ГОСТ 17109-88. Соя. Требования при заготовках и поставках [135];
- технический регламент ТР ТС 015/2011 Таможенного союза «О безопасности зерна» [74].

Базисные нормы для зернобобовых: влажность 12,0 %, содержание сорной примеси – 2,0 %, масличной примеси – 6,0 %; зараженность вредителями не допускается. Ограничительные нормы: влажность – 18,0 %, содержание сорной и масличной примеси – 15,0 %; зараженность вредителями не допускается, кроме зараженности клещом не выше II степени.

Содержание микотоксинов, пестицидов, токсичных элементов нормируется техническим регламентом [74].

1.3.3 Способы и средства механизации подготовки зернобобовых культур к кормопроизводству

Особенностью зернобобовых культур является наличие ингибиторов, препятствующих усвоению белка, поэтому в комбикормовой промышленности используют зернобобовые культуры в чистом виде и в смесях не более 2–5 %.

На рисунке 1.18 представлена схема производства комбикормов для сельскохозяйственных животных.

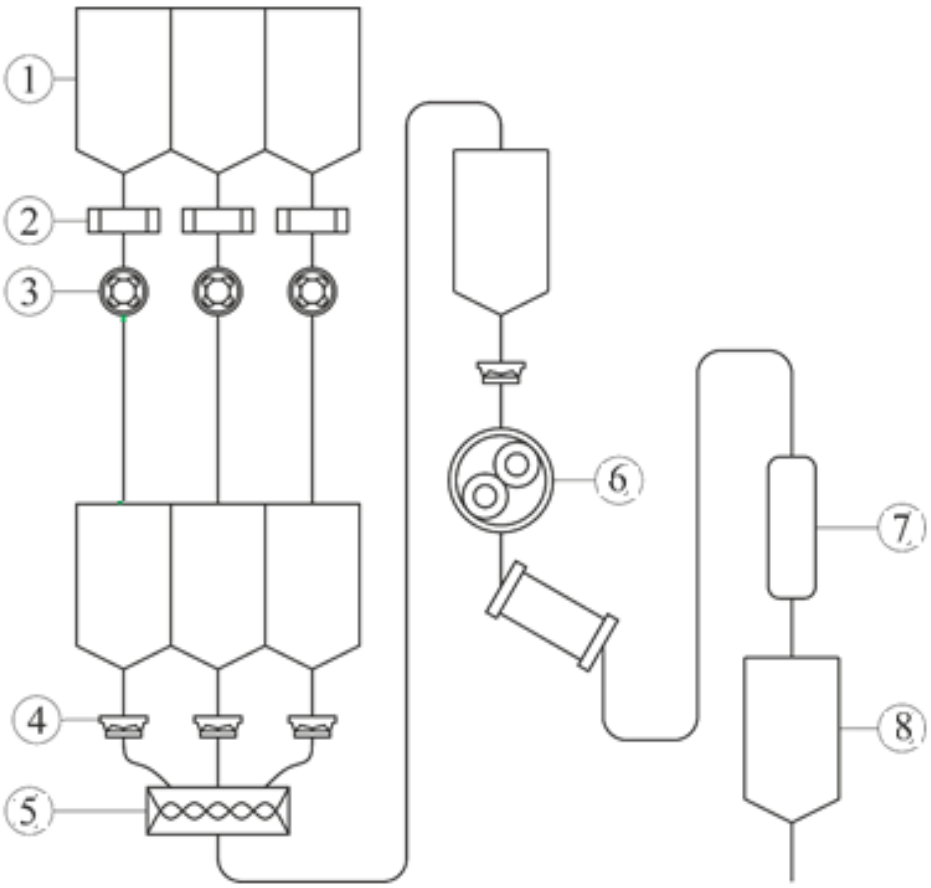


Рисунок 1.18 – Схема производства комбикормов: 1 – бункеры исходного сырья; 2 – блок магнитных сепараторов; 3 – блок дробилок; 4 – блок дозаторов; 5 – шнековый смеситель; 6 – пресс-гранулятор; 7 – охлаждающая колонка; 8 – бункер накопления и отгрузки комбикорма

Известны различные способы обработки зернобобовых культур, которые уменьшают содержание ингибиторов. Но так как они относятся к веществам белковой природы, то некоторые физические или практически все химические воздействия могут вызвать потерю положительных биологических свойств.

Соя является самой распространенной кормовой культурой, соответственно существует много способов ее переработки. Известны способы водной промывки сои, замачивания в растворе щелочей, солей, кислот [139–141], а также тепловые способы, когда зерно поджаривают, варят, пропаривают, подвергают инфракрасной или СВЧ-обработке (рисунок 1.19) [142–152].

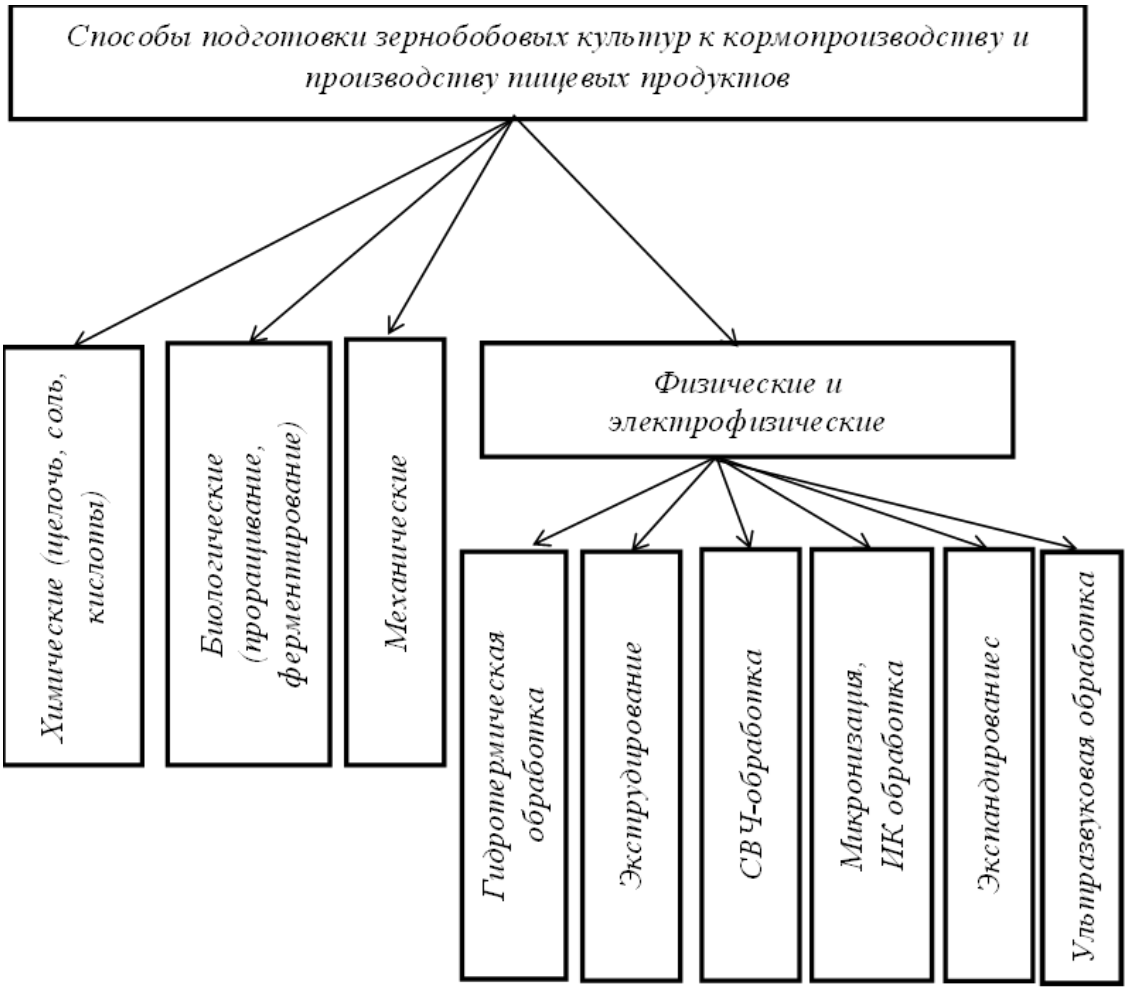


Рисунок 1.19 – Классификация способов подготовки зернобобовых культур к кормопроизводству и производству пищевых продуктов

Способы, приведенные на рисунке 1.19, способны в большей мере разрушать уреазу, а активность ингибиторов при этом может сохраняться. Длительная тепловая обработка приводит к денатурации и разрушению структуры зерна и образованию каши, что нецелесообразно в кормопроизводстве и тем более при хранении продуктов. Пропаривание сои как частный способ тепловой обработки также имеет недостатки. Пар не проникает вглубь зерна, процесс массопередачи не стабилен и вредные вещества удаляются в малом количестве [149].

Классификация средств механизации подготовки зернобобовых культур к кормопроизводству представлена на рисунке 1.20.

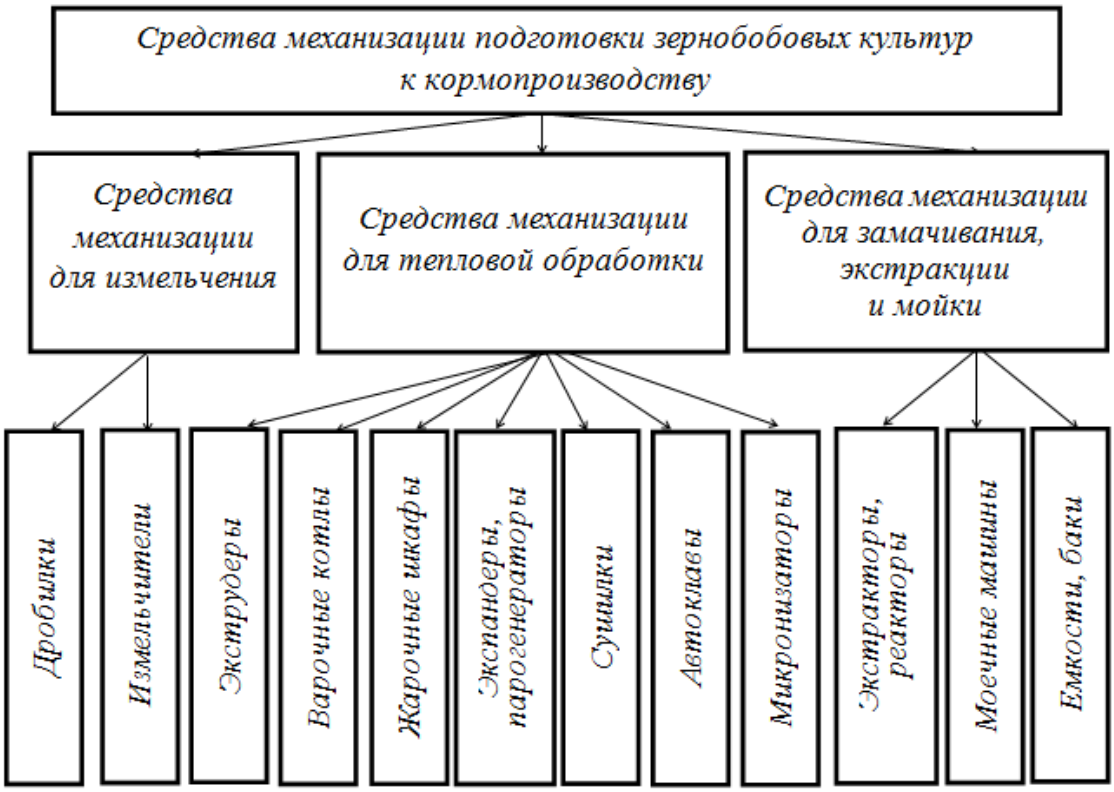


Рисунок 1.20 – Классификация средств механизации подготовки зернобобовых культур к кормопроизводству

При тепловой обработке в автоклавах процесс инактивации протекает выборочно: уреаза разрушается полностью, а ингибитор трипсина только на 45 %. При СВЧ-обработке, наоборот, разрушается ингибитор трипсина, а уреаза – только на 40 % [153].

Микронизацию используют как отдельную технологическую операцию или в комбинации с другими. Нагрев зерна сои до 120…130 °С позволяет уменьшить содержание ингибитора трипсина в 4–8 раз [152]. Однако неравномерный прогрев с одной стороны зерна является существенным недостатком данного способа [153].

При инфракрасной обработке зерно нагревается за короткий период до 140…200 °С, что приводит к появлению микротрещин, денатурации белка и ингибиторов, а часть крахмала превращается в декстрины. Такая обработка вызывает перегрев массы зерна и потери полезных свойств.

Известны способы экструдирования сои под высоким давлением и при температурах выше 100 °С [155]. Недостатками данных способов являются высокая энергозатратность и полная денатурация белка.

На рисунке 1.21 представлена технологическая схема производства сои и соевых кормовых концентратов экструдированием.

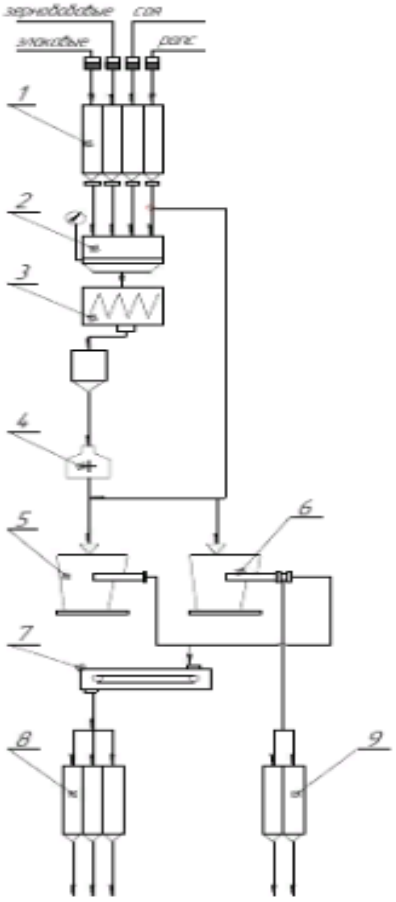


Рисунок 1.21 – Технологическая схема производства сои и соевых кормовых концентратов экструдированием: 1 – наддозаторные бункеры; 2 – дозаторы; 3 – смеситель; 4 – дробилка; 5 – экструдер; 6 – экструдер с масложировой насадкой; 7 – охладитель; 8 – бункеры готовой продукции; 9 – емкости для масла

Современным способом гидротермической обработки зернобобовых культур является экспандирование. Установка для экспандирования содержит пресс-гранулятор, шнековый питатель, смеситель-пропариватель и экспандер. Параметры работы экспандера изменяются в зависимости от обрабатываемого сырья: давление – от 1,0 до 4,0 МПа, температура продукта – от 100 до 130 °С, продолжительность обработки – до 5 с [156]. Недостатками данного способа являются высокая степень денатурации белка и энергозатратность.

Средства механизации, позволяющие снизить содержание антипитательных веществ зернобобовых без воздействия повышенных температур, основаны на экстрагировании ингибитора в жидкую среду. Так, при производстве пищевых продуктов из сои (например, сыра тофу) её замачивают на 4–16 ч [157].

При производстве молока из сои для вскармливания сельскохозяйственных животных её замачивают на 6,0–7,5 ч [158, 159].

В автоматической машине для замачивания и мойки сои (рисунок 1.22) используют сжатый воздух. Устанавливают время очистки, замачивания, разгрузки и слива воды [160].

Рисунок 1.22 – Автоматическая машина для замачивания и мойки сои

Ингибиторы представляют собой запасенное в растительных клетках растворимое кристаллическое вещество и могут быть экстрагированы с целью повышения кормовой и пищевой ценности сырья. Однако простое замачивание не может избавить сою от всех антипитательных веществ.

Анализ технических средств показал, что обработка зернобобовых культур с целью удаления ингибитора трипсина и уреазы является важной технологической операцией. Судя по существующим технологиям и применяемому оборудованию, проблема очистки от антипитательных веществ, находящихся в зерне сои, существенна. Исходя из этого, научно-исследовательские работы

по повышению качества обработки зерна сои должны быть направлены на оптимизацию основных составляющих технологического процесса: среды, температуры, времени и себестоимости экстрагирования.

1.4 Особенности способов очистки растительных масел

На территории России в основном выращивают следующие масличные культуры: подсолнечник, рапс, горчицу, рыжик, сафлор, также в эту группу принято относить зернобобовую культуру сою.

В России подсолнечник традиционно является основной масличной культурой, на его долю приходится около 80 % всего масличного сырья. Это вторая культура растениеводства в стране по объему производства [159]. По данным Федеральной службы государственной статистики, посевные площади под подсолнечник стабильно увеличиваются [53].

По итогам работы отрасли растениеводства, в 2019 г. выращено 15,4 млн т подсолнечника, из которых 5413 тыс. т приходится на фермерские хозяйства. Только в Саратовской области ежегодно производят до 1,5–2,0 т подсолнечника.

1.4.1 Особенности строения и технологические свойства масличных культур

Основной масличной культурой в России является подсолнечник. Его ботаническое название Helianthus annuus Linnaeus [162]. Семена подсолнечника подразделяют на три класса в зависимости от массовой доли масла, кислотного числа и сорных примесей [163]. Строение семянки подсолнечника представлено на рисунке 1.23.

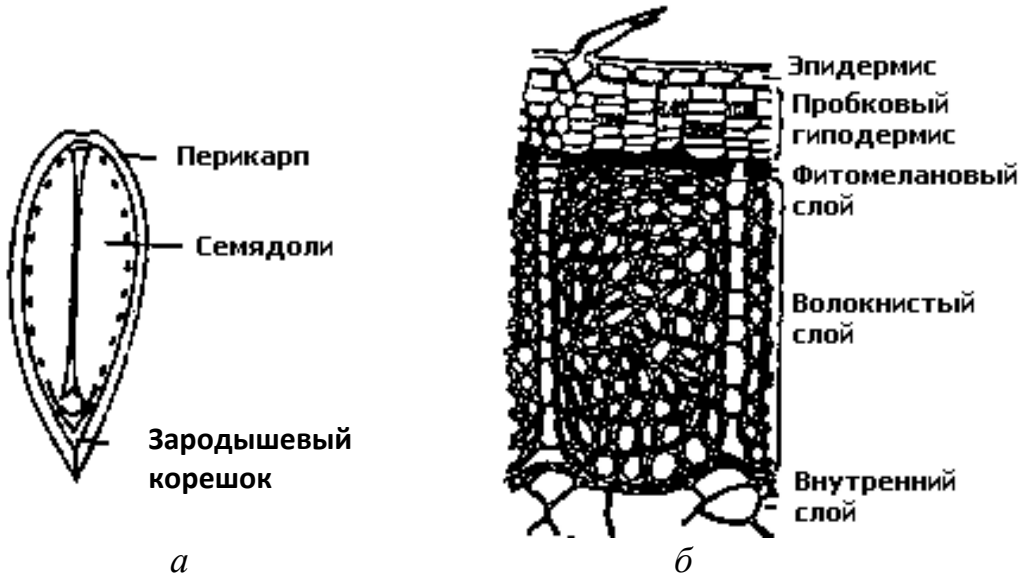


Рисунок 1.23 – Строение семянки подсолнечника: *а* – продольный срез; *б* – поперечный разрез

Плод подсолнечника – семянка сжатояйцевидной формы с четырьмя не резко выраженными гранями. Она состоит из плодовой оболочки (околоплодника, лузги) и собственно семени (ядра). В плодовой оболочке находится фитомелановый (панцирный) слой. Семя подсолнечника представляет собой покрытый тонкой семенной оболочкой зародыш, который состоит из двух семядолей и находящимися между ними почечками, гипокотиля и зародышевого корешка. Основные запасы питательных веществ (масло, белок) находятся в семядолях.

Содержание масла в семенах зависит от видовых и сортовых особенностей культуры, места и условий выращивания, применения удобрений, сроков дозревания и уборки. Соответственно, и составляющие масел, от которых следует избавляться при их производстве, полностью зависимы от перечисленных особенностей.

По составу жирных кислот в масле различают подсолнечник линолевого типа, в масле которого в преобладающем количестве содержится линолевая кислота, и подсолнечник олеинового типа, в масле которого преобладает олеиновая кислота. Подсолнечник линолевого типа имеет в молекулах 18 атомов углерода и 2 двойные связи, а подсолнечник олеинового типа – 18 атомов углерода, но одну двойную связь; масло этого подсолнечника наиболее пита-

тельно и по своей питательности близкое к оливковому. Характер жирной кислоты определяется длиной цепи и зависит от числа атомов углерода и степени ненасыщенности двойных связей.

Семена подсолнечника имеют сложное биологическое строение (таблица 1.4) [169].

Таблица 1.4 – **Химический состав подсолнечника**

Показатель	Содержание, %	
	в семенах	в ядре
Липиды	52–56	64–68
Белки	14–16	16–19
Целлюлоза	13–14	1,7–2,1
Зола	2,9–3,1	3,0–3,2

1.4.2 Требования, предъявляемые к масличным культурам и нерафинированным маслам

Основными правовыми документами, которые действуют на территории России в отношении масличных культур (подсолнечника), являются:

- ГОСТ 22391-2015. Подсолнечник. Технические условия [163];
- технический регламент ТР ТС 015/2011 Таможенного союза «О безопасности зерна» [74].

В зависимости от показателей семена подсолнечника разделяют на три класса (таблица 1.5).

Содержание токсичных элементов, микотоксинов, пестицидов, радионуклидов и вредных примесей, а также зараженность вредителями в семенах подсолнечника не должны превышать допустимые уровни, установленные Техническим регламентом ТР ТС 015/2011 Таможенного союза «О безопасности зерна» [74].

Для подсолнечных масел актуальны следующие нормативные документы:

- ГОСТ 1129-2013. Масло подсолнечное. Технические условия [164];
- ТР ТС 021/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» [165];
- ТР ТС 024/2011. Технический регламент на масложировую продукцию [166].

Нормируемые показатели качества подсолнечного масла приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.5 – **Технические требования для семян подсолнечника**

Показатель	Класс подсолнечника		
	1	2	3
Состояние	в здоровом состоянии, без самосогревания или теплового повреждения во время сушки		
Цвет	свойственный нормальному цвету семян подсолнечника соответственно определенным сортовым признакам		
Запах	свойственный здоровым семенам подсолнечника (без постороннего, затхлого и плесневого запахов)		
Массовая доля влаги, %	6–8 %		
Массовая доля масла в пересчете на сухое вещество, %, не менее	50	45	40
Кислотное число масла, мг КОН/г, для семян, не более	1,3	2,2	5,0
Масличная примесь, %, не более	3,0	5,0	7,0
В том числе проросшие семена	1	2	3
Сорная примесь, %, не более	1	2	3
В том числе			
испорченные семена	0,2	0,5	1
минеральная примесь	0,3	0,5	0,5
В числе минеральной примеси галька, шлак, руда	0,15	0,3	0,3
Вредная примесь – семена клещевины	не допускается		

Таблица 1.6 – **Нормируемые показатели качества подсолнечного масла**

Показатель	Норма для подсолнечного масла								
	рафинированное дезодорированное					рафинированное недезодорированное	нерафинированное		
	премиум	высший сорт		первый сорт			высший сорт	первый сорт	для промышленной переработки
		вымороженное	невымороженное	вымороженное	невымороженное				
Цветное число, мг йода, не более	6			10		12	15	25	35
Кислотное число, мг КОН/г, не более	0,30			0,40		0,40	1,50	4,00	6,00
Массовая доля влаги и летучих веществ, %, не более	0,10						0,15	0,20	0,30
Перекисное число, ммоль активного кислорода/кг, не более	2,0	4,0	10,0	10,0			7,0	10,0	10,0
Анизидиновое число, не более	3,0		не нормируется						

Содержание пестицидов, токсичных элементов, микотоксинов и радионуклидов в семенах подсолнечника не должно превышать установленных норм [166].

Все содержащиеся в семенах подсолнечника, как и у всего сырья растительного происхождения, полезные составляющие, необходимые в конечном продукте, и вредные, представляющие своего рода загрязнители и кислоты, ведущие к инициированию свободных радикальных реакций и порче масла, попадают в готовый продукт.

1.4.3 Способы и средства механизации очистки нерафинированных растительных масел

Нерафинированное подсолнечное масло – это растительное масло, очищенное от мелкой и крупной взвеси, не прошедшее очистку по полному или частичному циклу стадий рафинации [166].

Масла могут быть произведены холодным или горячим прессованием и экстракцией. Самый древний способ – это холодное прессование. Масло, полученное таким способом, имеет уникальные, заложенные природой свойства, так как его вкус, запах, пищевые достоинства не испорчены, но срок хранения таких масел крайне низкий по причине наличия первичных и вторичных продуктов окисления. На крупных маслоперерабатывающих предприятиях все продукты окисления удаляют, но при этом удаляются всевозможными способами фильтрации, экстракции, отбеливания практически все полезные составляющие.

Растительные масла состоят из основных компонентов – триацилглициролов и органических веществ, которые растворяются в них. Все эти вещества называют липидами, которые при взаимодействии со щелочами гидролизуются с образованием солей высокомолекулярных жирных кислот (мыл). Липиды могут быть омыляемыми и неомыляемыми; последние не имеют жирнокислотных остатков и не образуют мыл. В группу неомыляемых липидов входят стероиды, жирорастворимые пигменты, витамины и провитамины. К пигментам растительных масел относят каротиноиды, хлорофилл, госсипол, к витаминам – токоферолы, витамин К.

Провитаминными свойствами обладают каротиноиды и стероиды, способные образовывать в организме человека витамины А и D [123].

Экстракция масел основана на способности липидов растворяться в органических растворителях, таких, как бензин, этиловый спирт, ацетон и др. Этот метод позволяет извлечь максимальное количество масла. На крупных маслоперерабатывающих предприятиях дополнительно проводят рафинацию масел для извлечения фосфолипидов посредством гидратации, восков – вымораживанием, свободных жирных кислот – щелочной нейтрализацией, красящих веществ – отбеливанием. Дополнительно проводят дезодорацию масел для улучшения запаха и экстракцию бензином.

На малых производствах нерафинированные масла производят по значительно упрощенной схеме, используя минимум технологического оборудования, что влечёт за собой низкое качество нерафинированных масел и короткий срок их хранения.

Масла являются сложной системой, состоящей из глицидолов и сопутствующих веществ, а также механических примесей, от которых необходимо освобождаться [167, 168].

Пищевая ценность растительных масел зависит от качества масличных семян, условий их хранения, подготовительных операций (очистка, шелушение) и технологий переработки. На рисунке 1.24 представлена схема производства подсолнечного масла прессовым способом.

В соответствии с ГОСТом [164] пищевая ценность растительных масел оценивается по кислотному, перекисному, анизидиновому, цветному и фосфорному числам.

Для увеличения сроков хранения нерафинированных масел, произведенных холодным и горячим прессованием, необходимо уделять особое внимание тщательной очистке масличных семян, а после производства – окончательному фильтрованию масла на центробежных установках с последующим отстаиванием, чтобы исключить попадание механических примесей и нежелательных органических компонентов, провоцирующих зарождение окислительных процессов.

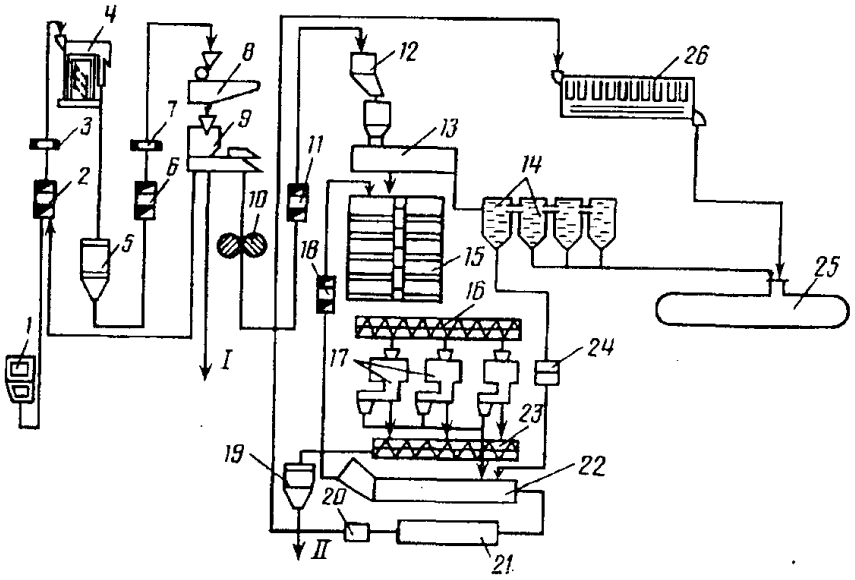


Рисунок 1.24 – Схема производства подсолнечного масла прессовым способом:
1 – приемный бункер; 2, 6, 11, 18 – нории; 3, 7 – магнитные устройства; 4 – аспиратор; 5 – бункер семян, подготовленных к переработке; 8 – бичевая шелушильная машина; 9 – аспирационная вейка; 10 – пятивальцовый станок ВС-5; 12 – бункер; 13 – пресс предварительного съема масла; 14 – приемные баки; 15 – пятичанная жаровня; 16 – сборный шнек; 17 – шнековые прессы; 19 – бункер для жмыха; 20 – насос для масла; 21 – уловитель отстоя; 22 – промежуточные сборники масла; 23 – шнек жмыха; 24 – фильтр; 25 – бак готовой продукции; 26 – фильтр-пресс; I – лузга; II – жмых

Исходя из проведенных исследований установлено, что применяемых технологических воздействий явно недостаточно, сроки хранения нерафинированных масел все равно значительно ниже, чем рафинированных. Это обусловлено тем, что на практике процесс повышения кислотности не приостанавливается. Он интенсифицируется от протекания свободной радикальной реакции.

Способы очистки нерафинированных растительных масел представлены на рисунке 1.25.

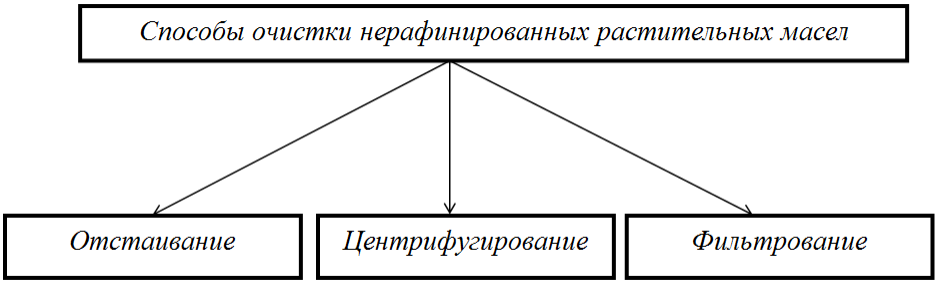


Рисунок 1.25 – Способы очистки нерафинированных растительных масел

Многие предприятия при производстве нерафинированных растительных масел методом прессования практически не уделяют внимания способам окончательной очистки, ограничиваясь перед розливом только отстаиванием, тем самым преднамеренно снижая срок хранения масел и их товарный вид.

При отстаивании происходит седиментация частиц под действием гравитационных сил тяжести. Мелкодисперсные взвешенные частицы могут оседать более длительное время, уже при хранении масел, поэтому этот способ очистки необходимо комбинировать с центрифугированием или фильтрованием [169, 170].

Метод центрифугирования основан на влиянии центробежной силы, твердые частицы масла перемещаются к периферии. Если барабан не перфорированный, то они налипают на его стенки. Если в барабане есть отверстия, то частицы попадают за них и выводятся из центрифуги.

Схема очистки масел центрифугированием представлена на рисунке 1.26.

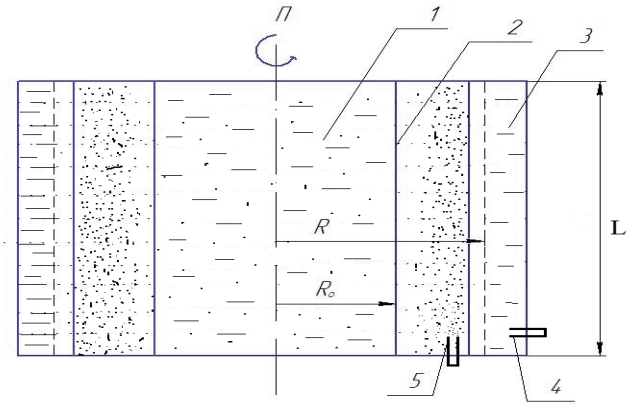


Рисунок 1.26 – Схема очистки масел центрифугированием: 1 – очищаемая суспензия; 2 – фильтровальная ткань; 3 – перегородка фильтровального барабана; 4 – сход фильтрата; 5 – сход осадка; R, R_0 – соответственно внешний и внутренний радиусы барабана центрифуги; L – высота барабана центрифуги

Однако при центрифугировании не все частицы могут быть удалены, и они остаются в масле во взвешенном состоянии.

Фильтрование основано на очистке масел от взвешенных частиц через фильтровальную перегородку. Для протекания данного процесса необходима разность давлений по обе стороны перегородки, поэтому скорость фильтрования прямо пропорциональна разности давлений и обратно пропорциональна сопротивлению пористой перегородки и самого осадка. При

этом на фильтрующей перегородке возрастает сопротивление при увеличении толщины осадка. Недостатком этого способа является необходимость постоянной очистки осадка с перегородки и пор, что крайне затруднительно.

Применяемые средства для очистки масел представлены на рисунке 1.27.

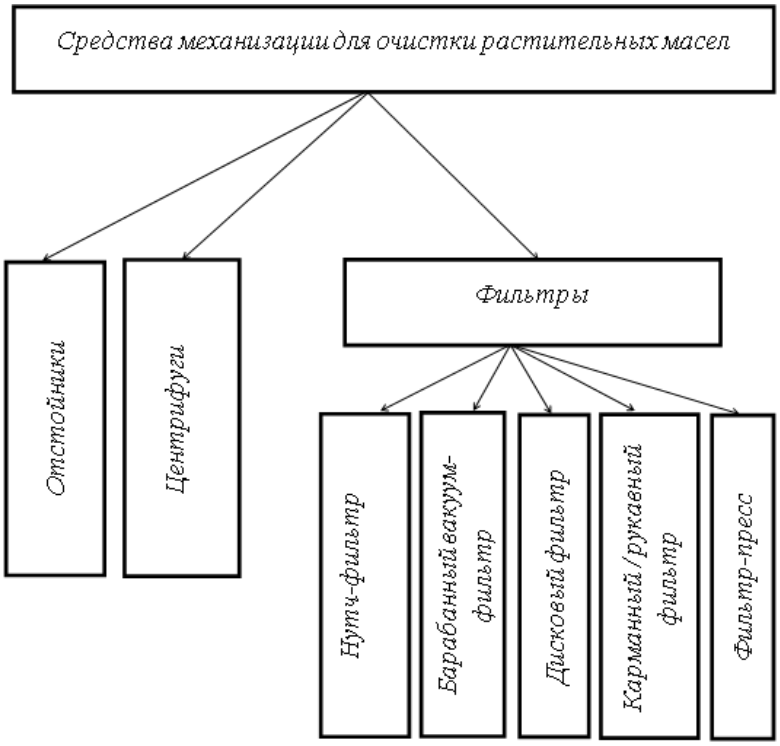


Рисунок 1.27 – Средства механизации для очистки растительных масел

Для очистки растительных масел методом фильтрации в последние годы предлагаются многоступенчатые технологии. Компания «Продтехмаш» разработала комплекс фильтрации растительных масел М8-КФМ [171] (рисунок 1.28). Он состоит из барабана, под которым находится ванна для масла, вакуумпровода, вакуумной станции, насосной станции, емкости для перлита, электрического шкафа.

Рисунок 1.28 – Комплекс фильтрации растительных масел М8-КФМ

На барабан натянута фильтровальная ткань, которая смачивается смесью масла с перлитом. Барабан, вращающийся со скоростью 0,5 мин$^{-1}$, погружается в ванну с маслом, которое проходит через слой перлита и фильтровальную ткань, попадает в ресивер, откуда очищенное масло подается в ёмкость-накопитель. Устройство снабжено ножом, который срезает слой загрязненного перлита 0,05 мм с барабана.

Недостатками данного комплекса являются сложный процесс очистки барабана, потери масла и высокая металлоемкость установки. Кроме того, он не предназначен для удаления первичных и вторичных продуктов окисления.

Фирма Amafilter предлагает трехступенчатую комплексную установку для фильтрации растительных масел холодного отжима, состоящую из напорного листового, рукавного и картриджного фильтров [172] (рисунок 1.29).

Напорный листовой фильтр работает под давлением, фильтрация масла осуществляется через грубую сетку и пластины фильтра. На второй ступени масло проходит через рукавный фильтр из ролиэстера (размер ячейки 1 мк), на третьей ступени – через картриджный фильтр из отбеленного хлопка.

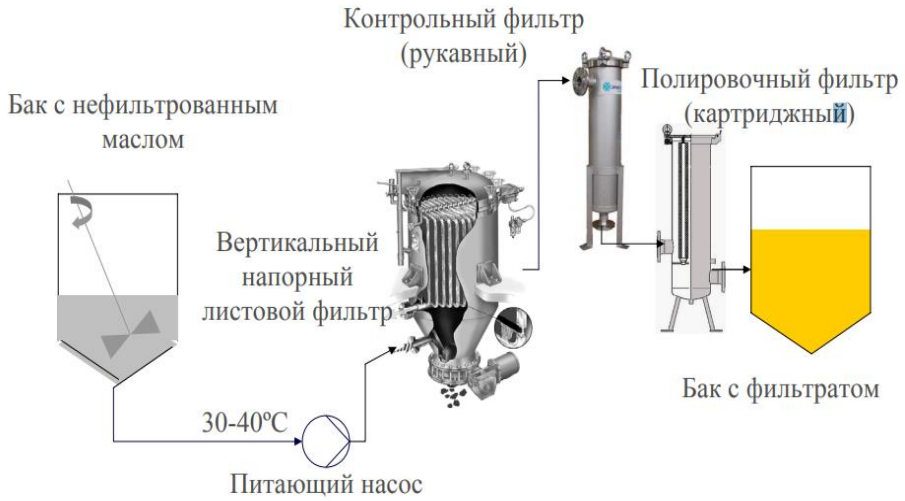


Рисунок 1.29 – Комплекс трехступенчатой фильтрации растительных масел холодного отжима

Комплексный многоступенчатый подход к очистке масел обеспечивает хорошие результаты, однако из-за дополнительных расходов на оборудование он не получил широкого применения на малых предприятиях по производству

растительных масел прессованием. Он также не предназначен для удаления первичных и вторичных продуктов окисления.

Анализ средств механизации для очистки растительных масел методом прессования показал, что отделение всех и особенно коллоидно-дисперсных взвешенных частиц не представляется возможным без многоступенчатой очистки, которая требует дополнительных расходов на оборудование, что не реально для малых производств, поскольку повышает себестоимость масла. И, что существенно, ни один из вариантов очистки масел не приспособлен для реактивации начальной кислотности и ее возрастания в ходе свободной радикальной реакции при хранении. Поэтому необходимы новые научно обоснованные технологии и технические средства очистки нерафинированных растительных масел, позволяющие получать масла высокой пищевой ценности с повышенными сроками хранения.

1.5 Применение ультразвука в пищевых и перерабатывающих производствах

В пищевой промышленности ультразвук начали интенсивно использовать с конца 50-х годов XX в. Ультразвуковыми процессами занимались такие ученые, как Т. И. Архипова, Л. Бергман, И. С. Демчук, А. Б. Даниловцева, Н. А. Ольшанский, М. Г. Коган и др. [30–33, 173–175].

Ультразвук в настоящее время применяют во всех областях перерабатывающей отрасли. Он способствует интенсификации процессов растворения, экстракции, перемешивания, стерилизации, посола, активации дрожжей, эмульгации, гомогенизации и т. д. [33–40, 176–178].

Влияние ультразвука на биологические объекты описывали в своих трудах Б. В. Акопян, И. П. Голямин, Ю. А. Ершов, В. Н. Хмелев и др. [41, 181, 182].

Многими учеными подтвержден бактерицидный эффект ультразвукового воздействия [39, 183–193]. Из теории ультразвукового воздействия на обрабатываемые поверхности следует, что для продвижения акустических колебательных течений основными являются нелинейные явления [191–192].

Исследования многих ученых показали, что ультразвуковая обработка имеет очень высокий потенциал, однако, предложенные раннее технологии имеют частоты и интенсивность волны ультразвука, применяемые для других задач.

Основой для изучения акустических колебательных движений являются закономерности, определяющие нелинейные эффекты акустики, в общем виде представляющие собой число Маха *M*, характеризующее процесс продвижения акустических волн в жидкости:

$$\mathrm{M} = \frac{V}{C} = \frac{\rho_0^{/}}{\rho_0}, \tag{1.1}$$

где V – амплитуда колебательной скорости частиц, м/с;

C – скорость звука, м/с;

ρ_0 – плотность среды, кг/м^3;

$\rho_0^{/}$ – избыточная плотность среды, вызванная звуковым возмущением, кг/м^3.

Исходя из теории ультразвукового воздействия на обрабатываемые материалы главным фактором является использование нелинейных эффектов движущихся акустических колебательных волн в жидкой среде. Это обеспечивается за счет изменения физических свойств среды, вызванных распространяющейся волной большой интенсивности. Акустические потоки жидкости имеют свойства корректировки направления перемещения в зависимости от препятствий, создаваемых обрабатываемым материалом, его омыванием в близкой зоне. Данное обстоятельство позволяет воздействовать на обрабатываемую поверхность и изменять ее структурные составляющие (рисунок 1.30). При разработке технологии, основанной на ультразвуковой обработке, число Маха должно быть аргументированно дополнено основными критериальными показателями: амплитудой и периодом колебательных движений, плотностью мощности и длиной распространения волны.

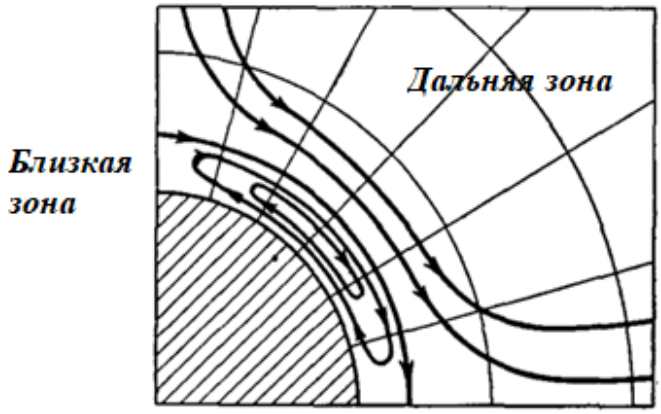


Рисунок 1.30 – Условия создания акустических течений вблизи плоской и цилиндрической границ омываемого объекта

На поверхности омываемого объекта создаются интенсивные пульсирующие микротечения, которые способствуют изменению кинетики процесса массопередачи, ускоряют продвижение жидкости сквозь поры и устьица системы «твердое тело – жидкость», активизируют продвижение масла и кислотные составляющие в системе «жидкость – газ». В рассматриваемой работе должны значительно повыситься интенсивность инактивации ингибиторов трипсина и уреазы в зерне сои, обеспечиться очистка, увлажнение и обеззараживание зерна при его подготовке к помолу и удаление первичных и вторичных продуктов окисления и загрязнений из нерафинированного растительного масла. В теоретическом плане необходимо изучение физических параметров ультразвуковых колебательных движений путем исследования волнового числа и установления рациональных параметров частоты и амплитуды ультразвука, воздействующих на движущую силу массопередачи. Особое внимание при этом следует уделять теоретическому и практическому анализу продвижения микропотоков жидкости, омыванию ею обрабатываемых поверхностей, отрыву выносимых твердых и газообразных составляющих из обрабатываемых продуктов.

На этой основе, начиная с 2012 г., нашими совместными работами, завершенными кандидатскими диссертациями Ю. А. Кодацкого [303], Н. А. Семи-

лета [304], М. С. Тулиевой [305] и аспирантами Д. В. Макаровым и Е. А. Сундуковым под руководством д-ра техн. наук, профессора Ф. Я. Рудика выполнены теоретические и экспериментальные разработки, обобщенные в представленной докторской диссертации.

Выводы по главе

Таким образом, стремление перерабатывающих предприятий 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. 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.

1. Зерновые, зернобобовые и масличные культуры являются основой продовольственной безопасности страны. Учитывая их значительные преимущества, им отдают приоритеты при производстве продуктов с набором всех основных незаменимых аминокислот, витаминов, минеральных веществ, клетчатки и кормов с высоким содержанием протеина. Зерно пшеницы, сои и подсолнечные нерафинированные масла являются наиболее характерными продуктами из этих групп для России.

2. Имеющиеся биологические недостатки связаны прежде всего с наличием антипитательных веществ ингибиторов фермента трипсина, химотрипсина и уреазы в зерне сои; с трудноудаляемыми с оболочки зерна загрязнениями минерального происхождения и зараженностями плесневыми грибами,

насекомыми-вредителями при производстве обойной муки, получающей все большее распространение в стране; с наличием в значительных количествах в нерафинированных растительных маслах первичных и вторичных продуктов окисления, которые ведут к существенным потерям как пищевой ценности продуктов, так и их объемов.

3. Установлено, что применяемые способы и технологии инактивации, очистки, мойки и увлажнения нерациональны с позиции их эффективности, качества, ресурсосбережения, трудовых и временных затрат. Технологии и технические средства в своем большинстве сориентированы на высокотемпературные процессы, ведущие к денатурации белка, разрушению незаменимых аминокислот, развитию остаточной радикальной реакции в водной среде, утрате витаминов.

4. Наиболее перспективной при обработке зерна пшеницы, сои и подсолнечных масел представляется щадящая низкотемпературная обработка. Она обеспечивает сохранность полезных составляющих с достижением достаточно высоких качественных показателей обрабатываемого продукта путем использования ультразвуковых кумулятивных микропотоков.

5. На основании вышеизложенного выдвинута **научная гипотеза** о возможности повышения эффективности обработки продукции растениеводства ультразвуковой интенсификацией процессов, обеспечивающей низкотемпературную активацию массообменных процессов и сохранность полезных составляющих обрабатываемых продуктов. Этим целям наиболее полно отвечает использование ультразвуковых кумулятивных направленных пульсирующих микротечений, значительно повышающих движущую силу массопередачи.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ЗЕРНОВЫХ, ЗЕРНОБОБОВЫХ КУЛЬТУР И ФИЛЬТРАЦИИ НЕРАФИНИРОВАННЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

Биологическая особенность продукции растениеводства обусловливает необходимость воздействия на ее структурное состояние, протекающего на наноуровне. При этом в зависимости от обрабатываемого материала ставят разные задачи:

- при переработке зерна сои в корма и продукты питания необходимо извлечь антипитательные вещества;
- при подготовке зерна к простому помолу – очистить оболочку от минеральных загрязнений, зараженности микроорганизмами и увлажнить его структуру до нормированного состояния;
- направленно воздействовать на растительное масло при адсорбционной фильтрации с целью выделения и выноса мелкодисперсных загрязнений.

При технологическом воздействии на структуру обрабатываемого материала действенны массообменные процессы, протекающие за счет использования внутренней энергетической способности гидромеханических, механических и теплообменных процессов. Возникновение и развитие движущих сил, воздействующих на массообменные процессы, обеспечиваются многими факторами внешнего воздействия на потоки жидкости, являющейся растворителем в процессах экстрагирования. Они порождаются от механических, акустических, электрических, магнитных, тепловых и прочих воздействий. При этом по своим энергетическим воздействиям и последующим биологическим результатам наиболее близки друг другу акустические и механические. Форма их воздействия и возможная результативность приведены в таблице 2.1.

Воздействие акустических волн, порождаемых ультразвуковыми колебательными движениям, движущую силу которой характеризует акустическое число Маха, рассчитанное по формуле (1.1), обеспечивается прежде всего локальным изменением скорости среды.

Таблица 2.1 – **Характеристика основных энергетических акустических и механических воздействий**

Вид воздействий	Факторы воздействия	Физико-механические эффекты	Результаты воздействий
Акустические	Упругие и квазиупругие колебания жидкости	Акустические волны, акустическая турбулентность, кавитация, кумулятивный эффект, резонанс, расклинивающее давление, автоколебания, капиллярный эффект	Пульсации давления, кумулятивный удар, изменение физико-химических свойств, активация, трансформация акустической энергии в механическую, сонолиз
Механические	Удар, сдвиг, растяжение, вибрация, формирование потоков с определенными траекторией, скоростью и ускорением	Гидроудар, турбулентность, эффект Кармана, трибоэффект, автоколебания, накопление дефектов структуры, концентрация напряжений	Пульсация давления и скорости потоков жидкости, активация, трансформация кинетической энергии в потенциальную и другую

При резком локальном ускорении движения жидкости, создаваемом каждым очередным колебательным воздействием, возникают точки с низким давлением, где мгновенно образуются кавитационные пузырьки, которые при понижении скорости продвижения потока схлопываются. Этот процесс порождает высокие местные давления, достигающие 200 МПа, обладающие высокой разрушающей способностью по отношению к структуре контактирующих веществ, к которым относятся клетки белка-ингибитора, минеральные загрязнители, колонии микроорганизмов. Механизм этого процесса обеспечивается тем, что при ультразвуковом воздействии с обоснованными параметрами амплитуды, частоты, периода, длины волны и интенсивности колебательных движений разрушаются стенки клеток, тем самым обеспечивается легкий доступ к их содержимому. Выделяемое из клетки вещество переходит в растворимое и выносится обрабатываемым пульсирующим потоком жидкости. Наряду с этим установлено, что ультразвуковые пульсирующие микропотоки обладают высокой степенью контролируемости разрушительной способности,

что является хорошим препятствием к возможному сопутствующему извлечению нужных внутриклеточных веществ – витаминов, жиров и микроэлементов.

Очень близкими к акустическим являются механические воздействия. В их основе лежат процессы разделения частиц путем приложения внешних сил, превосходящих силы межмолекулярного сцепления.

Массообменные процессы способствуют более эффективной обработке, а в некоторых случаях и значительной активации массопередачи с соответствующим повышением производственных и качественных показателей вырабатываемой продукции. Процесс экстрагирования, основанный на массообменной реакции, направлен на извлечение из твердого или жидкого сложного по своему составу вещества одного или нескольких компонентов растворителем различного состава.

Исходя из рассматриваемых объектов экстрагирования, к дальнейшему теоретическому исследованию по виду фаз принимались:

- твердое тело – жидкость, когда из твердого тела осуществляется переход ингибиторов трипсина в воду с последующим их выносом из обрабатываемого продукта;
- твердое тело – жидкость, когда мелкодисперсная взвесь загрязнений в нерафинированном растительном масле подвергается коагуляции с последующим выносом из масла;
- твердое тело – жидкость, когда осуществляются очистка оболочки зерна и насыщение его структуры влагой перед размолом.

В соответствии с представленными в первой главе доводами исследовали акустические методы, основанные на использовании движущих сил массопередачи, образованных ультразвуковыми колебательными импульсами.

Научно-практическая приоритетность данного направления при обработке продукции растениеводства мало изучена. Положительные свойства низкотемпературных акустических колебаний, не оказывающих вредных воздействий на окружающую среду, обрабатываемое сырье и потребителя, имеют

существенное практическое значение. Они способствуют повышению качества обработки, ресурсосбережению и контролируемому управлению процессом обработки за счет создания модульных технических средств и систем с различной производительностью.

Программа теоретического обоснования технологий преследовала цель изучения закономерностей взаимодействия колебательных движений и кумулятивных микропотоков в жидкости и в обрабатываемом растениеводческом сырье с последующим обоснованием технологий и технических средств.

При исследованиях рассматривали технологические процессы, обеспечивающие:

• подготовку зерна к простому помолу при производстве обойной муки, заключающуюся в мойке и очистке оболочки зерна от минеральных отложений и микроорганизмов и его увлажнении до кондиционных помольных показателей с помощью ультразвука;

• мойку и очистку зерна сои от антипитательных веществ – ингибитора трипсина и уреазы, снижающих качественные показатели корма и ведущих к непродуктивному перерасходу продуктов переработки, отрицательно воздействующих на пищеварительные тракты животного и человека, ультразвуковой интенсификацией процесса;

• очистку нерафинированных растительных масел от продуктов окисления при их производстве и хранении, необходимую для обеспечения нормативных физико-химических и органолептических показателей с повышением сроков хранения за счет снижения кислотного, перекисного, анизидинового и фосфорных чисел адсорбцией с ультразвуковой интенсификацией процесса.

2.1 Закономерности, обусловливающие повышение эффективности очистки и экстрагирования продукции растениеводства

При экстрагировании и экстракции происходят процессы извлечения из твердых веществ макромолекулы белка антипитательных ингибиторов фер-

мента трипсина и уреазы, продуктов окисления в нерафинированном подсолнечном масле и удаления минеральных загрязнений, следов зараженности и отволаживания зерна при его подготовке к помолу.

Агрегатное состояние фаз у обрабатываемого сырья подразделяется на «твердое тело – жидкость» для обработки зерновых и зернобобовых, и «жидкость – газ» при обработке нерафинированного растительного масла с кислотными включениями. Данные системы отличаются кинетикой массопередачи, и процессы экстрагирования описываются следующими стадиями:

- проникновение растворителя в поры частиц обрабатываемого твердого тела (зерна);
- растворение и отрыв с обрабатываемой поверхности целевого компонента (ингибитора трипсина и уреазы для зернобобовых и минеральных загрязнений и очагов зараженности для зерновых);
- перенос экстрагируемого вещества внутри частицы сырья к поверхности разделения фаз и проникновение в поры и капилляры зерна для его увлажнения;
- перенос экстрагируемого вещества в жидкой фазе от поверхности раздела и насыщения зерна влагой для достижения нормативной влажности;
- создание направления переноса мелкодисперсных взвешенных частиц загрязнений и продуктов окисления нерафинированных растительных масел в адсорбент, отделение их от фильтрационной поверхности и перенос в емкость сборника.

При этом в статичном состоянии процесс массопередачи протекает по замедленному варианту, когда каждая очередная зона пор и капилляр начинают омываться только при создании направления пути предыдущим омыванием. Весь процесс инерционен и очень длителен. Например, увлажнение зерна пшеницы до 14,5–17,0 % традиционно осуществляется в специальных емкостях и продолжается он от 8 до 48 ч в зависимости от исходной влажности. Это нетехнологично и затратно.

Очевидно, что процесс массопередачи следует ускорять, и это делается давно, например, с использованием тепла, растворяющих контрагентов, разнообразных физических, электрофизических и химических методов обработки. Очевидно, также и то, что всем известным методам присущи определенные достоинства и недостатки, которые следует учитывать при разработке новых технологий. Современное состояние вопроса технологического воздействия на продукцию растениеводства таково, что обработку производят в условиях одновременного взаимодействия нескольких операций технологических процессов, обеспечивающих ресурсосбережение, качество, производительность, высокую технологическую культуру и возможность автоматизации производства. В этой связи в данной главе рассмотрены вопросы теоретического и прикладного взаимодействия гидродинамических и колебательных диффузионных сил массопередачи и возможности улучшения параметров технологического воздействия на продукцию растениеводства.

2.2 Анализ и обоснование взаимодействия гидродинамических и колебательных процессов при технологическом воздействии на продукцию растениеводства

Теоретические исследования закономерностей процессов при технологических воздействиях и хранении продуктов растениеводства обусловлены необходимостью изучения и установления рациональных процессовых явлений, обеспечивающих высокое качество сырья из продуктов растениеводства для пищевой и кормовой отраслей АПК. Детально исследованные и научно обоснованные технологические процессы, основанные на высокой степени ресурсосбережения (как сырьевого, так и энергетического), значительное сокращение времени обработки, небольшие габаритные размеры оборудования с возможностью приспосабливаться к сельскохозяйственному производству с малым и средним объемами позволит поднять на новый уровень перерабатывающую и кормовую отрасли.

Наука гидродинамического воздействия жидкости на материалы опирается прежде всего на использование свойств, заложенных в них природой. Законы массопередачи и технологии, основанные на них, используют отличную природную возможность жидкости проникать во все пустоты и капилляры материала, изменять его структурно-механические и биологические свойства. Этот процесс в той или иной степени вечен и во многом зависит от внешних факторов, к которым можно отнести состояние окружающей среды, твердость и прочность структуры обрабатываемого материала, способность насыщения влагой, ее агрессивность на начальной стадии экстрагирования и экстракции. Наблюдается некоторое раздвоение процессовых явлений и, соответственно, массопередачи. Проникновение жидкости и растворение продукта экстрагирования протекает 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, протекающему в порах и капиллярах твердого тела. При экстрагировании выводимые вещества в жидкости переносятся за счет молекулярной диффузии. Путь диффузии в твердом теле вырастает по причине относительно большой длины капилляров и их извилистости, что ведет к усилению трения частиц выводимого вещества о стенки пор при продвижении.

Все эти процессы взаимосвязаны, и их изучение играет существенную роль в оценке ситуационных явлений при обосновании и выборе теоретических, экспериментальных и технологических решений при технологическом взаимодействии и хранении продуктов растениеводства.

2.2.1 Теоретическое обоснование закономерностей массообменных процессов при определении конструктивных параметров установки для экстрагирования зерна сои и увлажнения зерна пшеницы

Распространение акустической волны, порожденной ультразвуковыми колебаниями, 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. В зависимости от амплитуды акустических колебаний возможно создание волн различной направленности, целесообразных для каждого частного случая направления их распространения. В нашем случае, когда ультразвук используют в жидких средах, в воде и растительном масле, имеют место продольные волны, подчиняемые синусоидальному закону гармонических колебаний [194].

Смещение частицы S обрабатываемой среды от положения равновесия определяется условием:

$$S = A\sin(\omega t - kx + \varphi_0), \tag{2.1}$$

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 – начальная фаза, рад.

Смещение частиц от положения равновесия при статичном состоянии обрабатываемой среды протекает в крайне замедленном состоянии, поэтому и массообменные процессы при увлажнении и инактивации зерна сои от антипитательных веществ характеризуются значительными временными затратами. Для их ускорения, как было указано в первой главе, используют различные варианты воздействия. В нашем случае интенсификация процесса обеспечивается

за счет акустических колебаний определенных частот и амплитуды, вырабатываемых источниками ультразвука. Они создают искусственно управляемые пульсирующие микропотоки, активно продвигаемые вглубь обрабатываемого зерна и интенсифицирующие процесс массоперередачи.

Массообменные процессы, на которых основаны технологии экстрагирования и экстракции, используют для предварительной или окончательной очистки сырья или готовой продукции. Вещества, выводимые из растительного сырья, находятся в трех агрегатных состояниях: газообразном, жидком и твердом.

В соответствии с целью диссертационной работы массообменные процессы изучали:

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

Скорость массообменного процесса, согласно исследованиями Л. Д. Ландау [306] и М. Х. Кишиневского [307], зависит от скорости движения жидкости в пограничном слое. При этом учитывают не только ламинарное движение, но и трение, возникающее в движущихся относительно друг друга фазах, что приводит к образованию межфазовой турбулентности. На этом основании считают, что в каждой фазе вещество переносится под взаимодействием турбулентных и молекулярных диффузий.

Диффузионные явления при экстрагировании преследуют цели: проникновения растворителя в поры частиц растительного материала; растворения целевого компонента (экстрагируемого вещества); переноса экстрагируемого вещества внутри частицы растительного материала к поверхности раздела фаз; переноса экстрагируемого вещества в жидкой фазе от поверхности раздела фаз и распределения экстрагента в массе.

В качестве растворителя (экстрагента) принята вода, обладающая легкой подвижностью. В соответствии с закономерностями массопередачи на первой стадии вода должна проникнуть внутрь ткани, но это протекает с ничтожно малой скоростью диффузии из-за малого размера пор. Следовательно, процесс характеризуется слабоактивной молекулярной диффузией, в классическом варианте описываемой уравнением Фика, основанном на том, что процессы диффузии протекают под действием гидродинамических сил на однородную обрабатываемую среду, образованных градиентом плотности диффундирующей жидкости. Коэффициент диффузии (D) зависит от температуры (T) и структуры зерна, и его можно выразить через уравнение Аррениуса:

$$D = D_0 \, exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \quad (2.2)$$

где D_0 — предэкспоненциальный множитель (постоянная),

E_a — энергия активации диффузии (Дж/моль),

R — универсальная газовая постоянная (8,314),

T — температура в Кельвинах (K).

Общая формула для определения влажности с учетом коэффициента диффузии:

С учетом коэффициента диффузии (D) и других параметров (время t, температура T, частота ультразвука f, интенсивность ультразвука I), формула для определения качественных показателей зерна ($К_з$) может быть записана следующим образом:

$$К_з = К_{зо} + k \cdot t \cdot T \cdot f \cdot I \cdot D_0 \, exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right), \quad (2.3)$$

где:

$К_{зо}$ — начальный показатель качества зерна;

k — эмпирический коэффициент, зависящий от свойств зерна и условий обработки;

t — время обработки, с;

T — температура обработки, °C;

f — частота ультразвуковых колебаний, кГц;

I — интенсивность ультразвука, Вт/см²;

D — коэффициент диффузии, м²/с (по уравнению Аррениуса).

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

Обработка суммарной площади поверхностей и пор цельного зерна значительно затрудняется по причине низкой доступности объектов омывания. В этой связи возникает необходимость измельчения зерна до определенного размольного состояния, что увеличит омываемую площадь, уменьшит длину и извилистость капилляр, устранит их тупиковость.

При повышении эффективности диффузионного процесса при экстракции особая роль должна быть отведена обеспечению доступности омыванию каждой отдельно взятой обрабатываемой частицы. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что на гидродинамические условия при экстракции влияют не только форма и размеры обрабатываемых частиц, но и конструктивные особенности установки. В ней в обязательном порядке должны быть учтены:

- незначительная толщина слоя обрабатываемой суспензии;
- определенная длительность обработки суспензии;
- возможность постоянного перемешивания суспензии с условием доступа ультразвуковой обработки ко всем поверхностям обрабатываемых частиц.

Таким образом, диффузионное сопротивление переносу выводимого вещества зависит от коэффициента массопроводности, который в значительной степени воздействует на коэффициент молекулярной диффузии. Механизм переноса вещества в жидкой фазе, в потоке растворителя, к границе раздела фаз осуществляется за счет конвективной диффузии с последующим переходом ее в молекулярную, объединяющую в себе большое количество молекул частей среды и, соответственно, ускоряющую перенос частиц.

На скорость конвективной диффузии воздействуют физические свойства среды и прежде всего ее концентрация и скорость движения. Все эти процессовые явления, описываемые закономерностями переноса диффундирующего

вещества между поверхностью твердого проницаемого вещества или поверхностью разделительных фаз и ядром потока жидкой фазы, обеспечиваются проникновением и перемещением микрочастиц жидкой фазы. Массоперенос характеризуется самопроизвольным необратимым переносом компонента ингибитора трипсина в направлении уменьшения его химического потенциала.

Процесс протекает за счет различных потенциалов массопереноса $П_1$ и $П_2$ (рисунок 2.1) с одновременно протекающей молекулярной диффузией между частицами. В целом этот перенос характеризуется диффузией веществ между поверхностью твердого тела и движущейся жидкостью [208].

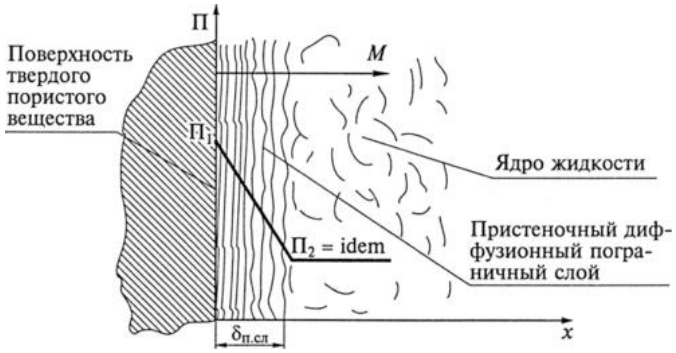


Рисунок 2.1 – Схема массоотдачи при переносе вещества

Обозначенная кинетика описывается законом массопередачи Щукарева – Дальтона:

$$dM = \beta(П_1 - П_2)dF d\tau, \qquad (2.4)$$

где M – количество вещества, диффундирующего через слой за время τ, кг/с;

β – коэффициент массопередачи, кг/(м^2 · с); $\beta = \dfrac{M}{П_1 - П_2} F$;

$П_1$ и $П_2$ – потенциалы массопереноса, характеризующие движущие силы среды на границе раздела фаз и в ядре потока соответственно;

F – площадь поверхности раздела фаз при разности концентраций между $П_1$ и $П_2$, м^2;

τ – время протекания процесса массопередачи, с.

Таким образом, закон массопередачи (2.4) обусловливает пропорциональную зависимость количества вещества, переносимого из ядра потока к границе

раздела фаз, от движущей силы процесса ($П_1 – П_2$), площади поверхности фаз и времени процесса.

Из выражения (2.4) следует, что интенсивность процесса массопереноса m (кг/м^2 · с) зависит от коэффициента диффузии, учитывающего движущие силы среды:

$$m = \frac{M}{F} = \beta(П_1 - П_2). \quad (2.5)$$

Идентичны и закономерности изменения M от разности объемов концентраций ($C_1 – C_2$):

$$M = \beta_c \left(C_1 - C_2\right) F, \quad (2.6)$$

где β_c – коэффициент массопередачи, выраженный через разность концентрации массоотдачи, м/с.

Коэффициент массоотдачи является кинетической характеристикой процесса и зависит от модели пограничного слоя с потоком жидкости. В ядре жидкости потенциал массопереноса вещества неизменен ($П_2$ = idem), а перепад концентраций $П_1 – П_2$ происходит в диффузионном поле.

Уравнение процесса массопередачи основано на зависимости коэффициента массоотдачи от отличительных свойств сред, создаваемых при исследовании техпроцессов:

• от физических свойств жидкости (учитываются коэффициент молекулярной диффузии D, коэффициент динамической вязкости μ, плотность жидкости ρ и удельная массоёмкость жидкости C_m):

$$\beta = f\,(D;\ \mu;\ \rho;\ C_m); \quad (2.7)$$

• от параметров процесса, устанавливаемых температурой t, потенциалом массопереноса вещества П, скоростью ω и режимом течения жидкости Re:

$$\beta = f\,(t;\ П;\ \omega;\ \mathrm{Re}); \quad (2.8)$$

• от формы и размеров твердого проницаемого тела, зависящих от формы Ф и геометрических параметров обрабатываемой поверхности:

$$\beta = f\,(\Phi;\ l_1/l_2). \qquad (2.9)$$

Отсюда общая результирующая назначения коэффициента массоотдачи:

$$\beta = f\,(D;\ \mu;\ \rho;\ C_m;\ \omega;\ t;\ \Pi;\ \mathrm{Re};\ \Phi;\ l_1/l_2). \qquad (2.10)$$

Представленная на рисунке 2.2 схема в дифференциальной форме позволяет судить об основных управляемых параметрах, воздействующих на процесс массопередачи. Это прежде всего коэффициент диффузии *D*, зависящий от материала, в котором диффундирует выводимое вещество (в нашем случае это ингибитор трипсина и уреаза). Величина этого коэффициента является параметром, обусловливающим технологический процесс.

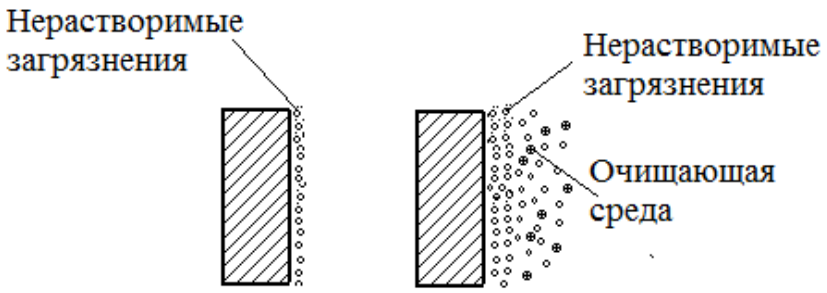


Рисунок 2.2 – Схема очистки (массопередачи)

Воздействие на коэффициент диффузии оказывает состояние обрабатываемого зерна – температура и концентрация рабочего раствора, создающие предпосылки для снижения диффузионного сопротивления и, соответственно, интенсификации процесса обработки, что, повлечет за собой повышение количества выводимого вещества в установленное время.

Скорость потока рабочего раствора в капиллярах твердого тела при протекании процесса в диффузионной области зависит от режима движения рабочей жидкости. Таким образом, управлением режимами движения сред можно устанавливать рациональную для каждого частного случая скорость потока. Гидродинамические характеристики потока рабочей жидкости в сплошной фазе задействованы в кинетике обмена целевым компонентом между поверхностью твердой фазы и обтекающим ее потоком рабочей жидкости. На этом основании следует, что, управляя параметрами плотности и вязкости рабочей

жидкости, можно также воздействовать на скорость массоотдачи. В исследованиях особое внимание уделяли созданию гидродинамических условий, при которых обеспечивается закон сохранения количества импульсного движения для единицы объема перемещающейся жидкости Навье – Стокса [218].

Проникновение рабочей жидкости сквозь поры и капилляры (в нашем случае зерна и бобов) зависит от структуры клеточных мембран, различающихся размерами пор (внутри фибрилл – до 1 нм, в промежутках между фибриллами – до 10 нм). Наличие в зерновках большого количества пор и капилляров позволяет использовать процесс экстрагирования – удаления белков-ингибиторов, уреазы, продуктов окисления и насыщать твердое тело жидкостью. Скорость массопередачи в исследуемых материалах будет зависеть от размеров капилляров, их извилистости и поставленных целей экстрагирования и экстракции.

Для интенсификации экстрагирования и экстракции особое значение приобретает обеспечение режима конвективной диффузии. Свободная конвекция представляет собой элементарный процесс, основанный на эффекте перемещения вещества за счет различия в плотности, возникающего по причине разности концентрации или температур в различных частях жидкой среды. Данный процесс отличается замедленной диффузией жидкости и, следовательно, невысокой степенью массопередачи. Он длителен и малопроизводителен и поэтому для производственных целей не эффективен. Наиболее предпочтительным является метод вынужденной конвекции.

Используемые механические способы перемешивания системы ускоряют процесс, но и они продолжительны по времени. Наиболее привлекательным, по нашему мнению, является использование вынужденной конвекции за счет сочетания перемешивания, нагрева и дополнительного воздействия импульсного акустического колебания среды, создающего направленные пульсирующие кавитационные микропотоки, ускоряющие процесс проникновения рабочей среды в поры и капилляры обрабатываемого материала. В первом случае это следует применять при обработке зерна сои для инактивации ингибиторов

трипсина и уреазы, во втором – при обработке зерна пшеницы для его подготовки к помолу и очистки оболочки от загрязнений, следов зараженности и для увлажнения, в третьем – при очистке нерафинированных растительных масел от первичных и вторичных продуктов окисления. Основная роль при этом принадлежит эффекту кавитационной эрозии, возникающему при быстром продвижении жидкости относительно обрабатываемой поверхности по причине образования и схлопывания пузырьков пара вблизи неё. Механизм использования этого явления при очистке поверхности зерна основан на воздействии длительных кавитаций, ведущих к снижению прочностных показателей самих загрязнений в зоне их сцепления с оболочкой, их отслаиванию и выносу в обрабатываемую жидкость. Кумулятивное акустическое воздействие характеризуется высокой разрушающей способностью значительных мгновенных гидростатических давлений, ведущих к отрыву прилипших минеральных загрязнений и микроорганизмов от оболочки зерна, а также продвижению и отрыву на границе, особенно в зоне не достижимых для механических способов очистки концентраций загрязнений, находящихся в бородке и бороздке.

Проникновение жидкости огибающими кумулятивными микропотоками не может быть ограничено препятствиями, связанными с биологическим строением зерна, они обладают исключительными проникающими свойствами. Уязвимость загрязнений, состоящих из нерастворенных частиц, прочно связанных с оболочкой зерна силами адгезии, делает возможным их отделение от поверхности. Этот процесс осуществляется путем «бомбардировки» очищаемой среды кавитационными схлопывающимися пузырьками (см. рисунок 2.2).

2.2.2 Гидродинамические закономерности массообменных процессов

Зернобобовые и зерновые культуры по своему биологическому происхождению являются объектами с регулярным структурным строением, в которых система капилляр имеет изначально повышенную проводимость. Следовательно, кинетика извлечения или насыщения жидкости зависит от совокупности капилляров. На этом основании проявляется фактор неоднородности, неравнозначности и неодновременности качественных и временных показателей операции экстрагирования в отношении зерна сои. В капиллярах малой длины процесс извлечения протекает быстрее, чем в длинных. Данное обстоятельство диктует целесообразность предварительного измельчения зерен сои до крупности, степень которой необходимо определять экспериментальным путем. Это повысит производительность технологической операции экстрагирования и качество очистки зерна сои [195, 196].

Зерновые культуры при его подготовке к помолу подвергают увлажнению до достижения нормативных размольных показателей 14,5–17,0 % в зависимости от типа, стекловидности и назначения помола. В технологическом плане процесс увлажнения прост, его осуществляют в статичном режиме в специальных емкостях, в которых в зерно добавляют воду. Процесс насыщения зерна влагой зависит от начальных показателей его влажности, его продолжительность составляет 8–48 ч. В технологическом и производственном плане это неэффективно и требует интенсификации.

Технологический процесс экстрагирования характеризуется концентрацией пористого тела обрабатываемого продукта, изменяющейся в пространстве и времени. Вещества, извлекаемые из зерна сои, являются твердыми и растворимыми. В данном случае процесс экстрагирования связан с диффузией ингибитора. Движущая жидкость непосредственно контактирует с растворяющимся веществом на протяжении всего процесса обработки.

Растительная ткань имеет общее строение, структурно отличающееся наличием клеток [197, 198]. Последние состоят из пачек целлюлозы природного полимера с линейными макромолекулами и объединяются в фибриллы – более крупные образования, где содержатся различные вещества, в том числе и антипитательного свойства, которые необходимо удалить путем экстрагирования. При этом структурно порокапиллярное строение различно. Капилляры имеют различные радиус, длину, извилистость, обладают сквозной и тупиковой проходимостью. Данная структура затрудняет диффузионную проницаемость и проходимость растворителя [198, 199]. В этой связи при теоретических исследованиях используют понятие средней скорости течения жидкости в порокапиллярной системе, формула для расчета которой выведена Пуазейлем [196] и имеет вид:

$$\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t} = \frac{P_{\text{ж}} r^2}{8\mu l}, \tag{2.11}$$

где $\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t}$ – средняя скорость течения жидкости, зависящая от длины капилляра l в течение времени t, м/с;

$P_{\text{ж}}$ – давление в жидкости, Па;

r – радиус капилляра, м;

μ – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с.

Выражение (2.11) подтверждает возможность всех критериальных воздействий на процесс массопередачи, приведенных в выражениях (2.7), (2.8), (2.9) и (2.10). Для практического использования с целью расчета средней скорости проницаемости для гидродинамического давления жидкости принято уравнение:

$$P_{\text{ж}} = P_{\text{к}} - \rho g l \sin \beta, \tag{2.12}$$

где $P_{\text{к}}$ – капиллярное давление, Па, $P_{\text{к}} = \frac{2\sigma}{r} cos\ \theta$; σ – поверхностное натяжение, Н; θ – угол смачивания;

ρ – плотность жидкости, кг/м^3;

g – ускорение свободного падения, м/с^2;

l – длина пропитанного участка капилляра, м;

β – угол наклона капилляра, град.;

r – радиус капилляра, м.

Исходя из формулы (2.12), средняя скорость течения жидкости в порокапиллярном пространстве в условиях гидродинамического давления жидкости определяется выражением:

$$v_{\text{г}} = \frac{\text{Р}_{\text{ж}} r^2}{8\mu l} = \frac{(\text{Р}_{\text{к}} - \rho g l \sin\beta) r^2}{8\mu l}, \quad (2.13)$$

где D – коэффициент диффузии, м^2/с;

r – радиус капилляра, м;

μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с.

В случае использования дополнительных воздействий на состояние жидкости средняя скорость ее течения в порокапиллярном пространстве будет зависеть от изменения давления в жидкости, создаваемого акустическими пульсирующими микропотоками. Физически акустическое воздействие можно представить в виде плоских гармонических колебательных волн, акустическое давление $P_{\text{а}}$ в которых:

$$P_{\text{а}} = \rho\omega\text{Ac}, \quad (2.14)$$

где ρ – плотность среды, кг/м^3;

ω – циклическая частота колебаний, характеризующая число колебаний в единицу времени, рад/с, $\omega = 2\pi f$; $f = 1/T$, Гц, T – период колебаний, с;

с – скорость звука в воде, м/с, из опыта Колладона-Штурма: $\text{с} = 1402{,}5 + 5{,}04\text{Т} - 0.0581\cdot\text{Т}^2 + 0.000315\text{Т}^3$;

A – амплитуда акустических колебаний, кГц.

Тогда средняя скорость $v_{\text{а}}$ течения жидкости в порокапиллярной системе будет повышена на величину давления, создаваемого акустическими микропотоками:

$$v_{\text{а}} = \frac{(\text{Р}_{\text{ж}} + \text{Р}_{\text{а}}) r^2}{8\mu l} = \frac{[(\text{Р}_{\text{к}} - \rho g l \sin\beta) + \rho\omega\text{Ac})] r^2}{8\mu l}, \quad (2.15)$$

где μ - динамическая вязкость жидкости (воды), Па·с,

$P_к$ – капиллярное давление, Па, $P_к = \frac{2\sigma}{r} cos\ \theta$,

σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м (для воды 0,073 Н/м);

θ – угол смачивания (примем для зерна и воды 80º);

ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ($\rho_{вод}$ = 1000 кг/м^3; $\rho_{зерн}$ = 760…800 кг/м^3);

ω – цикличная частота колебаний, характеризующая число колебаний в единицу времени, Гц, ω = 2π*f*, рад/с,

g – ускорение свободного падения, м/с^2;

l – длина пропитанного участка капилляра, м,

β – угол наклона капилляра, град.;

r – радиус капилляра, м;

A – амплитуда колебательных движений жидкости, *A* = *f*(*v*; *w*; A_k), тепловых *v*, механических *w* и акустических A_k, м, $A = \sqrt{\frac{3D}{f}}$;

D - коэффициент диффузии под действием колебательных движений, образованных различными источниками, $D = D_0 exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right)$;

f– частота колебательных движений жидкости, Гц.

D_0 — предэкспоненциальный множитель (постоянная, $2{,}414 \cdot 10^{-5}$),

Ea — энергия активации диффузии, Дж/моль;

R — универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К.

Исходя из выражений (2.14) и (2.15), давление в жидкости и, соответственно, средние скорости ее течения 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 продвижения в порокапиллярном пространстве. При этом следует отметить инерционное воздействие каждого последующего микропотока проталкиваемой жидкости на предыдущий. Выводим зависимость для определения качественных показателей зерна следующего вида:

$$К_з = К_{зо} + \psi \cdot v_a \cdot t, \quad (2.16)$$

где v_a – средняя скорость (акустическая скорость) течения жидкости в порокапиллярной системе, м/с,

Ψ – эмпирический коэффициент влияния акустической скорости течения жидкости в порокапиллярной системе при воздействии ультразвука, 1/м.

Диффузионный процесс переноса ингибиторов трипсина и уреазы характеризуется концентрацией в клетке белка-ингибитора, его выделение можно описать уравнением градиента концентрации:

$$grad\ c = \frac{\partial c}{\partial n}, \quad (2.17)$$

где c – поле концентраций, описывается функциональной зависимостью от координат объема пор белка-ингибитора трипсина и времени, $c = f(x; y; z; t)$;

n – расстояние по нормали к концентрационной поверхности.

Показатель поля концентраций, входящий в параметры закона Фика, представлен в виде дифференциального уравнения диффузии для конвективной диффузии, имеющей место для нашего случая, важной компонентой которого является установленный ранее коэффициент диффузии D:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (v\ \mathrm{grad})c = D\Delta^2 c = \frac{A^2 f}{3q_D} v^2 c, \quad (2.18)$$

где v – вектор скорости;

Δ – оператор Лапласа.

Выражение (2.16) подтверждает возможность активного воздействия акустических потоков на поле концентраций при конвективной диффузии, которые непосредственно зависят от амплитуды и частоты акустических колебательных движений.

При извлечении веществ из твердой белковой пористой фазы происходит непрерывное увеличение объема капиллярной системы, заполненной раствором извлекаемого вещества. При этом повышаются плотность оттока рабочей

жидкости и давление в ней. За счет этого на всех этапах обработки увеличивается скорость продвижения жидкости к границам раздела фаз. В дифференциальной форме это можно записать в виде:

$$\frac{\partial c}{\partial n} = D\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{A^2 f}{3q_D}\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \qquad (2.19)$$

Выражение (2.17) объясняет кинетику продвижения жидкости в порокапиллярном пространстве структурных составляющих зерна. Очевидно, что для повышения качества и интенсификации процесса удаления ингибитора трипсина и уреазы необходимы ускорение диффузии жидкости и приложение дополнительных движущих сил для растворения извлекаемых веществ. Данная гипотеза также хорошо согласуется с условием, характеризующим связь между плотностью растворителя и установившейся его концентрацией:

$$\rho = \rho_0 + \alpha c, \qquad (2.20)$$

где ρ_0 – плотность растворителя, кг/м^3;

α – опытный коэффициент, характеризующий среднюю концентрацию растворителя в порокапиллярном пространстве обрабатываемого зерна сои.

Из выражения (2.19) следует, что наличие растворителя и его концентрация в воде будут играть существенную роль в интенсификации процесса экстрагирования. В дальнейших исследованиях необходимо уделить внимание процессам инициирования и развития свободной окислительной радикальной реакции, протекающей при физическом воздействии на растительный материал.

2.2.3 Повышение интенсивности массообменных процессов направленными микропотоками

Кинетику массообменных процессов при технологическом воздействии на продукцию растениеводства изучали с позиций экстрагирования ферментов ингибитора белка зерна сои, увлажнения зерна пшеницы при его подготовке к помолу и адсорбции продуктов окисления в растительном масле [200–204]. При этом установлены низкие показатели технологичности применяемых технологий относительно производительности и качества обработки.

Современные исследования в области использования ультразвука и многогранность возможностей ультразвуковых акустических колебаний предопределили сферу технологических воздействий при обработке продуктов растениеводства. Ускорение процессов обработки путем ультразвуковой интенсификации вызывает особый научный интерес и имеет производственную значимость.

Возможность ускорения процессов массопереноса акустическими ультразвуковыми колебаниями установлена многочисленными исследованиями. Весомый вклад в развитие науки в направлении акустической диффузии с целью ускорения процессов массопереноса при обработке различных материалов внесли зарубежные и отечественные ученые Х. Френцель, К. Гинзбург, Х. Шульцесс, Ф. Б. Баумгарт [205], установившие возможность увеличения скорости диффузии на 70–100 % при прохождении жидкости сквозь пористую структуру.

Такие исследователи, как Г. Томас и Г. Тарноччи установили более чем двукратное увеличение скорости диффузии при мембранном фильтровании. Существенное повышение скорости диффузии при сорбционных процессах отмечали М. Е. Архангельский [206], А. М. Гинстлинг, А. А. Барам [207] и др.

Значительный научный интерес представляют данные Г. А. Кардашева [208], где основное внимание уделено изучению тепло-, массообменных процессов, основанных на использовании акустических колебаний. Общим дости-

жением этих исследований явилось обоснование процессов диффузии, интенсифицированных упругими акустическими колебаниями. Установлено, что при рассмотрении однородной среды диффузию можно ускорить, увеличивая в одном случае градиент плотности диффундирующего вещества, а в другом – коэффициент диффузии колебательных воздействий. Таким образом, оба эти процесса можно рассматривать как достаточно схожие гидродинамические явления.

Исходя из анализа очевидно, что модуляции тепловых и акустических колебаний физически идентичны и на практике дополняют друг друга, увеличивая коэффициент диффузии и ускоряя процесс диффузии жидкости в порокапиллярном пространстве.

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 наращиваются и схлопываются под действием кавитационных явлений.

Прочностные свойства реальных жидкостей из-за появления в них зародышей кавитации снижаются. В связи с этом 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 создание резонансных полостей, создающих амплитуду пульсаций, воздействующих на жидкость более активно в диапазоне низких частот ультразвуковых колебаний.

Рассмотренное явление вызывает усиление диффузии, объясняемое тем, что в связи с неоднородностью ультразвукового поля пузырьки поступательно передвигаются в виде пульсирующих микротечений, образуемых акустическими потоками и схлопыванием пузырьков. Вследствие этого внутреннего

взрыва кавитационных пузырьков возникают значительные гидродинамические силы сдвига, вызывающие деструкцию обрабатываемого материала. Эти явления кавитации создают 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 была основана технологическая схема использования акустических микропотоков для разрыва химических макромолекул фермента ингибитора белка зерна сои, эрозии поверхности твердых тел и насыщения порокапиллярного пространства зерна при его очистке и увлажнении, для 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 описанным, поэтому они действенны и при инактивации патогенной микрофлоры, блокируя ее ферментную структуру и нарушая метаболизм, приостанавливая рост микрофлоры и сохраняя высокое качество продукции растениеводства.

В технологическом плане представляет большой научно-практический интерес возможность использования процесса внутреннего трения в жидкости при продвижении акустических микротечений. Процессы внутреннего трения, возбуждаемые ультразвуковыми микротечениями и схлопываниями пузырьков, сопровождаются повышением температуры жидкости до 60 °С и подъемом давления в ней до 200 МПа [44, 209, 210]. Это, во-первых, положительно воздействует на градиент давления и, во-вторых, создает условия для возбуждения в пузырьках свободной радикальной реакции и, соответственно, появления свободных водородных и гидроксильных радикалов [271]:

$$H_2O \rightarrow H + OH. \quad (2.21)$$

Возбужденные радикалы диффундируют в объеме жидкости и вступают в реакции с растворяемыми веществами, образуя при этом пероксид водорода:

$$OH + OH \rightarrow H_2O_2. \quad (2.22)$$

Пероксид водорода имеет существенное значение, так как является активным инициатором окислительной реакции при растворении ингибитора белка зерна сои и оказывает ускоряющее воздействие на его вынос. На практике при инактивации ингибитора для повышения эффективности процесса и качества инактивации используют 12%-й раствор пероксида водорода в воде.

Таким образом, ультразвуковые акустические микротечения воздействуют на скорость образования свободных водородных и гидроксильных радикалов H и OH:

$$RH + OH \rightarrow R + H_2O \quad (2.23)$$

и при продолжении развития цепи вызывают реакцию:

$$R + O_2 \rightarrow RO_2; H + O_2 \rightarrow HO_2 \quad (2.24)$$

с образованием органического радикала ROOH:

$$RO_2 + RH \rightarrow ROOH + R; HO_2 + RH \rightarrow H_2O_2 + R. \quad (2.25)$$

Данное обстоятельство обусловливает возможность сокращения вводимого пероксида водорода при создании раствора для обработки зерна сои, а в некоторых случаях и отказ от его использования как дополнительного материала за счет его диссоциации кавитационными акустическими микропотоками.

В случае очистки оболочки зерна от загрязнений кавитационные пузырьки продвигаются поступательно. При их схлопывании наблюдается сжатие в парогазовой среде, порождающее в жидкости зоны повышенного давления и ударные волны. Это явление вызывает в обрабатываемой суспензии интенсивные микропотоки и ударные волны, способные перемешивать слои

жидкости и разрушать на поверхности зерна твердые инородные тела, граничащие с кавитирующей жидкостью.

Кавитационные пузырьки, образованные в акустическом поле, подчинены закономерности, когда изменение их размеров зависит от изменения периода давления в жидкости T и периода собственных колебаний пузырька τ [211]. Быстро расширяясь, он схлопывается, это происходит при достаточно большой амплитуде звукового давления. На эффективность очищаемого воздействия кавитационного пузырька влияют прежде всего частота и интенсивность ультразвуковых колебаний. Исходя из литературных источников и данных предварительных исследований установлен рациональный интервал параметров, в дальнейшем подтвержденный более тщательными исследованиями, представленными в главе 4 диссертации. В рассматриваемых технологических решениях повышенная частота колебаний препятствует достижению момента схлопывания пузырька, что технологически не дает положительного решения ввиду отсутствия эффекта микроударного воздействия. Низкие частоты также нежелательны, так как ведут к появлению акустического шума и к увеличению резонансных размеров излучателя. Поэтому для экспериментальных исследований ультразвуковой очистки поверхности зерна были приняты интервал частоты ультразвука 18…35 кГц, а его интенсивность – от 0,5 до 1,5 Вт/см^2.

Данные закономерности явились основанием для исследования и назначения режимов ультразвукового поля. При исследовании учитывали изменение площади поверхности пузырька $f_{\text{р}}$, формируемого в акустических микропотоках под воздействием резонансной частоты:

$$f_{\text{р}} = \left(\frac{1}{2}\pi R\right)\left[3\gamma^{\left(p_{\text{г}}+\frac{2\delta}{R}\right)}\Big/\rho\right]^{0,5}, \qquad (2.26)$$

где R – радиус пузырька, мм;

γ – показатель адиабаты;

$p_{\text{г}}$ – давление газа в пузырьке, МПа;

δ – коэффициент поверхностного натяжения;

ρ – плотность жидкости, кг/м^3.

Выражение (2.24) объясняет следующее явление: при размерах пузырьков, не превышающих резонансных, они осуществляют только колебательные движения, но не схлопываются. Исходя из этого, устанавливается верхний предел радиуса пузырьков $R_{0_{max}}$, способных кавитировать и схлопываться:

$$\left[\rho f R_{0_{max}}\right]^2 = 3\gamma\left(p_0 - 2\delta / R_{0_{max}}\right), \quad (2.27)$$

где f – частота звуковых колебаний, Гц;

p_0 – давление в среде пузырька, МПа;

$R_{0_{max}}$ – максимальный радиус пузырька, мм.

Важным параметром для проектирования технологического процесса (а в последующем и технических средств), исходя из выражения (2.27), является кинетика процесса зарождения и развития кавитационного пузырька. Изменение его объемных параметров за долю периода звуковых колебаний с максимальными и минимальными значениями радиусов дает возможность установления момента его схлопывания, где существенная роль уделяется частоте колебательных движений в период времени Δt:

$$K = (R_{max}^3 - R_{min}^3)\Delta\tau f, \quad (2.28)$$

где K – параметр схлопывания кавитационного пузырька;

R_{max} и R_{min} – максимальный и минимальный радиусы пузырька соответственно, м;

$\Delta\tau$ – время схлопывания, с;

f – частота колебаний ультразвука, кГц.

При соприкосновении с оболочкой зерна кавитационные пузырьки схлопываются, образуя ударную волну мгновенного действия, и отрывают загрязнения от поверхности.

Интенсивность очистки зерна обусловлена потенциальной энергией жидкости E, возбуждаемой за счет схлопывания пузырька максимального радиуса:

$$E = \frac{3}{4}\pi R_{\max}^3 P_{ж}, \tag{2.29}$$

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

$$R_{\max} = \frac{0{,}4}{f}\left(1 - \frac{P_{ст}}{P_a}\right)\sqrt{\frac{P_a}{\rho}}, \tag{2.30}$$

где $P_{ст}$ – статическое давление жидкости, МПа;

P_a – акустическое давление жидкости, МПа;

ρ – плотность жидкости, кг/м^3.

Давление, воздействующее на жидкость от акустического поля, физически характеризуется следующими параметрами:

$$P_a = c\omega A\rho = \sqrt{2\rho c I}, \tag{2.31}$$

где c – скорость звука в жидкости, м/с;

A – амплитуда акустических колебаний, кГц;

I – интенсивность ультразвука, Вт/м^2.

Таким образом, установлены основополагающие процессовые заключения, обусловливающие последующие технологические и технические решения:

- потенциальная энергия жидкости, определяющая зарождение и развитие кавитационных пузырьков, а следовательно, и давление в жидкости, прямо пропорциональна величине их максимального радиуса;
- величина максимального радиуса пузырька обратно пропорциональна частоте акустических колебаний.

Важным обстоятельством, характеризующим эффективность процесса очистки, является установление количественного соотношения кавитационных пузырьков, зарождаемых при ультразвуковом воздействии на обрабаты-

ваемый продукт. В этом плане существенное значение приобретает потенциальная энергия жидкостит $E_{об}$ в области, где образуются кавитационные пузырьки:

$$E_{об} = \frac{3}{4}\pi R_{max}^3 P_ж n, \tag{2.32}$$

где n – количество кавитационных пузырьков, шт.

Из уравнения (2.30) 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 $f_2 - n_1$. Тогда с учетом того, что общая потенциальная энергия в жидкости не изменилась, можно принять:

$$\frac{3}{4}\pi\left[\frac{0,4}{f_1}\left(1-\frac{P_{ст}}{pP_{зв}}\right)\sqrt{\frac{P_{зв}}{\rho}}\right]^3 P_ж n_1 = \frac{3}{4}\pi\left[\frac{0,4}{f_2}\left(1-\frac{P_{ст}}{P_{зв}}\right)\sqrt{\frac{P_{зв}}{\rho}}\right]^3 P_ж n_2. \tag{2.33}$$

Отсюда:

$$\left[\frac{0,4}{f_1}\right]^3 n_1 P_ж = \left[\frac{0,4}{f_2}\right]^3 P_ж n_2 \text{ или } \frac{n_1}{f_1^3} = \frac{n_2}{f_2^3}. \tag{2.34}$$

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. Даже незначительное повышение частоты колебаний от 18,0 до 18,5 кГц ведет

к снижению потенциальной энергии на 8,3 %, что обусловливает необходимость снижения интенсивности процесса в целом [36, 204]. Это нашло подтверждение в ходе экспериментальных исследований.

2.3 Теоретическое исследование закономерности растворения ингибитора трипсина

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 ($\tau_1 < \tau_2 < \tau_3 < \tau_n$).

Процесс экстрагирования для одиночной частицы описывается уравнением оператора Лапласа:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D\left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{2\partial c}{r\partial \tau}\right). \qquad (2.35)$$

Правая часть дифференциального уравнения (2.35) описывает разность количества вещества, входящего в любой произвольный слой и выходящего из него, а левая часть характеризует скорость изменения количества растворенного вещества в слое.

В случае экстрагирования вещества из массы дисперсного материала концентрация извлекаемого вещества в экстрагенте C_f зависит от его количества, перешедшего из твердого материала в раствор. В общем виде это означает, что скорость растворения вещества пропорциональна разности концентраций (C' –

C_f), где C' – концентрация насыщения, и обратно пропорциональна сумме сопротивлений, состоящих из последовательных процессовых стадий: подвода растворителя из его основной массы к поверхности раздела фаз через пограничный слой; перехода вещества из твердого состояния в растворенное; отвода растворенного вещества в раствор. При обработке пористых твердых тел, к которым структурно относится зерновой материал, имеет место воздействие всех трех степеней сопротивления продвижению растворителя.

Первая стадия процесса растворения – отвод вещества от поверхности растворения при экстрагировании – не оказывает особого воздействия на общую скорость процесса. Она характерна тем, что концентрация C_f будет равна концентрации C', и массоотдача будет достаточно высокой:

$$\frac{dM}{d\tau} = \beta dF(C' - C_f), \tag{2.36}$$

где M – масса растворяемого вещества, отводимого от поверхности растворения, кг;

τ – время процесса отведения, с;

β – коэффициент массоотдачи. м/с;

F – площадь поверхности растворения, м^2;

($C' - C_f$) – движущая сила процесса (разность концентраций), кг/кг.

Обосновать условия для использования выражения (2.36) в классическом виде не представляется возможным, но использовать связанные с его показателями преимущества вполне реально.

Прежде всего необходимо обоснованно уменьшить длину капиллярного пространства и количество тупиковых капилляров, что позволит повысить скорость процесса массоотдачи. Это достижимо путем измельчения зерна. Параметры измельчения исследовали экспериментально, результаты представлены в главе 4.

Существенная роль для анализа возможности сокращения времени экстрагирования отводится второй стадии – процессу растворения выводимого

вещества при условии, что подвод растворителя к поверхности и отвод раствора с веществом отвечают условиям равновесия системы:

$$\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}\tau} = kFC_v^n, \tag{2.37}$$

где k – константа скорости растворения;

C_v^n – порядок реакции растворения по концентрации C_v растворителя у поверхности растворения.

В третьей стадии растворения анализировали схему подвода растворителя к поверхности растворения, когда сам процесс растворения протекает без заметного сопротивления на поверхности двойных связей. В данном случае существенную роль играет движущая разность концентраций. Тогда уравнение скорости растворения выводимого вещества (2.37) принимает вид:

$$\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}\tau} = \alpha\beta_\mathrm{p}FC_\mathrm{p}, \tag{2.38}$$

где α – стехиометрический коэффициент реакции растворения;

β_p – коэффициент массотдачи растворителя, м/с; обеспечивает скорость вещества, переходящего из ядра потока к поверхности раздела фаз за единицу времени;

C_p – концентрация растворителя.

При всех прочих известных величинах, из системы трех уравнений (2.36), (2.37) и (2.38) можно определить скорости растворения $\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}\tau}$, а также значения концентраций растворителя $C_{\mathrm{p.гр}}$ и целевого компонента $C_{\mathrm{гр}}$ на границе растворения.

Изменение массотдачи подчинено функциональной зависимости диффузионного критерия Нуссельта от критерия Рейнольдса:

$$\mathrm{Nu}_D = A_н\mathrm{Re}^m, \tag{2.39}$$

где $A_\mathrm{н}$ и m – аппроксимационные значения, зависящие от режима стекания частиц твердой фазы (величины Re).

Все рассмотренные физические параметры носят прикладной характер и их теоретическое исследование позволяет применять их при расширении номенклатуры перерабатываемой продукции растениеводства.

2.4 Теоретическое исследование процесса очистки фильтрационной поверхности от накопленных частиц осадка

2.4.1 Фильтрация нерафинированных подсолнечных масел от продуктов окисления

Выделение растворенных газов из жидкости осуществляется путем создания разности парциальных давлений. Известно, что под действием сил межмолекулярного взаимодействия молекулы жидкости совершают колебательные движения около положений равновесия. Амплитуда этих колебаний значительна, она ведет к отрыву молекул друг от друга, следовательно, они покидают установленные положения равновесия. В соответствии с теорией неупорядоченности жидкости время состояния положения равновесия мало и составляет всего 10^{-8} с. Таким образом, во временной функции молекула жидкости может оказаться где угодно в общем ее объеме.

Процесс инициирования и развития гидроокисей и гидроперекисей в растительном масле связан с наличием в произведенном нерафинированном масле продуктов окисления и в последующем – с развитием свободной радикальной реакции. Образуемые кислотные составляющие находятся в газообразном состоянии, и их необходимо удалить.

Процесс фильтрации газов и жидкостей основан на использовании закономерности диффузионного потока. Молекулярно-кинетической теорией газов процесс диффузии объясняется равновесным состоянием направления движения молекул в газе, т. е. число молекул, проходящих в единицу времени через единичную площадку, в любом направлении одинаково и пропорционально величине концентрации молекул в установленном объеме.

При исследованиях процессов фильтрации газов руководствовались условием различия потоков молекул, возникающего градиента концентрации, ведущего к результирующему потоку из области с большей концентрацией в область с меньшей. Хаотичный характер перехода молекул газа из одного равновесного состояния в другое сходен с жидкостным, однако имеются некоторые расхождения в закономерности.

Характер взаимодействия молекул у газов при их перемещении в свободном пробеге до столкновения друг с другом составляет несколько диаметров молекул, а тот же показатель у жидкости равен примерно длине одной молекулы. Следовательно, интенсивность движения молекулы жидкости при молекулярной диффузии, характеризующей скорость протекания диффузионного процесса в жидкостях, примерно на четыре порядка ниже, чем в газах. И для того, чтобы выделить растворенный газ из жидкости, необходимо вывести систему из равновесного состояния. Это достигается за счет конвективного переноса путем турбулентной или вихревой диффузии. В данном случае используют условие, основанное на целесообразности уменьшения толщины пограничного слоя, так как только при этом возможно повышение скорости продвижения жидкости сквозь фильтрационную поверхность.

Растворенные в растительном масле кислотные составляющие характеризуются повышенной активностью развития, их следует удалять путем фильтрации. Наиболее предпочтительным нами признан адсорбционный метод, основанный на поглощении газов объемами пор твердых тел, в которых происходит концентрирование поглощаемого вещества.

Процессы адсорбции в пищевой отрасли применяют для технологических воздействий на продукты растениеводства при их очистке. Вынос осуществим по отношению ко многим веществам, таким, как гидроокиси, гидроперекиси, гербициды, пестициды, тяжелые металлы и др.

Адсорбция при очистке растительных масел протекает на поверхности раздела двух фаз под физическими воздействиями сил Ван-дер-Ваальса. Кине-

тика адсорбции характеризуется механизмом диффузии, основанном на кинетике подвода адсорбтива к адсорбенту. При применении пористых адсорбентов наряду с внешней диффузией существенное значение имеет внутренняя, характеризуемая концентрацией адсорбтива и размерами пор.

Эта система описывается молекулярной диффузией, т. к. длина свободного пробега молекул в порах меньше размера пор [218]. При молекулярной диффузии, описываемой моделью Ленгмюра, процесс насыщения пор подчиняется кинетическому уравнению адсорбции, где скорость приближения к равновесию пропорциональна разности скоростей адсорбции и десорбции:

$$\frac{d\Theta}{d\tau} = k_{адс}(1-\theta) - k_{дек}\theta, \qquad (2.40)$$

где $k_{адс}$ – константа скорости адсорбции;

$k_{дес}$ – константа скорости десорбции.

При условии, что давление в газовой среде является постоянным, скорость адсорбции подчиняется экспоненциальной зависимости:

$$\theta = \theta_0[1 - \exp(-kt)], \qquad (2.41)$$

где θ_0 – скорость адсорбции в равновесной системе;

k – суммарная константа скоростей адсорбции и десорбции.

Учитывая, что при увеличении констант скоростей адсорбционно-десорбционного равновесия продолжительность подачи импульсов в статическом состоянии жидкости и, соответственно, время между изменениями концентраций реагентов системы «жидкость – газ» также возрастают, возникает необходимость воздействия на направление движения системы.

Необходимы дополнительные источники ускорения и упорядочения продвижения фильтруемого масла с поглощением кислотных составляющих в порокапиллярном пространстве адсорбента. Согласно исследованному процессу адсорбции, продвижение жидкости и газа осуществляется в нашем случае сквозь пористую фильтрационную поверхность, предназначенную для поглощения газовых включений в дисперсионной среде [218, 219].

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 и определяется по формуле:

$$\Delta P = P_1 - P_2. \quad (2.42)$$

Следовательно, для интенсификации процесса фильтрации необходимо создать условия для повышения давления над фильтрационной поверхностью и его снижения в фильтрационной перегородке путем подбора сорбента с низкими показателями сопротивления продвижению жидкости.

Низкое сопротивление фильтрационной перегородки может быть обеспечено параметрами сорбента и его дисперсностью, что обосновано в дальнейшем с учетом факторов, воздействующих на скорость адсорбции, представляющих собой основы теории фильтрации газа из жидкой среды в поверхность. Это происходит за счет коагуляции мельчайших частиц примесей и их осаждения под действием гравитационных сил. Скорость и качество фильтрации под действием этих факторов значительно ухудшаются, причем количество загрязнений фильтра в данном случае значительно, и уже через краткий промежуток времени он начинает противодействовать продвижению очищаемой жидкости сквозь фильтрационную поверхность. Этот процесс описывается уравнением Г. М. Знаменского [219], учитывающим параметры, воздействующие на скорость фильтрации в реальных, продолжительных в функции времени, условиях. Здесь задействовано множество факторов, основными из которых являются показатели вторичных продуктов фильтрации, к которым относится взвесь мелкодисперсных частиц, находящихся в масле.

Процесс фильтрации нерафинированного растительного масла основан на разделении неоднородных дисперсных фаз, состоящих из продуктов окисления в газообразном состоянии и взвеси твердых составляющих. Его осуществляют путем пропускания через пористую перегородку. В процессе фильтрации образуются две системы суспензии:

• жидкость – твердое тело, состоящая из масла и взвеси мелко- и грубодисперсных частиц, удаляемых из масла;

• газ – жидкость, состоящая из кислотных и перекисных составляющих, ведущих к окислению и порче масла.

Целевыми компонентами фильтрации служат чистое масло, получаемое методом адсорбции, и выводимые компоненты, состоящие из влажного осадка, накапливающегося на фильтрационной поверхности.

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

$$v = \frac{Q}{F} = \frac{\Delta P}{\mu R_{\text{фп}}}, \tag{2.43}$$

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.

Сопротивление фильтровальной перегородки – величина переменная, она увеличивается по мере накопления осадка:

$$R_{\text{фп}} = \frac{r_0 l}{t}, \tag{2.44}$$

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

l – высота слоя осадка, м.

На основании уравнения (2.43) 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:

$$v = \frac{\Delta P t}{\mu r_0 l}. \tag{2.45}$$

Исходя из факторных параметров, входящих в выражение (2.43), для обеспечения высокой производительности фильтрации масла особое внимание следует уделять съему осадка, образованного на фильтрационной поверхности, и высвобождению порокапиллярного пространства сорбента для продвижения жидкости и фильтрации в нем продуктов окисления.

Процесс продвижения масла зависит от модуля сжатия осадка. При производстве растительных масел он характеризуется седиментационной сжимаемостью взвеси с созданием поверхности дополнительного раздела между фильтрационной поверхностью и фильтратом (рисунок 2.3).

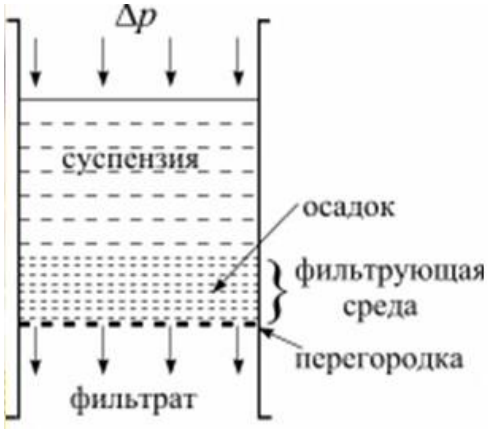


Рисунок 2.3 – Схема процесса фильтрования
под действием перепада давлений

При фильтрации микрочастицы осадка накапливаются и под давлением жидкости коагулируют, выпадая в осадок и ухудшая проницаемость поверхности фильтра. Вследствие этого скорость фильтрации уменьшается, и в какой-то период времени эффективность этого процесса резко снижается и прекращается [220–223]. Это влечет за сбой повышение производственных затрат, вызванных необходимостью постоянной очистки и замены картриджа с адсорбентом.

Для обеспечения постоянной скорости фильтрации необходимо создание условий минимизации слоя осадка и его удаления:

$$V^2 + 2Vc = k\tau, \tag{2.46}$$

где V – объем фильтрата, м^3;

c – первая константа фильтрования, характеризующая гидравлические сопротивления, $м^3/м^2$;

k – константа фильтрования, характеризующая режим фильтрации, $м^2/с$;

τ – время фильтрования, с.

Известные методы достижения высоких показателей скорости и качества фильтрации, предусматривающие использование добавок к сорбенту, увеличение температуры обрабатываемого масла, добавки флокулянтов, обработки магнитным полем нецелесообразны по причине необходимости постоянного сноса с поверхности осадка. А это возможно только путем их отрыва от фильтрационной поверхности и переноса в накопитель загрязнений дополнительными физико-механическими методами. Для наибольшей производительности фильтрационной поверхности необходимо создание линейного слоя осадка.

2.4.2 Факторная взаимосвязь параметров гармонической колебательной системы

Сорбционные процессы широко используют для поглощения сорбтива (вещества, растворенного в жидкости) сорбентом (веществом, поглощающим сорбтив) [224]. В рассматриваемом случае гидропероксиды, входящие в состав нерафинированных подсолнечных масел и являющиеся очагом зарождения свободной радикальной реакции, ведут к окислению масла и его порче. Их удаление осуществляют методом адсорбции – путем поглощения гидроперекисей из раствора (масла) твердыми адсорбентами. Кинетика процесса основана на возможности использования избирательности и обратимости при адсорбционной очистке. При адсорбции происходит концентрация молекул поглощаемого вещества на поверхности адсорбента под действием сил Ван-дер-Ваальса с дальнейшей концентрацией паров поглощаемого вещества в капиллярных порах адсорбента и с последующим присоединением выделяемых молекул вещества по месту насыщенных валентностей элементов, составляющих кристаллическую решетку адсорбента [225].

Исходя из изложенного, следует, что адсорбция представляет собой обратимый процесс и адсорбционные частицы подвижны, они удерживаются на адсорбенте на сотые и тысячные доли секунды и, десорбируясь, заменяются на новые частицы, перемещающиеся по всей поверхности адсорбента [222, 225].

Важной задачей следует считать состояние очистки фильтрационной поверхности. От ее загрязненности будут зависеть проходимость поглощаемого вещества, качество и продолжительность эффективной очистки.

С этой целью теоретически исследовали механическую колебательную систему активного воздействия на среду для очистки поверхности адсорбционного материала от частиц дисперсной фазы.

Адсорбционный процесс, протекающий при интенсивной ультразвуковой очистке масла в картридже, сопровождается активизацией седиментации частиц дисперсной фазы под действием силы тяжести и ускорения продвижения микрочастиц акустическими микротоками на фильтрационной поверхности и их накопления на ней. Проникновение микрочастиц в граничащую с очищаемым маслом поверхность адсорбента с дальнейшим их продвижением ограничивает их проницаемость и проходимость сквозь поры и устьица минерала (доломита и опоки).

При этом все мелкие коллоидные частицы, находящиеся в очищаемом масле, подвергаются укрупнению в результате их слипания под действием межмолекулярных сил сцепления, в итоге приводящих к осаждению осадка и его концентрации на фильтрационной поверхности. Таким образом, термодинамически неустойчивые дисперсные и коллоидные системы обладают свойством самопроизвольного укрупнения частиц – коагуляции и каолесценции, что разрушает коллоидную систему и превращает ее в грубодисперсную [226, 227].

Вследствие седиментационной устойчивости образующийся осадок ухудшает и перекрывает доступ масла в фильтрационную среду. Седиментационная устойчивость, являющаяся функцией размеров 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 поверхности адсорбента для создания условий всплывания частиц дисперсной фазы и их перемещения в накопитель загрязнений.

Ранее исследованные теоретические и экспериментальные схемы распределения и воздействия акустических колебаний и создаваемых ими микропотоков [228, 229] подверглись переосмыслению с той позиции, что повышение эффективности очистки сырых и нерафинированных подсолнечных масел должно быть дополнено:

- созданием аксиальных и тангенциальных микропотоков, обеспечивающих проницательную способность адсорбента;
- постоянной очисткой фильтрационной поверхности от укрупненных загрязнений, улучшающей тем самым проходимость адсорбента.

На этом основании при исследованиях было принято решение о необходимости дополнения горизонтальных акустических колебаний, воздействующих на очищаемое масло, вертикальными механическими, создаваемыми вибрационными гармоническими, нормальными к фильтрационной поверхности [228].

Эффективность воздействия ультразвуковых колебаний обеспечивается за счет средней энергии, переносимой акустической волной через единичную площадку фильтрационной поверхности, перпендикулярной к направлению распространения волны в единицу времени. Таким образом, этот процесс зависит от расстояния распространения ультразвукового возбудителя: чем оно

дальше, тем выше коэффициент затухания колебательных волн и, соответственно, акустических микропотоков. На этой основе в соответствии с исследованиями В. Д. Варсонафьева, И. Я. Городецкого, И. И. Быковского [230–232] установлена необходимость создания дополнительных источников колебательных волн, снижающих седиментационную устойчивость осажденных частиц на фильтрационной поверхности.

Известно [232–234], что характер распространения вибрационных гармонических колебательных движений в среде осуществляется по схеме, представленной на рисунке 2.4.

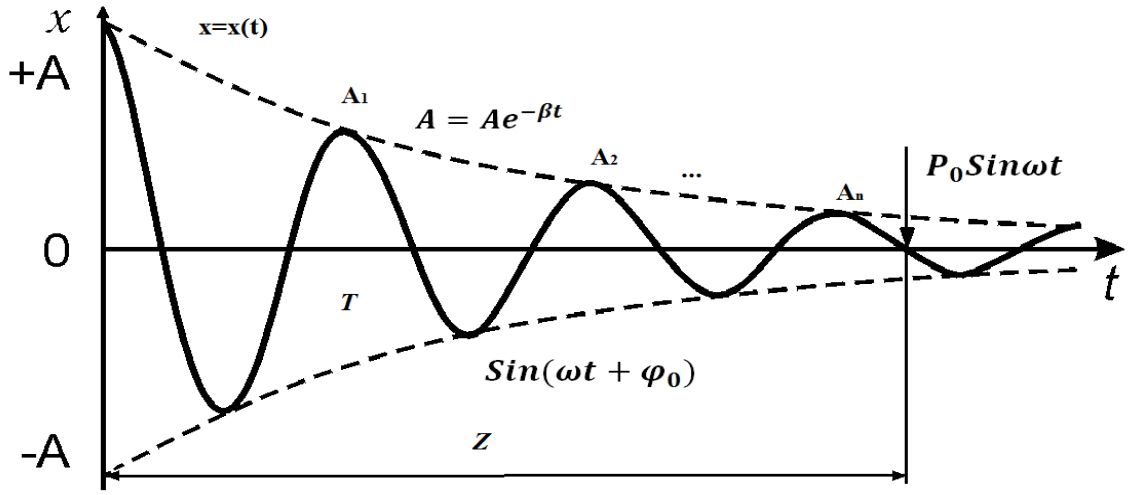


Рисунок 2.4 – Распределение затухающих гармонических колебаний в функции времени

Закономерность распределения колебательных движений в среде [237] характеризуется переменной координатой $x = x(\tau)$, изменение которой во времени описывается выражением:

$$x = A\sin \omega\tau \quad \text{или} \quad x = A\cos \omega\tau, \tag{2.47}$$

где A – амплитуда колебаний, характеризующая модуль наибольшего смещения колеблющейся величины от положения равновесия, мм;

ω – циклическая частота колебаний, рад/с, $\omega = 2\pi / t$;

τ – текущее время, с.

При анализе гармонических колебательных движений особую значимость приобретает исследование колеблющейся величины, все параметры которой зависят от амплитуды, в нашем случае обеспечивающей максимальное смещение материальной точки осадка от фильтрационной поверхности с целью её последующего перемещения в отстойник.

Отрыв загрязнений от фильтрационной поверхности может быть осуществлен только принудительно за счет введения дополнительных колебательных движений. На первом этапе наиболее предпочтительны механические гармонические колебания, призванные отрывать и приподнимать путем всплытия загрязнения от фильтрационной поверхности адсорбента. В физическом смысле отрыв загрязнения зависит от параметров смещения координаты $x(t)$, зависящей от многих факторных характеристик гармонического колебательного движения, в частности, от того, по какому закону колеблющаяся величина изменяется со временем (косинуса или синуса):

$$x(t) = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0);$$

$$x(t) = A\sin(\omega_0 t + \varphi_0), \qquad (2.48)$$

где A – амплитуда вынужденных колебаний, характеризующая модуль наибольшего смещения частицы загрязнения от положения равновесия, мм;

ω_0 – циклическая частота колебаний системы, рад/с;

φ_0 – начальная фаза колебаний; фазовый смысл этого параметра заключается в том, что он определяет величину смещения тела в любой момент времени.

Амплитуда вынужденных колебаний зависит от амплитуды вынуждающей силы и её частоты. Эта зависимость приводит к тому, что при определенной частоте амплитуда A достигает своего максимального резонансного значения, ведущего к отрыву и всплыванию частиц загрязнения с фильтрационной поверхности:

$$A = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0 - \omega^2)^2 + 2(\beta\omega)^2}}, \qquad (2.49)$$

где F_0 – амплитудное значение вынуждающей силы, Н;

m – масса колеблющейся системы, кг;

ω_0 – циклическая частота колебаний системы, рад/с;

ω – циклическая частота вынуждающей силы, рад/с;

β – коэффициент затухания, $с^{-1}$.

Таким образом, из выражения (2.49) следует, что амплитуда вынужденных колебаний является основой для проектирования механической колебательной системы.

Амплитуда колебательных движений, распространяясь в жидкой среде и воспринимая ее сопротивление продвижению, затухает. Вследствие этого сокращается эффективность процесса, описываемая коэффициентом затухания β:

$$\beta = \frac{r}{2m}, \tag{2.50}$$

где r – коэффициент сопротивления среды.

Следовательно, максимальная величина амплитуды уменьшается по закономерности, обусловленной логарифмическим декрементом затухания от времени продвижения:

$$A(t) = Ae^{-\beta(t+\tau)}, \tag{2.51}$$

где τ – приращение времени при продвижении колебательных движений в среде.

В свою очередь, частота механических колебательных движений ω_0, характеризующая число полных колебаний колеблющейся системы за единицу времени, зависит от значений собственной частоты колебательной системы:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{\omega}}, \tag{2.52}$$

где k – коэффициент сопротивления среды, меняющийся до состояния циклической частоты;

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \tag{2.53}$$

Подвергая анализу все остальные параметры гармонических колебаний, можно сделать вывод о том, что амплитуда и частота колебательных движений характеризуют координату колеблющегося тела, нахождение частиц загрязнения при всплытии от адсорбционной поверхности в разные периоды времени. Скорость движения и всплытия частиц загрязнения описывается уравнением:

$$V(t) = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = A\omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \tag{2.54}$$

При этом максимальная скорость будет при соблюдении условия:

$$\cos(\omega_0 t + \varphi_0) = 1.$$

Ускорение продвижения частицы *a*:

$$a = \frac{\mathrm{d}V(t)}{\mathrm{d}t} = A\omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \tag{2.55}$$

Максимальное ускорение будет наблюдаться при соблюдении условия:

$$\sin(\omega_0 t + \varphi_0) = -1.$$

Общая безразмерная величина, характеризующая эффективность колебательной системы, обусловливающая ее добротность, т. е. диссипацию *Q* ее энергии во времени, также полностью зависит от анализа составляющих:

- угловой частоты колебательных движений:

$$Q = \frac{\pi}{\beta T} \approx \frac{\pi\omega_0}{\beta 2\pi} = \frac{\omega_0}{2\beta}, \tag{2.56}$$

где *T* – период колебаний, характеризующий промежуток времени, через который движение частицы полностью меняется, $T = 1/\omega$;

- амплитуды колебательных движений:

$$Q = 2\pi \frac{A^2(t)}{A^2(t) + A^2(t+\tau)}. \tag{2.57}$$

Таким образом, для обеспечения отрыва от фильтрационной поверхности частиц загрязнения и их всплытия в среде подсолнечного масла с целью дальнейшего перемещения в отстойник необходимо теоретически проанализировать кинетику этого процесса.

Элементы гидромеханики жидкости описываются уравнениями неразрывности Пуазейля и Бернулли, исходя из которых следует, что в соответствии со свойствами жидкости при воздействии на нее колебательных движений возникают деформации во множестве слоев, перемещающихся один над другим. Эти смещения и являются движущей силой для съема и всплытия загрязнений над фильтрующей поверхностью и создания условий для их зависания в плоскости x с последующим перемещением ультразвуковыми микротечениями от плоскости в отстойник. Физически кинетику этого процесса можно проиллюстрировать следующим образом (рисунок 2.5).

Рисунок 2.5 – Кинетика нарушения положения равновесия материальной точки колебательными движениями

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.

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

$$E = \frac{1}{2}kA^2, \qquad (2.58)$$

где k – коэффициент упругости.

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

Теоретическая реализация значений частоты и цикла колебательных движений играет существенную роль в создании гидромеханических условий всплытия частиц осадка с целью создания нового равновесного состояния на расстоянии x_{max} от точки равновесия x. Это позволит направленно воздействовать на частицы осадка акустическими микротечениями и перемещать их в отстойник, высвободив при этом доступ масла к адсорбирующей поверхности фильтра.

В случае перемещения колебательных движений с частицами удаляемого осадка особое значение приобретает изучение вопроса послойного перемещения жидкости, параметры которого зависят от сил внутреннего трения, связанного с взаимодействием слоев жидкости, движущихся с разными скоростями относительно друг друга.

В соответствии с законом Ньютона силы сдвига между слоями жидкости пропорциональны переменному градиенту скорости вдоль заданного направления и площади соприкосновения смежных слоев жидкости:

$$\operatorname{grad} v = -\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}; \quad F_{тр} = -\eta \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x} S. \tag{2.59}$$

Если принять, что частица осадка имеет форму шарика, то для определения силы трения при ее передвижении применим закон Стокса:

$$F_{тр} = 6\pi\eta r v. \tag{2.60}$$

Тогда, когда сумма силы трения и силы Архимеда совпадают, движение частиц осадка в новую точку равновесия x_{max} прекращается, и они должны выпасть вновь в осадок или, при соответствующей частоте и периоде колебаний,

поддерживаться во взвешенном состоянии. Приложение дополнительной движущей силы, создаваемой акустическими микротечениями, позволит передвигаться частицам в отстойник.

2.4.3 Исследование физических кинетических факторов, воздействующих на колебательную систему при нарушении ее равновесия

Из рисунка 2.5 следует, что под действием вибрации в колебательной системе возникают сосредоточенные по площади фильтрационной поверхности возмущающие силы $P = P(t)$, действующие на расстоянии Z, которые в соответствии с синусоидальным законом:

$$P = P_0 \sin \omega t, \tag{2.61}$$

где P_0 – возмущающая сила в точке приложения колебательных движений к фильтрационной поверхности, Н.

Возмущающие силы $P = P(t)$ вызывают колебания фильтрационной поверхности, описываемые дифференциальным уравнением, где учтены все кинематические параметры продольно направленных вибрационных колебаний:

$$\frac{EG}{m}\frac{\partial^2 A_{\text{кс}}(x;t)}{\mathrm{d}x^4} + \frac{\partial^2 A_{\text{кс}}(x;t)}{\mathrm{d}t^2} = 0, \tag{2.62}$$

где EG –изгибная жесткость материала точки фильтрационной поверхности; E – нормальный модуль упругости; G – модуль упругости при сдвиге кручением;

m – масса фильтрационной поверхности, кг;

$A_{\text{кс}}(x;\ t)$ – амплитуда колебательного движения, характеризующая перемещение текущей точки фильтрационной поверхности в функции координатных x и временных t показателей.

Решением уравнения (2.60) можно определить величину перемещения текущей точки фильтрационной поверхности в функциях координаты x и времени t, позволяющую характеризовать эффективность и достаточность колебания фильтрационной поверхности:

$$A_{кс}(x;\, t) = x_к(x)T_к(t), \tag{2.63}$$

где $x_к(x)$ – функция координаты смещения материальной точки;

$T_к(t)$ – функция периода колебательных движений по текущему времени.

На основании выражения (2.61) функцию периода колебательных движений, можно записать в виде:

$$T_к(t) = A_{кс} \sin [P_к(t) + P_к], \tag{2.64}$$

где $A_{кс}$ – амплитуда колебательных движений, м;

$P_к(t)$ – главные моногармонические колебания по текущему времени, м.

Функция координаты смещения материальной точки в соответствии с рекомендациями В. Л. Бидермана [235] описывается уравнением, учитывающим все параметры процесса колебательных движений:

$$x_к(x) = c_1S(f;\, x) + c_2T(f;\, x) + c_3A(f;\, x) + c_4v(f;\, x), \tag{2.65}$$

где c_1S, c_2T, c_3A, c_4v – постоянные, характеризующие начальные значения функций и их производных колеблющийся системы S, периода колебательных движений T, амплитуды колебательных движений A и скорости v соответственно;

f – частота колебательных движений, кГц.

Частоту колебательных движений устанавливают в зависимости от главных моногармонических колебаний и преодоления сил сопротивления передвижению материальной точки над фильтрационной поверхностью:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{EG}{m}}, \tag{2.66}$$

где m – масса фильтрационной поверхности, кг;

$P_к$ – главные моногармонические колебания, м;

EG – изгибная жесткость материала точки фильтрационной поверхности.

Постоянные величины начальных значений функций:

$$c_1 = x(0);\; c_2 = \frac{1}{f}x'(0);\; c_3 = \frac{1}{f^2}x''(0);\; c_4 = \frac{1}{f^3}x'''(0). \tag{2.67}$$

Уравнение (2.65) характеризует форму колебательных движений с учетом колеблющейся системы S и материальной точки x.

Уравнения описываемых функций и колебательных движений в соответствии с рекомендациями [235] имеют вид:

$$\begin{aligned} S(f;x) &= \frac{1}{2}(c_1 hfx + \cos fx); \\ T(f;x) &= \frac{1}{2}(c_2 hfx + \sin fx); \\ A(f;x) &= \frac{1}{2}(c_3 hfx + \cos fx); \\ v(f;x) &= \frac{1}{2}(c_4 hfx + \sin fx). \end{aligned} \tag{2.68}$$

Последовательные производные функции из выражений (2.68) определяются посредством функций перемещения материальной точки $x(x)$ по переменной x, характеризующей параметры вибрационных колебаний:

$$\begin{aligned} &x'(x) + f[c_1 v(fx) + c_2 S(fx)] + c_3 T(fx) + c_4 A(fx); \\ &x''(x) + f^2[c_1 A(fx) + c_2 v(fx)] + c_3 S(fx) + c_4 T(fx); \\ &x'''(x) + f^3[c_1 T(fx) + c_2 A(fx)] + c_3 v(fx) + c_4 S(fx). \end{aligned} \tag{2.69}$$

Исходя из схемы затухающих гармонических колебаний (см. рисунок 2.4), последовательные производные функции $x(x)$ зависят от амплитуды колебаний на расстоянии, следовательно:

$$x(0) = 0; \quad x'(0) = 0; \quad x''(Z) = 0; \quad x'''(Z) = 0. \tag{2.70}$$

Учитывая полученные выражения (2.67) и (2.68), постоянные c_1, c_2, c_3, c_4 примут вид:

$$\begin{aligned} &c_1 = c_2 = 0; \\ &\text{для } c_3 \text{ и } c_4 \rightarrow \begin{cases} f^2\left[c_3 S(fZ) + c_4 T(fZ)\right] = 0; \\ f^3\left[c_3 v(fZ) + c_4 S(fZ)\right] = 0. \end{cases} \end{aligned} \tag{2.71}$$

Система уравнений (2.68) при разложении определяет условие ненулевых решений, что дает возможность записать его в виде:

$$\Delta = \begin{vmatrix} S(fZ)T(fZ) \\ v(fZ)S(fZ) \end{vmatrix} = 0. \qquad (2.72)$$

Отсюда:

$$S^2(fZ) - T(fZ) \cdot v(fZ) = 0. \qquad (2.73)$$

Учитывая выражение (2.71) и условие распределения гармонических колебательных движений, получим:

$$\frac{1}{4}\left(chfZ + \cos\ fZ\right)^2 - \frac{1}{2}\left(chfZ + \sin\ fZ\right)\left(chfZ - \sin\ fZ\right) = 0. \qquad (2.74)$$

Отсюда:

$$ch^2fZ + 2chfZ \cos fZ + \cos^2 fZ - (ch^2fZ - \sin^2 fZ) =$$

$$= ch^2fZ - ch^2fZ + 2chfZ \cos fZ + \cos^2 fZ + \sin^2 fZ =$$

$$= 1 + 2\cos chfZ \cos fZ + 1.$$

Таким образом, уравнение для собственных колебательных частот:

$$chfZ \cos fZ = -1. \qquad (2.75)$$

Исходя из полученного выражения (2.69), функция координаты x, описывающая распространение колебательных движений в функции времени t, примет вид:

$$x(x) = (chfZ + \sin fZ)(chfx - \cos fx) -$$
$$- (chfx - \cos fx) - (chfZ + \cos fZ)(chf \sin fx). \qquad (2.76)$$

Таким образом, уравнение (2.76) позволяет устанавливать на основе известной частоты колебательных движений фильтрационной поверхности в координате x амплитуду колебаний с учетом силы колебательных движений $P_к(t)$, возбуждаемой вибрационной колебательной системой. Выражение для определения амплитуды колебательных движений, или величины прогиба фильтрационной поверхности, означающей эффективность и достаточность амплитуды колебания фильтрационной поверхности для отрыва и смещения частицы загрязнения, примет вид:

$$A_{кс}(x;\ t) = (chf_к Z + \sin f_к Z)(chf_к x - \cos f_к x) -$$

$$- (chf_к Z + \cos f_к Z)(chf_к x - \sin f_к x) \sin P_к(t) + P_к. \quad (2.77)$$

Принимая во внимание ранее приведенные показатели, формулу для определения амплитуды материальной точки фильтрационной поверхности можно представить в виде:

$$A_{кс}(x;\ t) = [T(f_к Z)A(f_к Z) - S(f_к Z)v(f_к Z)]A \sin P_к(\mathrm{t}) + P_к. \quad (2.78)$$

Полученное выражение (2.76) позволяет установить параметры колебательных движений, необходимые для снижения седиментационной устойчивости грубодисперсных частиц, находящихся на фильтрационной поверхности, их отрыва и перемещения в накопитель суспензии.

2.4.4 Повышение эффективности действия совмещенных ультразвуковых и вибрационных колебаний

Акустические ультразвуковые колебания чувствительны к среде распространения (в нашем случае это подсолнечное масло) и имеют нежелательные свойства затухания в зависимости от расстояния их распространения. Действенность микропотоков уменьшается, снижается в целом интенсивность продвижения и омывания очищаемого масла сквозь слой адсорбента. За счет дополнительных вибрационных колебаний, действующих по оси *x*, создаются дополнительные микропотоки, которые в первую очередь способствуют отрыву с фильтрационной поверхности суспензии, а во вторую – снижению коэффициента интенсивности поглощения микропотоков в колебательной среде. Тогда на основании закономерности распределения акустических ультразвуковых колебаний в жидкой среде коэффициент затухания α_1:

$$\alpha_1 = \frac{2\eta f^2}{3\rho c^3}, \quad (2.79)$$

где η – вязкость жидкости, для масла η = 0,0598 Па · с;

f – частота акустических колебаний, кГц;

ρ – плотность очищаемого масла, ρ = 920 кг/м^3;

c – коэффициент сжимаемости масла с дополнительными механическими колебательными движениями, создаваемыми гармоническими продольными вибрациями фильтрационной поверхности.

Следовательно, дополнительная частота продольных вибрационных колебаний ω:

$$\omega = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{EG}{m}} \tag{2.80}$$

где EG – изгибная жёсткость материала точки фильтрационной поверхности;

E – нормальный модуль упругости;

G – модуль упругости при сдвиге кручением;

m – масса материальной точки, подвергаемой вибрационным колебаниям, кг.

Исходя из выражений (2.79) и (2.80), общая закономерность распределения колебательных движений имеет вид:

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{2\eta\left(f^2+\omega^2\right)}{3\rho c^3} \tag{2.81}$$

Рассмотренный характер изменения кинетического состояния колебательной системы предусматривает одновременное воздействие на среду акустических и механических колебаний, что увеличивает интенсивность микропотоков. В данном случае в выражениях интенсивности и амплитуды колебательных движений появляется новая степенная функция α_{Σ}, снижающая величину коэффициента затухания и, соответственно, повышающая интенсивность микропотоков:

$$I = I_1 + I_2 e^{-2\alpha_{\Sigma} x}; \quad A = A_1 + A_2 e^{-\alpha_{\Sigma} x}, \tag{2.82}$$

где I_1 – интенсивность акустических волн, Вт/м$^2 \cdot 10^5$;

I_2 – интенсивность механических волн, Вт/м$^2 \cdot 10^5$;

A_1 – амплитуда акустических волн, м;

A_2 – амплитуда механических волн, м.

Для определения качественных показателей растительных масел, исходя из формулы (2.82) предлагаем формулу:

$$K_м = K_{мо} + A\cdot \omega \sin(2\pi f t_0) + K_1 \cdot t_x^{\,3} - K_2 \cdot t_x \qquad (2.83)$$

где $K_{мо}$ – исходный параметр продукта, базовый коэффициент качества (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 фильтрации масла, мин;

A – амплитуда колебаний, мм;

ω – частота вибрационных колебаний фильтрационной установки, с$^{-1}$;

f – частота ультразвуковых колебаний, с$^{-1}$.

Для получения уравнения скорости движения осадка после его всплытия над фильтрационной поверхностью необходимо учитывать законы Стокса и Архимеда, а также следующие условия: частоты взаимно перпендикулярных колебаний должны быть $\omega_в + \omega_п = \omega$; разность фаз колебаний отсутствует. В этом случае фигура Лиссажу (траектория частиц) представляет собой прямую линию (рисунок 2.6).

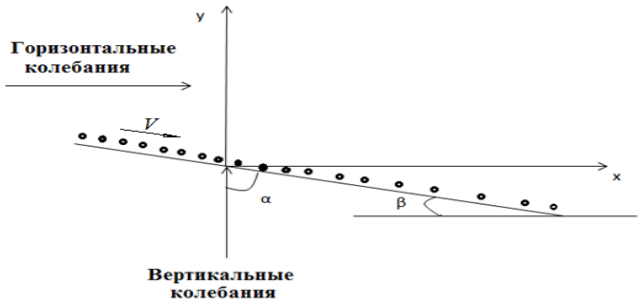


Рисунок 2.6 – Схема процесса действия совмещенных ультразвуковых и вибрационных колебательных волн

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

$$Q = S_{\text{сеч}} v \gamma_{\text{уд}} K_{\text{распр}}, \quad (2.84)$$

где $S_{\text{сеч}}$ – площадь поперечного сечения катриджа фильтра, м^2;

$\gamma_{\text{уд}}$ – плотность осадка, кг/м^3;

$K_{\text{распр}}$ – коэффициент распределения осадка, $K_{\text{распр}} \approx 0{,}6\ldots1{,}0$.

Тогда уравнение скорости перемещения осадка v можно записать в виде:

$$v = \rho_{\text{м}} S_{\text{реш}} \eta_{\text{м}}^{-1} K^{(\omega)} f \sin^2 \beta \sqrt{(A_{\text{в}}^2 + A_{\text{п}}^2)}, \quad (2.85)$$

где $\rho_{\text{м}}$ – плотность масла, кг/м^3;

$S_{\text{реш}}$ – площадь фильтрационной поверхности, м^2;

$\eta_{\text{м}}$ – динамическая вязкость масла, Па · с;

$K^{(\omega)}$ – коэффициент, учитывающий изменение частоты колебаний, $K^{(\omega)} = \frac{A_{\text{в}} \omega^2}{g}$, с$^{-1}$;

f – частота ультразвуковых колебаний, с$^{-1}$;

α – угол между направлениями вертикальных колебаний и фильтрационной плоскостью, град.;

$A_{\text{в}}$ – амплитуда вертикальных колебаний, м;

$A_{\text{п}}$ – амплитуда поперечных колебаний, м;

g – ускорение свободного падения, м/с^2;

β – угол наклона фильтра, град.

Полученная формула (2.84) 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 $A_{\text{в}}$, 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.

2.4.5 Математическое моделирование показателей качества продукции растениеводства

В современных условиях агропромышленного комплекса одной из ключевых задач является оптимизация технологических процессов обработки продукции растениеводства. Это позволяет не только повысить качество конечной продукции, но и снизить затраты на производство. Одним из эффективных методов достижения этих целей является математическое моделирование технологических процессов. Выполняли математическое моделирование показателей качества продукции растениеводства с использованием программы Statistica.

Для построения математической модели технологического процесса обработки продукции растениеводства за основу принята множественная регрессия, так как исследуемые качественные показатели есть функции от нескольких переменных.

Для составления многофакторной модели эксперимента для определения влияния технических параметров обработки, определяющих характеристику обработки продукции растениеводства, приняты частота ультразвука, температура обработки и время обработки, а в качестве факторов, определяющих качественные показатели зерна пшеницы, приняты влажность (φ) и зольность (Z), сои – содержание ингибиторов трипсина (H) и уреазы (U), масла – кислотное (K), перекисное (χ), цветное числа (h).

Зависимости технических параметров обработки и качественных показателей растениеводства представлены на рисунке 2.7.

Представим математическое моделирование показателей качества продукции растениеводства на примере пшеницы (формулы 2.86, 2.87).

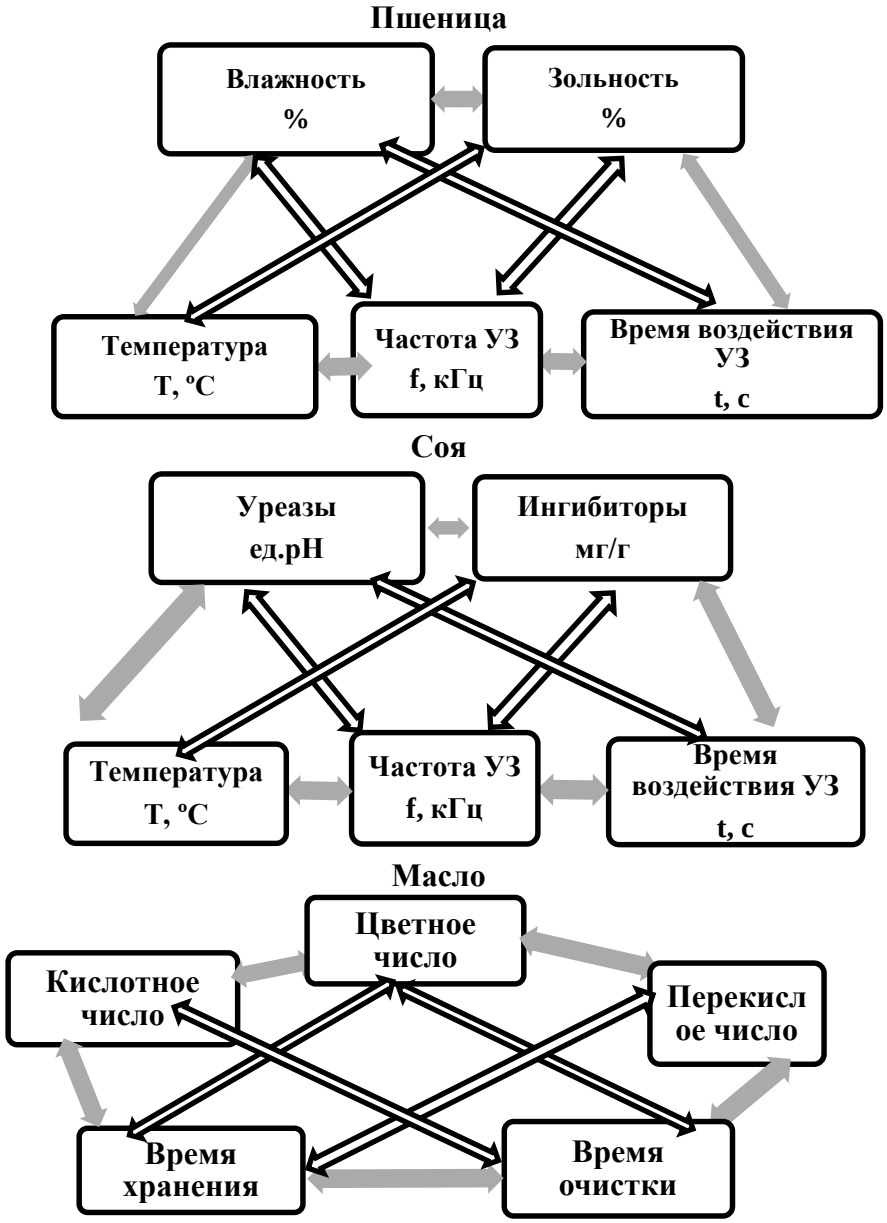


Рисунок 2.7 – Зависимость технических параметров обработки и качественных показателей растениеводства

Однофакторные зависимости исследуемых качественных параметров пшеницы от технических параметров обработки, определенные по результатам расчета процесса обработки, представлены следующими уравнениями:

$$\left.\begin{aligned} Z &= 0{,}0006T^2 - 0{,}0644T + 2{,}659 \\ Z &= 0{,}0001t^2 - 0{,}0167t + 1{,}7775 \\ Z &= -0{,}2244f^2 + 8{,}5718f - 80{,}34 \end{aligned}\right\} \quad (2.86)$$

$$\left.\begin{aligned} \varphi &= -0{,}0118T^2 + 0{,}9478T - 0{,}26 \\ \varphi &= -0{,}0002t^2 + 0{,}0843t + 14{,}625 \\ \varphi &= -2{,}9658f^2 + 105{,}03f - 911{,}79 \end{aligned}\right\} \quad (2.87)$$

Многофакторные математические модели исследуемых качественных параметров обработки зерна пшеницы с учетом принятых факторов в соответствии с выражением (2.86, 2.87) представляются в следующем виде:

$$Z = -5{,}8-0{,}006t - 0{,}02T + 0{,}44f \quad (2.88)$$

$$\varphi = 56{,}6+0{,}06879t + 0{,}21939T - 0{,}268774\ f \quad (2.89)$$

Разработанные математические модели корректно отражают динамику изменений качественных характеристик сельскохозяйственной продукции в зависимости от технологических параметров ультразвукового воздействия. Эти модели позволяют при решении практических задач оптимизировать значения переменных, входящих в уравнения, учитывая их совокупное влияние на изучаемые параметры. Увеличение времени (t) и температуры (T) увеличивает влажность зерна пшеницы, тогда как увеличение частоты (f) снижает влажность зерна пшеницы. Оптимальные значения зависят от конкретных условий и ограничений.

Оптимальные значения параметров обработки зерна пшеницы зависят от целевых показателей (зольности или влажности) и ограничений на параметры. Для однофакторных моделей оптимальные значения можно найти через вершины парабол. Для многофакторных моделей требуется более сложный анализ, включая возможные ограничения и взаимодействия факторов.

Для проведения многофакторных экспериментов были использованы модели плана Бокса-Бенкена (Box–Behnken design), который является разновидностью симметричного некомпозиционного плана.

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

Были разработаны и проанализированы математические модели, описывающие зависимость качественных показателей продукции растениеводства на примере пшеницы от технических параметров обработки. Разработанные модели позволяют оптимизировать технологические процессы и повысить качество конечной продукции.

Выводы по главе

1. Рассмотрены вопросы теоретичесгкого обоснования кинетики процессовых явлений, протекающих при обработке продукции растениеводства гидродинамическими и ультразвуковыми колебательными движениями, обусловливающие закономерности массопередачи и являющиеся основой для решения технологических и конструктивных задач.

2. Установлены теоретические направления исследований кинетики процессов высокочастотного воздействия на системы «твердое тело – жидкость», «жидкость – газ» при очистке, экстрагировании и увлажнении продукции растениеводства, интенсифицирующих массообменные процессы путем направленной обработки акустическими кавитирующими микропотоками.

3. Уточнены закономерности диффузионного переноса жидкости в структуру обрабатываемой продукции растениеводства за счет использования дополнительных физических колебательных движений, частоты и диффузионного сопротивления обрабатываемой среды, зависящих от коэффициента массопередачи.

4. Исходя из установленных дополнительных физико-механических параметров, выведена закономерность определения средней скорости течения жидкости в порокапиллярном пространстве, обосновывающая кинетику нагнетания, проницания и продвижения жидкости акустическими потоками высокой интенсивности.

5. Представлено теоретическое обоснование процесса диссоциации пероксида водорода, возбуждаемого схлопываниями кавитационных пузырьков, используемого в качестве окислителя в растворе жидкости для интенсификации массоотдачи ингибитора трипсина от стенок обрабатываемой клетки.

6. Выведена формула, позволяющая установить зависимость количества кавитационных пузырьков от частоты акустических колебательных движений, что необходимо для расчета режимных и конструктивных параметров технологии и установки.

7. Предложена зависимость для расчета скорости фильтрации растительного масла с образованием осадка на фильтрационной поверхности, пропорциональной движущей силе и обратно пропорциональной сопротивлению слоя осадка.

8. Определена скорость схождения осадка, зависящая от взаимно перпендикулярных акустических и механических колебательных движений, обеспечивающих подъем осадка взвеси мелкодисперсных частиц и их перемещение с фильтрационной поверхности.

9. Представлены теоретические подтверждения закономерностей взаимодействия гидродинамических и колебательных процессов, их воздействия на интенсивность движущих сил при массообменных процессах.

10. Теоретически установлен механизм повышения эффективности обработки за счет ускорения конвективных диффузионных процессов массопередачи акустическими колебательными микропотоками.

11. Исследованы закономерности фильтрации растительных масел от кислотных составляющих в диффузионном потоке и факторная взаимосвязь сорбционных процессов при ультразвуковой интенсификации массопередачи.

12. Установлена эффективность действия совмещенных ультразвуковых и вибрационных колебаний при очистке фильтрационной поверхности от частиц загрязнений.

13. Разработанные многофакторные математические модели параметров ультразвуковой обработки позволяют определить предельные значения технических параметров ультразвуковой обработки без длительных экспериментальных исследований, а также оптимизировать параметры обработки с учетом качественных параметров продукции растениеводства.

3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Обоснование программы экспериментальных исследований

Программа исследований разработана с целью проведения научно-исследовательских работ и разработки эффективных технологий и технических средств для производства высококачественных продуктов переработки.

Экспериментальные исследования направлены на достижение цели проверки обоснованности теоретических решений, их сходимости с экспериментальными данными. В экспериментальном плане приняты к исследованию и проверке по известным методикам все нормативные показатели, установленные действующей технологической документацией. Для оценки процессовых явлений использованы также частные методики.

Структурная схема экспериментальных исследований представлена на рисунке 3.1.

Анализ применяемых технологий и технических средств позволил установить, что они в своем большинстве низкопроизводительны и их результативность не отвечает требованиям получения высококачественных продуктов переработки.

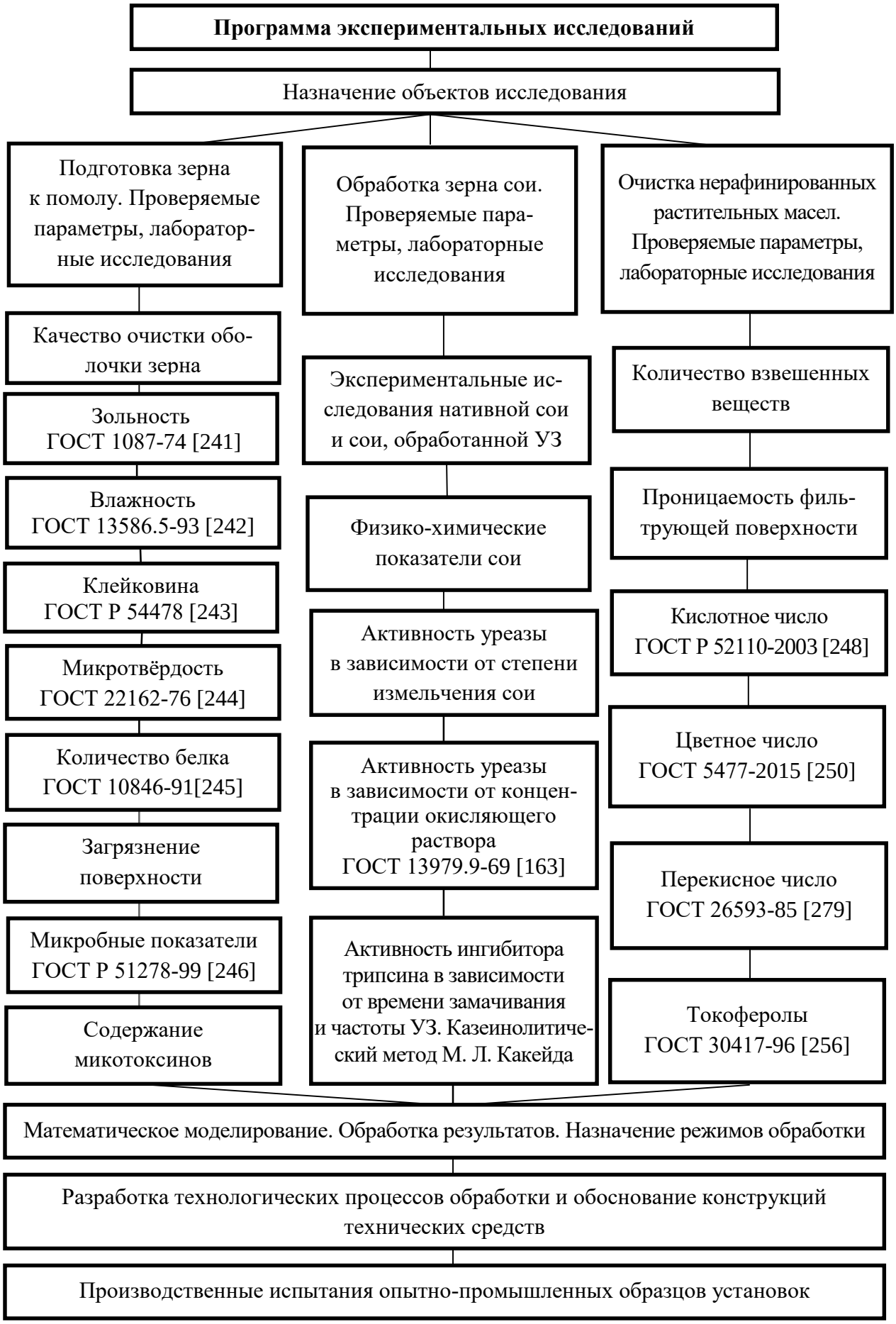


Рисунок 3.1 – Структурная схема экспериментальных исследований

Технологические процессы, основанные на высокотемпературной обработке, известны исторически давно, они в течение долгого периода развивались только в плане технического совершенствования оборудования. При этом качество продукции, ресурсо-, энергосберегающие и, соответственно, экономические показатели оставались на прежнем уровне. Особенно эти недостатки значимы в условиях малого и среднего предпринимательства, на долю которого приходится до 1/3 производства кормов в КФХ или для удовлетворения нужд КФХ.

Экспериментальные исследования проводили поэтапно в следующей последовательности:

1. Выбор лабораторного образца машины (лабораторной установки) на основе теоретических исследований.

2. Подготовка лабораторного оборудования и аппаратуры к работе.

3. Проведение опытов и анализ результатов эксперимента.

4. Проработка конструктивных элементов системы на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований.

При производстве обойной муки, в которой сохранены все структурные составляющие зерна, применение полного комплекса машин, как и при сортовом помоле, не представляется возможным. Первая причина кроется в необходимости использования всего биологического потенциала зерна, вторичные продукты при этом отсутствуют, а существующее оборудование предназначено для удаления оболочки, алейронового слоя и зародыша. Вторая причина – необоснованное повышение расходной части. Поэтому упрощают технологию, считая вполне достаточным использование метода сухого шелушения для очистки оболочки зерна и холодного кондиционирования для его увлажнения. При этом полностью игнорируют факт наличия на зерне зон, являющихся скоплением минеральных загрязнений и следов зараженности, которые при размоле переходят в муку, ухудшая ее качество и, что недопустимо, оставляют в ней продуцентов микотоксинов. Отсюда низкое качество хлеба и его небольшие сроки хранения.

Процесс отволаживания преследует цель придания зерну влажности 14,5–17,0 %. Только в этом интервале зерно достигает нужных размольных показателей. Его пластичность и твердость позволяют не плющить частицы и обеспечивать нужную фракцию муки. От этого также зависит качество хлеба.

Добиться стабильных показателей влажности при существующей технологии отволаживания в силосах не представляется возможным по причине длительности процесса (от 8 до 48 ч). Способ холодного кондиционирования, при кажущейся простоте, влечет за собой затраты, связанные с необходимостью значительного количества бункеров и площадей под них. Температура воды для холодного кондиционирования должна быть 18…20 °С.

Для получения наиболее достоверных данных был проведен сравнительный анализ применяемого способа сухого шелушения и разработанного – ультразвуковой обработки.

Для более детального исследования кинетики процесса ультразвуковой обработки принята расширенная программа, включающая в себя проверку:

- загрязненности оболочки зерна минеральными отложениями и следами зараженности;
- зольности зерна;
- прочностных свойств зерна;
- влажности зерна;
- содержания клейковины в зерне;
- содержания в зерне микотоксинов.

Сою активно используют в виде добавок при производстве кормов, что способствует значительному повышению их протеиновой питательности, снижению потребляемых объемов и повышению продуктивности всех сфер сельскохозяйственного и домашнего животноводства. Однако наличие в сое антипитательных веществ и прежде всего ингибиторов трипсина и уреазы, ухудшающих свойства растительного белка и его усвояемость желудочно-кишеч-

ным трактом, вызывает необходимость их инактивации. Для этих целей используют различные способы экстракции, основанные на тепловой и термодинамической обработке. Воздействие тепла на белковую структуру зерна сои отрицательно, оно нарушает макромолекулу белка и разрушает аминокислоты (что особенно недопустимо для незаменимых), а также витамины и микроэлементы. Для устранения теплового воздействия в работе исследовали технологию, основанную на низкотемпературной обработке зерна сои ультразвуковыми пульсирующими микропотоками, значительно интенсифицирующими динамику процессов массопередачи и кинетику воздействия на ингибиторы ферментов трипсина и уреазы.

В данном случае, как и при обработке зерна перед помолом, сравнивали результаты тепловой обработки с ультразвуковой. Оценивали следующие показатели:

- содержание белка;
- содержание жира;
- содержание клетчатки;
- активность ингибитора трипсина;
- активность уреазы.

Нерафинированные растительные масла по своим свойствам отличаются от рафинированных. Они являются продуктом с улучшенными питательными свойствами, сохраняющим все полезные свойства семян подсолнечника. Однако в связи с простой фильтрацией, включающей в себя только центрифугирование и седиментацию, они обладают повышенной кислотностью и содержат взвесь твердых составляющих, ведущих к порче при хранении.

Кислотность масла, переходящая в продукт от семян подсолнечника и из окружающей среды при производстве, с течением времени инициирует остаточную радикальную реакцию, насыщая продукт гидроперекисными составляющими, ведущими на начальной стадии к ухудшению его качества, а затем и к порче. Этот процесс скоротечен, и уже при достижении трех месяцев хранения в масле происходят изменения, провоцирующие потерю витаминов, в

том числе антиоксиданта токоферола. Рафинированные масла практически не окисляются, так как при многоэтапной фильтрации и экстракции в них не остается ничего, что может испортиться.

В соответствии с разработанной технологией предлагается очищать нерафинированное масло от первичных и вторичных продуктов окисления уже на стадии его производства, а после трехмесячного хранения осуществлять его регенерацию методом адсорбции с ультразвуковой обработкой.

Исследованиям были подвергнуты:

- количество взвешенных твердых частиц загрязнений;
- проницаемость фильтрующей перегородки;
- параметры кислотного числа;
- параметры разрушения токоферола;
- параметры изменения перекисного и цветного чисел.

3.2 Применяемые лабораторное оборудование и аппаратура

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 воздействий на обрабатываемый растениеводческий материал, оценивать их количественными характеристиками и качественными показателями, исследовать режимные составляющие технологических процессов и на основании полученных данных после их обработки выработать конструктивные решения для разработки опытно-конструкторского оборудования.

При проведении экспериментальных исследований обработке подвергали: пшеницу Саратовская 29, сою Злато, Бара, Соер 4, Соер 5, подсолнечник Саратовский 82, Саратовский 85.

Для изучения процесса фильтрации нерафинированных масел использовали растительные масла, произведенные методом холодного отжима.

Для проведения экспериментов использовали установки УЗУ 4-1.6-О, УОМ-2, ПСБ-Галс, РАП-01 (рисунок 3.2), а также ультразвуковой погружной излучатель.

а *б*

в *г*

Рисунок 3.2 – Ультразвуковые установки: *а* – УЗУ 4-1.6-О; *б* – УОМ-2; *в* – ПСБ-Галс; *г* – РАП-01

Ультразвуковое оборудование соответствует российским стандартам, техническим регламентам Таможенного союза ТР ТС 010/2011, ТР ТС 004/2011 и ТР ТС 020/11. Установка УЗУ 4-1.6-О укомплектована различными акустическими преобразователями магнитострикционного типа.

3.3 Методика определения показателей зерна пшеницы

В основу методики исследования положена логическая взаимосвязь, позволяющая изучать влияние температуры, частоты ультразвуковых колебаний, интенсивности ультразвукового поля и времени обработки на показатели качества обрабатываемого зерна. В качестве лабораторной была принята установка УЗУ 4-1.6-О, которая позволяет изменять частоту ультразвуковых колебаний и температуру воды, что дает возможность определять рациональные интервалы режимных параметров обработки (рисунок 3.3).

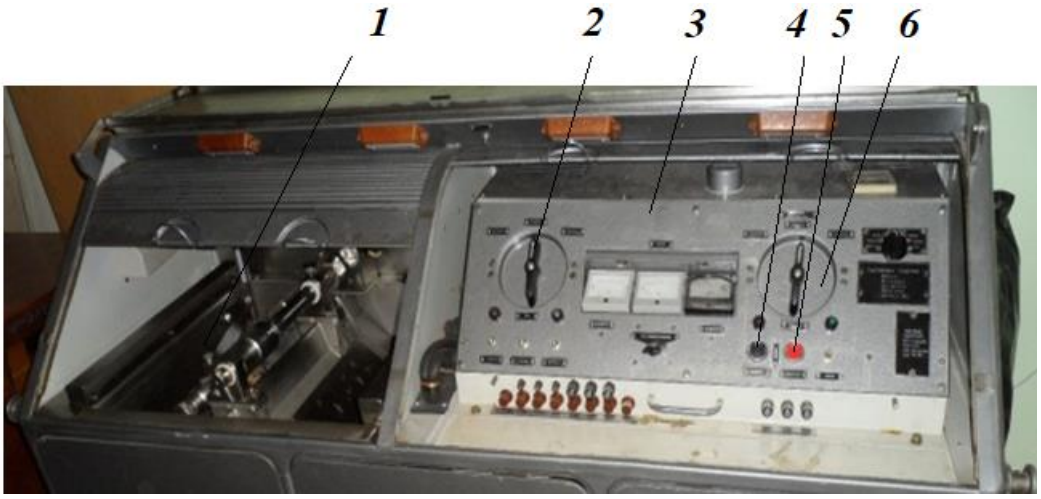


Рисунок 3.3 – Лабораторная установка УЗУ 4-1.6-О: 1 – ультразвуковая ванна; 2 – переключатель питания ультразвука между ваннами; 3 – панель прибора; 4 – кнопка «пуск»; 5 – кнопка «стоп»; 6 – переключатель питания ТЭНов двух ванн

За основные качественные показатели принимали: абсолютное количество минеральных загрязнений поверхности зерна, зольность, влажность, содержание белка, клейковины, микротвердость.

Количество повторений опытов рассчитывали с учетом заданной надежности, равной 0,95, по формуле:

$$\Delta n(\alpha) = \pm 3\sigma, \qquad (3.1)$$

где σ – заданная надежность опыта.

Принята трехкратная повторяемость опыта.

Для определения физико-механических свойств зерна пшеницы были использованы стандартные и частные методики.

3.3.1 Методика и средства лабораторных исследований

Экспериментальные исследования проводили по известным методикам. Для оценки увлажнения зерна и его очистки отбирали пробы до и после обработки. Обработку зерна в ультразвуковой установке осуществляли при изменении трех параметров (время обработки, частота, температура), каждый из которых имел четыре значения. Экспериментальным исследованиям подвергали 48 образцов зерна пшеницы, обработанных при разных режимах.

Для обработки экспериментальных данных каждому образцу был присвоен шифр, соответствующий параметрам обработки (приложение П).

Все контрольные замеры производили после обработки в установке и отжима на центрифуге с максимальной частотой вращения в течение 30 с.

3.3.2 Методика определения абсолютного количества минеральных загрязнений на поверхности зерна

Загрязнения на поверхности оболочки зерна определяли по частной методике, основанной на микроаналитическом способе фиксации площадей загрязнения. Размеры площадей загрязнений, используемые в последующих расчетах, брали с масштабированных фотографий оболочки зерна, особенно в местах концентрации загрязнений – в бороздке и бородке. Съемки осуществляли с помощью электронного микроскопа DTX350LCD. Площади загрязнения рассчитывали с использованием программы КОМПАС-3D с соблюдением установленного масштаба [254, 263].

Общую площадь загрязнений $S_{общ}$ (мм^2), отображенных на снимке, рассчитывали по формуле:

$$S_{общ} = \sum_{i=1}^{n} S_i, \qquad (3.2)$$

где S_i – площадь i-х поверхностей частиц загрязнения, мм^2;

i – количество частиц загрязнений, шт.

Основные загрязнения находятся в бородке и бороздке зерна, поэтому для расчета общей загрязненности применяли формулу:

$$S_{общ} = S_б + S_{бор}, \quad (3.3)$$

где $S_б$ – общая площадь минеральных частиц, находящихся в бородке зерна, мм^2;

$S_{бор}$ – общая площадь минеральных частиц, находящихся в бороздке зерна, мм^2.

Общая площадь минеральных загрязнений $S_{общ(б,\ бор)}$, находящихся в бородке и бороздке:

$$S_{общ(б,бор)} = \sum_{i=1}^{m} S_i^j, \quad (3.4)$$

где S_i^j – площадь i-х поверхностей частиц загрязнения в бороздке и бородке, мм^2;

i – количество частиц загрязнения в бороздке и бородке, шт.

По закону Гаусса из всего количества семян было выбрано в случайной последовательности 25 зерен.

Для расчета среднего значения суммарной площади всех видимых загрязнений на поверхности исследуемого зерна $S_{ср}$ использовали выражение:

$$S_{ср} = \frac{\sum_{z=1}^{g} S_z}{25}, \quad (3.5)$$

где S_z – общая площадь частиц загрязнений, находящихся на поверхности z-х зерен, мм^2.

Площадь всех загрязнений на зерне $P(S)$:

$$P(S) = \sum_{i=1}^{n} P_i(S_i), \quad (3.6)$$

где S_i – площади i-х поверхностей частиц загрязнения, мм^2;

n – количество исследуемых зерен.

3.3.3 Методика определения микробиологических показателей пораженного зерна

Для исследования эффективности обработки партии зерна массой 300 г подвергали воздействию ультразвука в диапазоне частот 20–35 кГц в ультразвуковых установках при разной интенсивности ультразвуковых волн (от 0,3 до 1 Вт/см^2) от 1 до 40 мин с раствором анолита АНК и без него.

Контролем служили нативное зерно (контроль I) и зерно, подвергавшееся воздействию ультразвука в воде (контроль II). Микробиологические исследования проводили по ГОСТ Р 51278-99 [247]. Зерно исследовали на наличие бактерий и плесневых грибов на третий, четвертый и пятый день после высева на агаризованную питательную среду путем подсчёта колоний [247].

3.4 Методика определения основных качественных показателей зерна сои

Зерно сои должно удовлетворять ряду обязательных требований, направленных на обеспечение безопасности продукции для жизни и здоровья людей и животных. К числу нормируемых показателей относятся наличие сорной и масличной примесей, органолептические свойства сырья, влажность, а также зараженность вредителями. Зерна сои должны иметь форму, цвет и запах, свойственные нормальным семенам, без затхлого, плесневого и постороннего запахов. Содержание крупной и явно выраженной сорно-масличной примеси определяли по ГОСТ 10854-88 «Семена масличные. Методы определения сорной, масличной и особо учитываемой примеси» [131].

Методы определения цвета и запаха основаны на органолептической оценке исследуемого признака по ГОСТ 27988-88 «Семена масличные. Методы определения цвета и запаха» [132]. Цвет семян оценивали визуально при рассеянном дневном свете. Семена рассыпали тонким сплошным слоем, затем определяли соответствие их цвета описанию этого признака в стандарте на исследуемую культуру. Запах может быть определен как по целому, так и размолотому зерну. Материал помещали в чашку, после чего устанавливали наличие или отсутствие постороннего запаха.

Влажность сырья определяли воздушно-тепловым методом по ГОСТ 10856-96 «Семена масличные. Метод определения влажности» [133]. Сущность метода заключается в нахождении разности масс высушенных и

увлажненных семян. Навеску массой 20 г помещали в сетчатые бюксы и предварительно подсушивали в течение 10 мин. При этом в течение первых 4 мин обеспечивали плавное восстановление температуры от 110 до 105 °С.

Зараженность вредителями определяли по оценке сходов в соответствии с ГОСТ 10853-88 «Семена масличные. Метод определения зараженности вредителями» [134]. Сходы получали путем последовательного просеивания выдержанного при комнатной температуре зерна в наборе сит с отверстиями диаметром 2,5 мм (верхнее сито) и 1,5 мм (нижнее). Просеивание можно осуществлять механизированным или ручным способом в течение 2 мин.

Массовую долю жира оценивали в соответствии с ГОСТ 13979.2-94 «Жмыхи, шроты и горчичный порошок. Метод определения массовой доли жира и экстрактивных веществ» [136]. Методика основана на извлечении экстракцией жира и экстрактивных веществ из измельченного продукта.

Суммарную массовую долю растворимых протеинов в масличных семенах устанавливали по ГОСТ 13979.3-68 «Жмыхи и шроты. Метод определения суммарной массовой доли растворимых протеинов» [137]. Сущность метода состоит в выделении водо- и щелочерастворимых протеинов и количественном определении их по методу Кьельдаля. Анализ позволяет оценить содержание белка в исследуемом сырье.

Содержание клетчатки определяли по ГОСТ Р 52839-2007 «Корма. Методы определения содержания сырой клетчатки с применением промежуточной фильтрации» [279]. Сущность метода заключается в обработке исследуемого материала кислотными и щелочными растворами, его сжиганием и количественным выражением органического остатка методом взвешивания.

3.4.1 Методика определения степени измельчения зерна сои

В результате измельчения зерна сои увеличивается поверхность обработки, что ведет к ускорению процесса массопередачи, растворению и выделению антипитательных веществ белкового происхождения. Основной харак-

теристикой является степень измельчения. Дисперсность оценивали по размерам мелкого измельчения в интервале 5,0 мм (размер нативной сои) и 2,5 мм; 2,0; 1,5; 1,0 мм – размеры измельченных частиц.

Гидродинамические исследования проводили при 8-часовой длительности процесса, температуре раствора 23 °С с фиксацией показателей инактивации ингибитора трипсина и уреазы для каждых из установленных размеров частиц. Исходя из полученных результатов рассчитывали показатели сопротивления диффузии, объясняющие эффективность массопередачи.

Для формирования объектов исследования измельченную сою просеивали через сита с размерами ячеек 2,5 мм; 2,0; 1,5; 1,0 мм. Полученные в результате гидростатической массопередачи зависимости сопротивления диффузии от дисперсности частиц являются общими для исследования различных методов инактивации.

3.4.2 Методика определения активности ингибитора трипсина

Тормозящее действие ингибиторов, оказываемое на ферменты пищеварительного тракта, определяли казеинолитическим методом М. Л. Какейда (в модификации И. И. Бенкена), апробированным на различных зерновых и бобовых культурах [255]. Метод основан на спектрофотометрическом измерении (при 280 нм) величины оптической плотности продуктов распада белкового субстрата (казеина) под действием фермента (трипсина, химотрипсина).

3.5 Методика определений качественных показателей нерафинированных растительных масел высокой пищевой ценности

При очистке нерафинированных растительных масел преследовали цель определения параметров, характеризующих качественное состояние продукта в периоды времени, установленные для исследований. Процесс изменения качества масла непрерывен и зависит прежде всего от кислотных составляющих в нем, относящихся к первичным продуктам окисления, и всевозможных загрязнений, поступающих в конечный продукт от структурных составляющих семян подсолнечника и из внешней среды – вторичных продуктов окисления. Необходимость оценки кислотного состояния в функции времени от производства объясняется схемой окисления, представленной на рисунке 3.4.

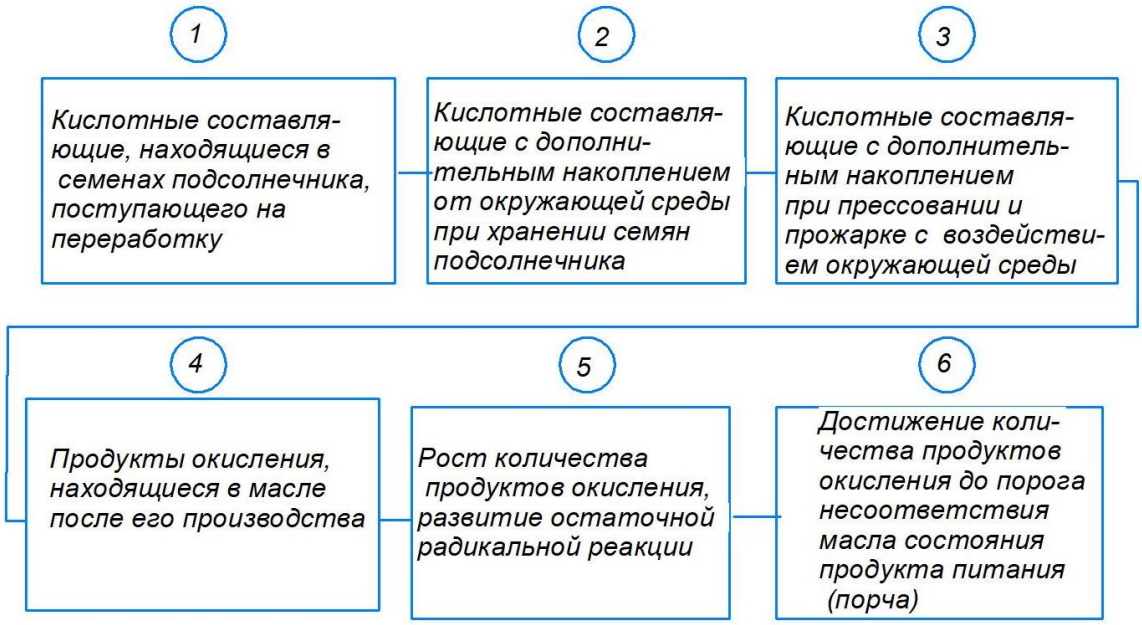


Рисунок 3.4 – Последовательность развития окислительного процесса в нерафинированном растительном масле

Проверке подвергали следующие показатели нерафинированных растительных масел:

- кислотное число – основной показатель качества масла, характеризующий степень гидролиза липидов;

• перекисное число, характеризующее содержание перекисных соединений – продуктов окисления жирных кислот;

• анизидиновое число, отражающее содержание в масле вторичных продуктов окисления – альдегидов, кетонов;

• цветное число, устанавливающее количественные оценки цвета и интенсивности окраски (изменяется при окислении масла);

• содержание токоферола, характеризующее антиоксидантные свойства масла;

• количество взвешенных частиц в масле.

При производстве растительного масла два первых параметра, представленных на рисунке 3.4, не принимают во внимание, так как технологически воздействовать на них не представляется возможным.

При экспериментальных исследованиях технологии очистки растительных масел все перечисленные параметры изучали с момента производства с передачей на хранение. Дальнейшее изменение состояние масла исследовали при хранении в течение 1 мес., 2, 3, 4, 5 и 6 мес. Исходя из анализа этих данных можно принять конкретные технологические, а в последующем и технические решения.

3.5.1 Методика определения токоферолов

Токоферолы определяют согласно ГОСТ 30417-2018 [257]. Массовую долю витамина Е устанавливают методом тонкослойной хроматографии.

Для определения токоферола в масле при производстве, хранении и очистке наиболее предпочтителен способ, описанный в патенте А. В. Великова и Н. К. Сизовой [257]. Кумол при комнатной температуре помещают в микрокалориметр, добавляют азобисизобутиронитрил, регистрируют количество тепла, которое выделяется при окислении, измеряют период индукции.

Количество токоферола вычисляют по формуле:

$$\left[I_{\text{п}}H\right]_0 = \frac{W_i \tau_0}{f_0}, \tag{3.7}$$

где W_i – начальная скорость инициирования, л/моль·с;

τ_0 – время действия ингибитора с учётом распада инициатора, с;

f_0 – коэффициент ингибирования.

3.5.2 Методика исследования проницаемости фильтрующей перегородки в зависимости от её загрязнённости

Проницаемость фильтрующей перегородки оценивали согласно разработанной частной методике с учетом показателя производительности установки по количеству выхода очищенного масла в единицу времени. Для этих целей использовали ультразвуковую установку, внешний вид которой представлен на рисунке 3.5.

Рисунок 3.5 – Ультразвуковая установка для обработки масла

Технически лабораторная установка выполнена по схеме, представленной на рисунке 3.6. В ней предусмотрена возможность регулирования угла наклона фильтрационной поверхности с целью перемещения осажденных и накопленных на ней загрязнений с нарушенной вибрационным механизмом седиментационной устойчивостью. Перемещение продутов фильтрата осуществляется направленным воздействием ультразвуковых микропотоков, вырабатываемых пьезоэлектрическими возбудителями.

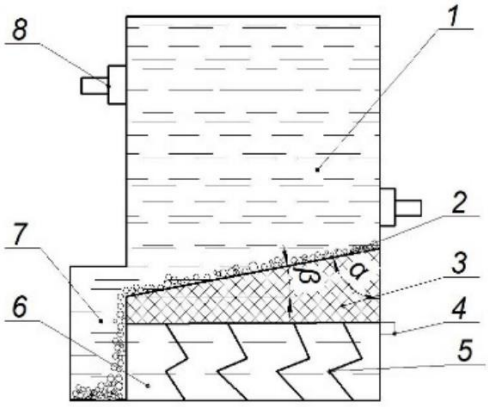


Рисунок 3.6 – Схема ультразвуковой вибрационной установки для определения проницаемости фильтрующей перегородки: 1 – ёмкость с маслом; 2 – фильтрующая перегородка; 3 – картридж с адсорбентом; 4 – сливной патрубок; 5 – вибрационный механизм; 6 – очищенное масло; 7 – ёмкость-отстойник; 8 – ультразвуковой возбудитель

Проницаемость адсорбирующей фильтрационной перегородки оценивали в зависимости от загрязнения её поверхности осажденными частицами и от времени прохождения масла через перегородку, регулируя расход патрубком.

3.5.3 Методика исследования взвешенных частиц в масле

Твердые составляющие в нерафинированных маслах после центрифугирования и осаждения находятся во взвешенном мелкодисперсном состоянии, размеры частиц – 0,5–10,0 мкм. С течением времени хранения двухфазная система сред нерафинированного масла состоит из дисперсионной сплошной среды и мелкодисперсной фазы продуктов загрязнений. Методы разделения этих фаз выбирают в зависимости от их свойств с учетом физического и химического состояния. В разработанной технологии их одновременно подвергают адсорбционной очистке от окисляющих составляющих и десорбционной очистке от мелкодисперсных частиц. Они осаждаются на фильтрационной поверхности и выносятся в сборник. Коагуляционный процесс, протекающий при очистке масла, ведет к постепенному сгущению и свертыванию частиц дисперсной фазы.

Для изучения кинетики образования мелкодисперсных частиц взвеси при очистке использовали частную методику, основанную на определении количества взвешенных частиц в очищенном адсорбцией масле. Количественные показатели оценивали с помощью прибора контроля чистоты жидкости ПКЖ-904 в установленном объеме масла 100 см^3.

3.6 Методика производственных испытаний технологий и технических средств

Для оценки качественных показателей обработки зерна сои, пшеницы и нерафинированного растительного масла использовали существующие методики. Исследования нестандартных параметров технологий и технических средств осуществляли по разработанным частным методикам, основанным на детальном изучении режимных и конструктивных параметров.

Проведены исследования и осуществлена разработка инновационных технологий ультразвуковой обработки: зернобобовой культуры на примере зерна сои для удаления антипитательных веществ; зерна пшеницы для подготовки к помолу путем очистки оболочки от минеральных примесей, следов зараженности и увлажнения; нерафинированных растительных масел для очистки и снижения кислотности.

Разработанные технологии явились основой для конструктивных разработок установок, использованных при экспериментальных исследованиях. Опытно-конструкторские установки, внедренные в производство, прошли производственные испытания.

3.6.1 Методика производственных испытаний универсальной шнековой ультразвуковой установки непрерывного действия

Проверку на соответствие конструкторской документации предлагаемой установки осуществляли по рекомендациям ГОСТ 2.114-95 [308] и ГОСТ 2.102-68 [309], согласно которым в качестве основных технических условий были приняты следующие:

- установка должна быть непрерывного действия с автоматической загрузкой и выгрузкой обрабатываемого материала;
- шнековый механизм с винтовым шнеком должен обеспечивать продвижение суспензии в зонах УЗ-обработки и отжима;
- установка должна быть спроектирована на основе шнекового подающего механизма суспензии из зерна (50 %) и воды (50 %);

• длина транспортирующей части шнека в зоне обработки суспензии ультразвуковыми излучателями должна быть достаточной для одноминутного нахождения суспензии в зоне обработки; время прохождения суспензии должно обеспечиваться шагом винта шнека и регулируемой частотой вращения шнека;

• ультразвуковые возбудители должны быть установлены на трубе шнекового механизма в начале и конце емкости для УЗ-обработки под встречными углами с условием максимального охвата перемещаемого объема суспензии колебательными движениями;

• в установке должны быть предусмотрены устройства для поддержания температурного режима, автоматической подпитки воды, сжатия суспензии для отжима излишков воды и выгрузки обработанного зерна;

• используемые материалы должны быть совместимы с требованиями на производство пищевых продуктов;

• требования назначения должны содержать свойства получаемой продукции, определяющие ее основные функции, для выполнения которых она предназначена, соответствовать требованиям к производительности, точности, быстроте обработки, прочности, содержанию компонентов;

• соответствие требованиям надежности установки при выполнении своих функций с заданной эффективностью;

• требования безопасности должны учитывать все виды допустимой опасности и способствовать обеспечению безопасности установки в течение срока её службы.

Окончательным документом конструктивного соответствия является акт рассмотрения и приемки опытно-конструкторской документации с предприятием-изготовителем (ООО «Химмаш-Старт», г. Пенза). Соответствующие акты представлены в приложениях *Ж* и *И*.

3.6.2 Методика производственных контрольных испытаний опытного образца ультразвуковой шнековой установки

В соответствии с ГОСТ 2.001-2013 [3010] и ГОСТ Р 54783-2011 [311] разработку документов, изготовление и испытание опытных образцов оборудования выполняли в следующей последовательности:

1. Разработка конструкторской и технологической документации оборудования.

2. Изготовление опытного образца и проведение функциональных контрольных испытаний соответствия конструкторской документации.

Согласно ГОСТ Р 54783-2011 [311], целью испытаний являлось определение качественных и количественных характеристик установки при её функционировании. Видом испытаний назначен типовой. Установлены параметры, приемы, способы, режимы контроля, соответствующие требованиям и характеристикам разработанной конструкции установки.

Опытную конструкцию установки проверяли на соответствие конструкторской документации (приложение *И*) по параметрам качества функционирования основных элементов.

Конструкция шнековой установки представляет собой шнековый механизм, расположенный на едином валу, и включает в себя приводную станцию, состоящую из мотор-редуктора марки МПЧ-80М-80-18,8, передаточной муфты и системы уплотнения, обеспечивающей защиту подшипников качения от протекания и попадания жидкости с рабочих зон.

Установка для ультразвуковой обработки продукции растениеводства работает следующим образом.

Обрабатываемый материал из бункера по трубопроводу загружается в зону для образования суспензии, продвижение которой осуществляется винтовым механизмом шнека.

Основная ультразвуковая обработка материала происходит во время его продвижения в зоне, имеющей проем в верхней части для ультразвуковой колебательной системы УЗТЛ. Время продвижения обрабатываемой суспензии обеспечивается регулируемой частотой вращения шнека.

Подпитка жидкости в рабочей зоне осуществляется из емкости поплавкового типа.

Обрабатываемый материал по мере продвижения за счет наклона шнекового механизма и винтового механизма проходит стадию предварительного отжима.

Окончательный отжим обрабатываемого материала от излишков воды осуществляется в камере отжима за счет изменения градиента давления и сдавливания. Высвобожденная вода поступает снова в рабочую зону, тем самым обеспечивается экономия потребляемой воды.

На выходе установки обработанный материал имеет влажность 80 %.

3.6.3 Методика производственных испытаний ультразвуковой установки для фильтрации растительного масла

Проверку на соответствие конструкторской документации проводили по рекомендациям ГОСТ 2.114-95 [308] и ГОСТ 2.102-68 [309], согласно которым в качестве основных технических условий были приняты следующие:

- установка должна быть непрерывного действия с автоматической загрузкой и выгрузкой обрабатываемого материала;
- емкость установки должна быть цилиндрического типа для устранения возможности образования «мертвых зон»; разовая заполняемость емкости – 100 л масла;
- картридж с заполняемым минеральным сорбентом должен составлять 10 % емкости установки;
- необходимо предусмотреть схему картриджа для замены сорбента и обеспечить высокую герметичность привалочной плоскости;

• верхняя поверхность картриджа должна быть выполнена под углом 10°…15° для обеспечения направленного скатывания продуктов фильтрации в емкость сборника загрязнений;

• обрабатываемое масло должно перемешиваться в окружном направлении, частота перемешивания незначительная – 10 мин$^{-1}$;

• ультразвуковые возбудители следует устанавливать в верхней и нижней частях емкости под встречными углами, во взаимно противоположенном направлении с условием максимального охвата очищаемого масла ультразвуковыми колебательными движениями;

• слив очищенного масла должен осуществляться краном, установленным в донной части емкости.

Окончательным документом конструктивного соответствия является акт рассмотрения и приемки опытно-конструкторской документации предприятием-изготовителем (ООО «Химмаш-Старт», г. Пенза). Соответствующие акты представлены в приложениях *З* и *К*.

3.6.4 Методика производственных контрольных испытаний опытного образца ультразвуковой фильтрационной установки

Фильтрационная установка представляет собой емкость, внизу которой расположен наклонный фильтрующий элемент (приложение М).

Масло через пробку заливают в корпус установки. Во время фильтрации в нем создаются направленные микротечения с помощью ультразвуковых излучателей, расположенных в противоположенных направлениях для устранения застойных зон.

В корпусе имеется лопастная мешалка, приводимая во вращение мотор-редуктором 6МЦЗФ-17ES-65.61-32292. Картридж в установке съемный, что позволяет производить его замену.

При фильтрации масла осадок сходит с фильтрационной мембраны, расположенной под углом 15°, в отстойник. Очищенное масло, прошедшее через

картридж, выводится через кран внизу установки. Асинхронный электродвигатель АИР71В6 (0,55 кВт, 920 мин$^{-1}$) позволяет производить вибрационные встряхивания картриджа для ускорения схода осадка.

3.6.5 Обработка экспериментальных данных и оценка их точности

При проведении экспериментов выполнялись условия для получения достоверных данных опытных измерений. Для точности результатов при обработке данных использовали методы математической статистики. Для исследуемых параметров применяли методики, установленные соответствующими ГОСТами, дополненные разработанными частными методиками. Измерения проводились в установленной последовательности и в необходимом количестве. Строго проводился контроль факторов, которые влияют на условия эксперимента.

Обработку значений экспериментальных данных осуществляли по средним величинам наименьших квадратов (Приложение Ф).

Выводы по главе

1. В работе применяли стандартные и частные методики исследований, описанные в патентах и рекомендациях.

2. Исходя из принятых методик, определены значимые контролируемые параметры зерна пшеницы, сои и растительного нерафинированного масла.

3. Определены основные параметры, учитываемые при проведении экспериментальных исследований: частота ультразвуковых колебаний, температура, время обработки.

4. Подобрано лабораторное оборудование, позволяющее варьировать температуру обработки, ее время и частоту ультразвуковых колебаний.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА УЛЬТРАЗВУКОМ

4.1 Результаты экспериментальных исследований зерна при стандартной схеме подготовки к простому помолу в обойную муку

4.1.1 Исследование загрязненности оболочки зерна

При производстве обойной муки в размол поступает целое зерно, которое подвергают сухому шелушению. Внешне его биологическое строение у различных сортов пшеницы приктически не имеет отличий. И если на ровной поверхности загрязнения минеральными отложениями и следами микроорганизмов при шелушении очищаются неплохо, то такие участки, как бороздка и бородка, практически не очищаются. Они являются концентраторами вредных составляющих, 2/3 которых приходится на минеральные микроотложения и 1/3 – на отложения от вредителей – насекомых и плесневых грибов. Их наличие в муке нежелательно по причинам снижения качества и возможности в последующем образования микотоксинов.

Для исследований выбрали сорт пшеницы Саратовская 29, из-за широкого распространения в Поволжье.

Первым исследуемым параметром являлась загрязненность. Ее проверку осуществляли новым разработанным коллективом авторов микроаналитическим методом колличественного определения загрязненности оболочки зерна, включая зоны бородки и бороздки [254, 263]. Данный метод предназначен для исследовательских лабораторных работ, для использования в практических целях он не применим. Проверке подвергали 25 зерен, прошедших операцию сухого шелушения.

Исследуемое зерно имело следующие физико-химические характеристики: влажность – 12,5 %; зольность – 1,5–2,2 %; содержание клейковины – 24,5 %; микротвёрдость эндосперма – 15 кг/мм^2; содержание

белка – 11,5 %. На поверхности зерна при четырехкратном увеличении (рисунок 4.1) отчетливо видны загрязнения минеральными примесями, особенно вдоль бороздки и в бородке. Необходимо отметить, что при осмотре зерна без микроскопа зерновка казалась визуально чистой.

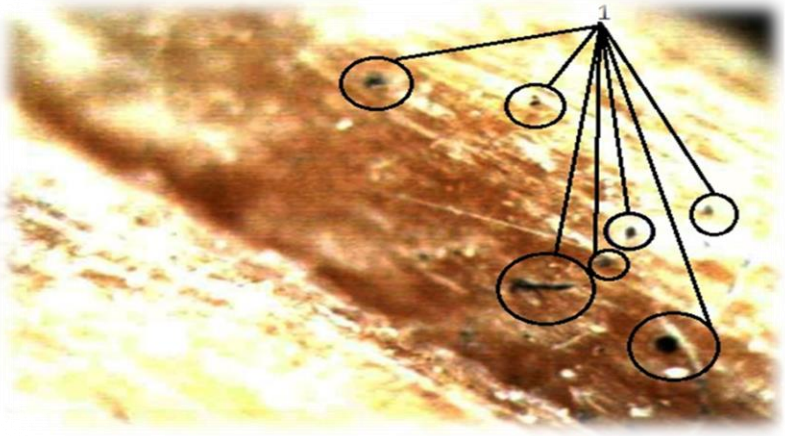


Рисунок 4.1 – Минеральные загрязнения в бороздке зерна (4×)

В соответствии с принятой методикой оценивали загрязненность оболочки зерна (рисунок 4.2), не определяемую обычными способами. Исходя из результатов микроаналитического анализа, установлено, что наблюдаемая сверхнормативная загрязненность зерна должна привести к повышению его зольности и, как следствие, к ухудшению качества муки.

Рисунок 4.2 – Загрязнение участка зерна (100×)

Данные, представленные на рисунках 4.1 и 4.2, подтверждают целесообразность более тщательной очистки оболочки зерна перед простым помолом.

В настоящее время при подготовке зерна к простому помолу для производства обойной муки используют сухое шелушение, которое осуществляют в обоечных машинах, предназначенных для шелушения, удаления минеральных примесей, отделения зародыша, бороздки и бородки. Длительная обработка зерна в обоечных машинах при производстве обойной муки нерациональна, так как ведет к значительным потерям ценных свойств клетчатки, зародыша и некоторой части алейронового слоя. Щадящая обработка обеспечивает недостаточную очистку оболочки зерна от минеральных отложений и следов зараженности. В итоге сухая обработка позволяет снизить зольность всего на 0,01–0,07 %. Это является проблемой, не позволяющей достигать высокого качества очистки. Относительная частота площадей загрязнений зерна минеральными примесями и следами зараженности в зонах бороздки и бородки зерна представлена на рисунке 4.3, а данные о загрязненности зерна – в приложении *П*.

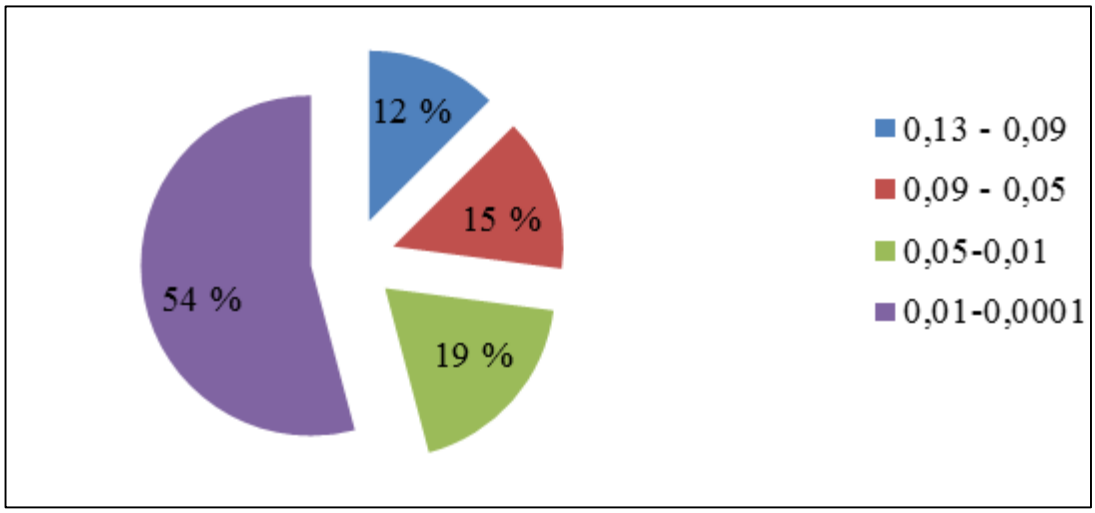


Рисунок 4.3 – Относительная частота площадей загрязнений зерна минеральными примесями и следами зараженности в зонах бороздки и бородки

Исследования загрязнений зерна после сухой очистки показали, что остаточная относительная частота загрязнений составила 54 % в интервале площадей загрязнений 0,0001–0,01 мм^2, 19 % – в интервале 0,01–0,05 мм^2, 15 % – в интервале 0,05–0,09 мм^2 и 12 % – в интервале 0,09–0,13 мм^2.

В результате проведенных исследований установлено, что после сухой очистки из зерна практически не удаляются загрязнения минеральными примесями и плесневыми грибками в области бороздки и бородки, что является явным недостатком технологии подготовки зерна к помолу.

Все загрязнения переходят в муку и увеличивают зольность, а следовые количества плесневых грибков приводят к образованию микотоксинов с последующей порчей готовых продуктов.

4.1.2 Исследование зольности зерна

Параметры показателей качества очистки зерна взаимосвязаны с показателем зольности, влияющим на качество муки.

В начальный момент, в состоянии поставки, зольность зерна в среднем составляет 1,5–2,2 %. По ГОСТ 26574-2017 [312] зольность должна быть не более 0,45 – 2 % для разных видов муки. Высокая концентрация загрязнений и следов зараженности при подготовке зерна в обойной машине не ведет к значительному снижению этого показателя.

На долю оболочки зерна приходится 24,5 % общего показателя зольности, поэтому при некачественной очистке значительная часть загрязнений переходит в муку. Сухая очистка позволяет снизить зольность до 1,05–1,8 %.

Относительная частота зольности зерна после операции сухого шелушения представлена на рисунке 4.4 и в приложении *О*.

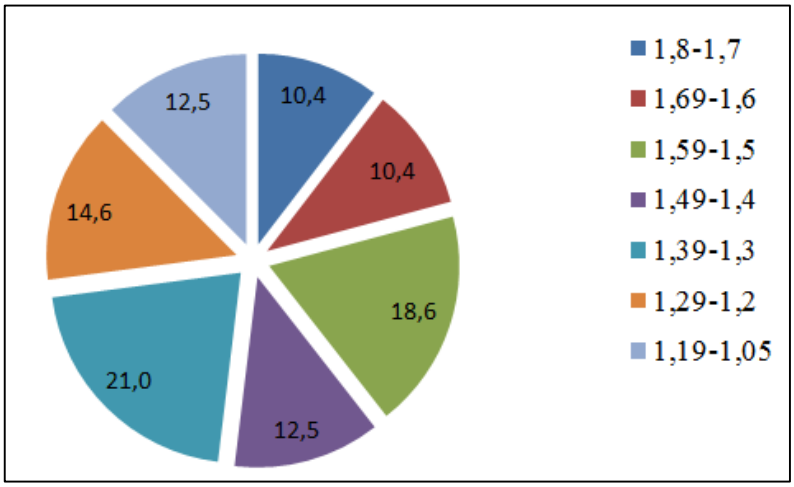


Рисунок 4.4 – Относительная частота остаточной зольности зерна после сухого шелушения, %

Анализ показал, что сухая очистка из-за биологической особенности зерна, при достаточно высокой чистоте оболочки, но при наличии загрязнений в недоступной зоне бороздки и бородки, не позволяет удалить все минеральные загрязнения, что ведет к повышению зольности зерна. Данное обстоятельство свидетельствует о высокой значимости операции очистки поверхности зерна и необходимости более эффективной его обработки при подготовке к простому помолу.

4.1.3 Исследование влажности зерна

Влажность зерна является одним из основных показателей, влияющих на качество муки. Для получения кондиционной муки проводят гидродинамическую или гидротермическую обработку зерна. Эти операции основаны на холодном, горячем или скоростном кондиционировании, обеспечивающем стабилизацию влажности зерна в помольной партии в пределах нормируемых значений.

Действующие в настоящее время способы увлажнения не позволяют добиваться достаточной и стабильной равномерности увлажнения всех зерен в массе поступающего зерна. Используемое при простом помоле отволаживание характеризуется низкой производительностью, неудовлетворительной стабильностью параметров увлажнения [265]. Сначала влага проникает в оболочки, затем в эндосперм, вызывая внутренние напряжения из-за неравномерности набухания зерна. В результате этого образуется сетка микротрещин, приводящая к разупрочнению эндосперма и ускорению проникновения влаги внутрь. Время протекания и завершения операции увлажнения прямо пропорционально скорости процесса массопередачи и напрямую зависит от применяемого способа кондиционирования. Качество и стабильность процесса увлажнения зависят от доступа к проникновению влаги к структуре зерна. Добиться равномерного

подхода влаги к каждому отдельно взятому зерну не представляется возможным по причине плотного прилегания зерен друг к другу. Чем больше объем емкости для отволаживания, тем выше плотность прилегания зерен и тем нестабильнее процесс увлажнения.

Относительная частота влажности зерна представлена на рисунке 4.5 и в приложении *П*.

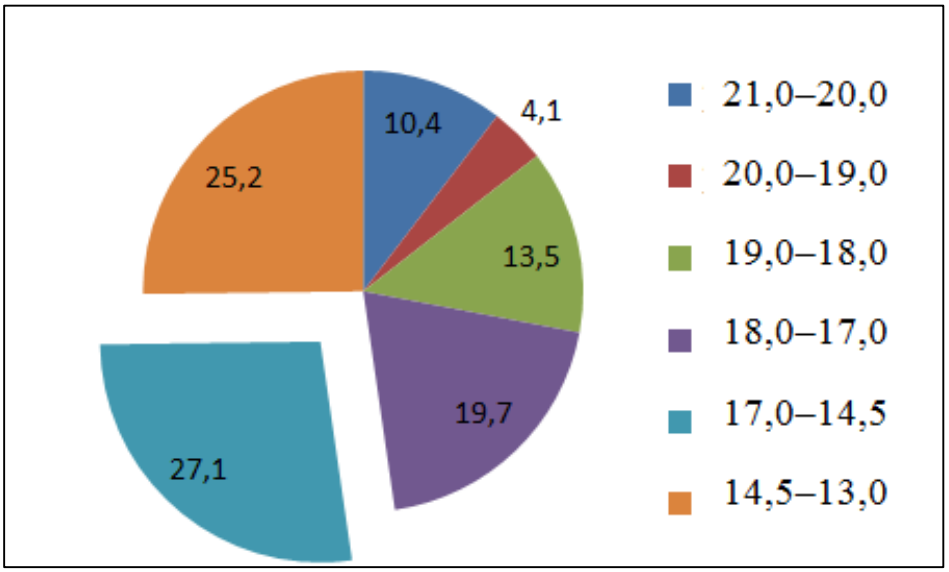


Рисунок 4.5 – Относительная частота влажности зерна, %

В ходе экспериментальных исследований установленно, что достигаемая влажность зерна при принятой технологии холодного кондиционирования не стабильна и находится в пределах 13,0–21,3 % (см. рисунок 4.5). Это технологически недопустимо, так как ведет к производству муки низкого качества и обусловливает необходимость стабилизации процесса увлажения с обеспечением нормируемого показателя влажности 14,5–17,0 %.

Нормативных показателей влажности 14,5–17,0 % достигло только 27,1 % зерна пшеницы, поступающего в размол, 43,6 % было с повышенными прочностными показателями сверх нормы, а 27,7 % – ниже нормы, что свидетельствует о необходимости стабилизации процесса увлаженения зерна.

Для существенного повышения качеста муки необходима более тщательная подготовка зерна к помолу.

Исходя из данных экспериментальных исследований установлено, что

технологической задачей является необходимость повышения стабильности увлажнения зерна в строго нормируемых интервалах влажности.

4.1.4 Исследование прочностных свойств зерна

Прочностные свойства зерна характеризуются его микротвердостью, которая относится к основным структурно-механическим характеристикам зерна при его помоле и зависит от достижения нормативных помольных показателей влажности.

Прочность зерна влияет на характер разрушения зерновки при помоле, причём с увеличением влажности наблюдается снижение микротвердости, что подтверждено исследованиями. Коэффициент корелляции микротвердости и влажности 0,86 свидетельствует о наличии статистически значимой связи между ними. Это связано с набухаемостью эндосперма и алейронового слоя в процессе массопередачи и образованием микротрещин. При анализе экспериментальных исследований (рисунок 4.6) установлено, что относительная частота микротвердости зерна была наибольшей (25 %) в интервале 13,5–13,8 кг/мм^2. Статистические данные представлены в приложении *П*.

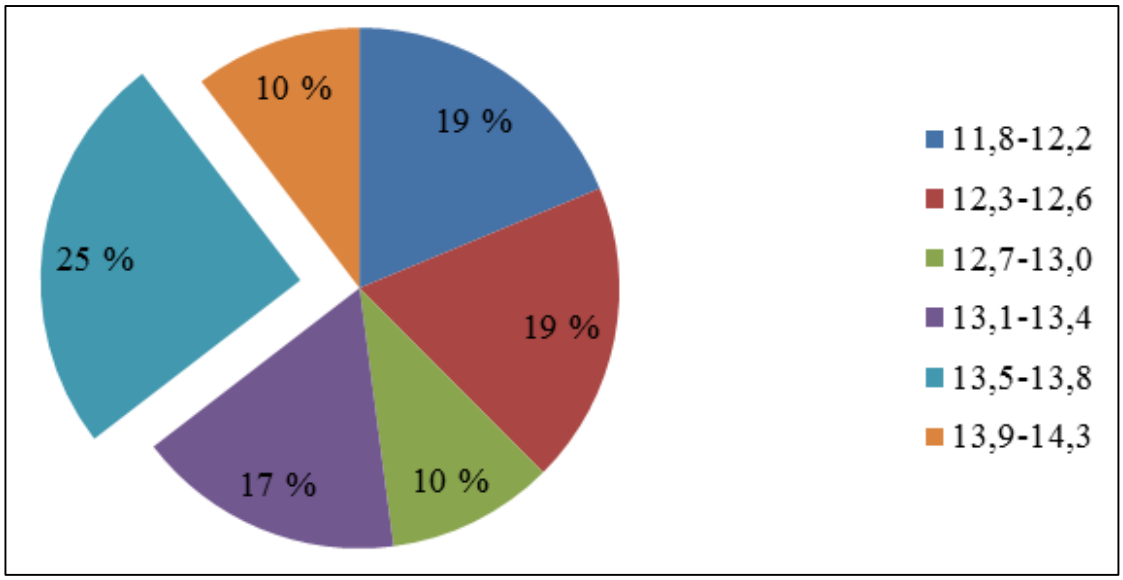


Рисунок 4.6 – Относительная частота микротвёрдости зерна при холодном кондиционировании, %

На рисунке 4.6 прослеживаются три зоны прочностного состояния. Первая

зона характеризуется повышенной микротвёрдостью 13,5–14,3 кг/мм^2, приводящей к укрупненной фракции муки, вторая зона – с пониженной микротвёрдостью 11,8–12,6 кг/мм^2, при которой мука получается с плохо разрыхленным эндоспермом, и третья зона с приемлемыми показателями 12,6–13,4 кг/мм^2.

Разброс показателей микротвёрдости свидетельствует о нестабильности процесса увлажения зерна при его подготовке к помолу и о свойствах, не способствующих продвижению влаги и повышению общей пластичности зерна, что отрицательно сказывается на качестве муки [264]. Применяемая технология холодного кондиционирования, принятая для простого помола, не позволяет достичь требуемой пластичности зерна, а также обеспечивает плохую и крайне не стабильную влажность, являющуюся одним из основных нормируемых помольных показателей. Зерно поступает на отволаживание с разной степенью влажности, и добиться стабильных показателей длительным отлеживанием в емкостях не представляется возможным. Отсюда и неизбежность получения муки низкого качества.

4.1.5 Исследование содержания клейковины в зерне

Клейковина зерна представляет собой комплекс его белковых веществ, способных при набухании в воде образовывать связную эластичную массу [244, 289]. При анализе содержания клейковины в зерне, обработанном методом холодного кондиционирования, установлен значительный разброс интервальных данных (рисунок 4.7 и приложение *П*).

Количество клейковины в зерне характеризует сортовой признак пшеницы. Если ее более 28 %, то пшеницу называют сильной, менее 23 % – слабой. Чем больше клейковины в муке, тем выше ее хлебопекарные свойства.

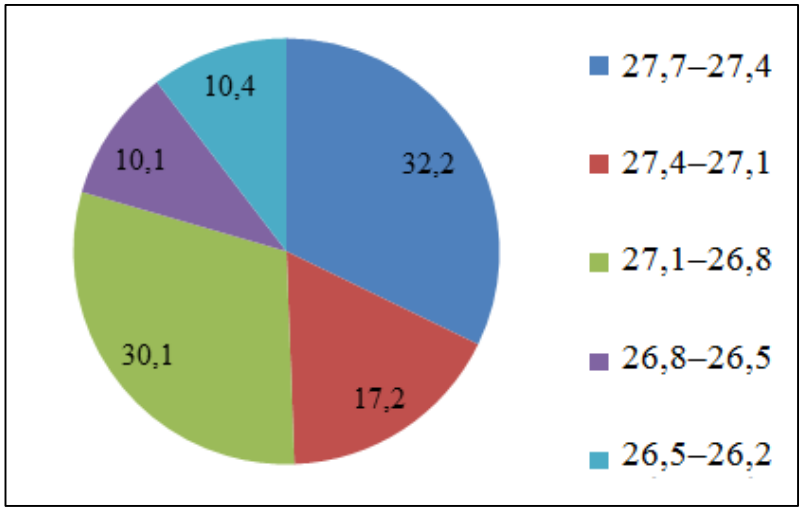


Рисунок 4.7 – Относительная частота содержания клейковины в зерне пшеницы, %

Анализ экспериментальных данных показал, что содержание клейковины в зерне находится в пределах 27,7–26,2 %. Только 32,3 % зерна достигает показателя содержания клейковины 27,4–27,7 %.

Свойства клейковины в основном складываются из наличия в макромолекулах белков дисульфидных связей и сульфгидрильных групп. На стабилизацию состояния связей микромолекул белка позитивное влияние оказывают внешние факторы, связанные с гидротермической обработкой зерна. Этим путем возможно укрепление клейковины, повышение ее эластичности и в целом перевод слабой клейковины в удовлетворительную.

Отличительной чертой экспериментальной партии пшеницы Саратовская 29 является то, что она изначально имеет удовлетворительный показатель клейковины, следовательно, при ее обработке следует уделять особое внимание сохранению хотя бы этого показателя на начальном уровне.

Таким образом, анализ количества клейковины в пшенице показал, что клейковину необходимо стабилизировать. Это приведет к повышению эластичности теста. Переход клейковины с уровня слабой в удовлетворительную повышает мукомольные свойства зерна.

4.2 Результаты экспериментальных исследований показателей зерна после ультразвуковой обработки

Теоретическими исследованиями установлены основные закономерности процессов массопередачи, интенсифицированных акустическими колебательными движениями. Определены интервальные граничные значения амплитуды, частоты, интенсивности и времени ультразвуковых воздействий.

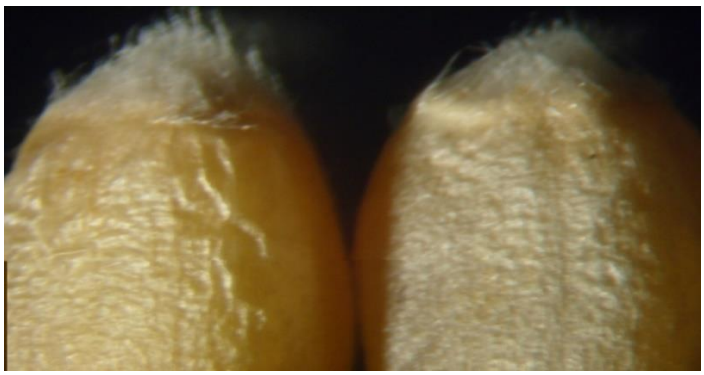
Экспериментальные исследования показали, что путем воздействия ультразвуком достигаются высокие показатели очистки и наблюдается начало шелушения оболочки зерна. Объясняется это тем, что ультразвук способствует возникновению мощных микроударных волн и микропотоков, порождаемых пульсирующими кавитационными схлопывающимися пузырьками. Пульсирующие многократные гидродинамические кумулятивные микропотоки при схлопывании кавитационных пузырьков отделяют от зерна поверхностные загрязнения, а также вызывают частичное отделение плодовой оболочки от алейронового слоя. Время и энергозатраты на проникновение влаги в алейроновый слой и эндосперм зерна значительно, в разы, сокращаются за счет интенсивного зарождения и создания сети микротрещин, впитывающих в себя влагу, постоянно направляемую пульсирующими микропотоками. Данное обстоятельство также свидетельствует об интенсификации процесса увлажнения структуры зерна путем увеличения движущей силы массопередачи за счет пульсирующих микропотоков.

Исходя из проведенных расчетов установлены рациональные режимно-конструктивные показатели, явившиеся основой для экспериментальных исследований параметров подготовки зерна к помолу (таблица 4.1).

При экспериментальных исследованиях для установления рациональных технологических режимов интенсификации процесса отволаживания зерна изучали интервалы температуры нагрева воды – 20 °С; 25; 30; 40 °С с переменными частотой ультразвука 18 кГц; 18,15; 18,3; 18,5 кГц и временем УЗ-обработки 20 с; 40; 60; 80 с [266]. На рисунках 4.8, 4.9, 4.10 представлены образцы зерна до и после акустической обработки.

Таблица 4.1 – **Сводные расчетные режимно-конструктивные параметры установки для обработки зерна**

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Максимальный радиус кавитационной полости R_{max}, м	0,00123	Интенсивность УЗ-волн I, Вт/см^2	0,99
Кавитационная область $E_{об}$, Дж	$0{,}77 \cdot 10^{-3}$	Направление распространения УЗ-волн β, град.	30
Частота УЗ-колебаний f, кГц	18	Длина установки h, м	1,1
Длина волны λ, м	0,083	Диаметр камеры УЗ-обработки, м	0,4
Амплитуда УЗ-колебаний A, м$^{-3}$	1,22	Объем камеры УЗ-обработки $V_к$, м^3	0,138
Расстояние от источника УЗ-колебаний, м	0,6	Диаметр источника УЗ, м	0,2
Коэффициент поглощения УЗ-волн α	$64 \cdot 10^3$	Количество источников УЗ, ед.	6



а *б*

Рисунок 4.8 – Состояние поверхности зерна (4×):
а – обработанного акустической кавитацией в воде;
б – необработанного

Рисунок 4.9 – Зерно, обработанное ультразвуком частотой 18 кГц в течение 30 с (4×)

Воздействие пульсирующих микропотоков на зерно приводит к образованию в нем микротрещин, которые заполняет вода, вызывая его набухание и надрыв оболочки, что в разы усиливает процесс массопередачи и, соответственно, отволаживания (см. рисунок 4.9).

Исследованиями установлено, что увеличение частоты и интенсивности

ультразвука приводит к разрушению плодовой оболочки и повреждению поверхности зерна (см. рисунок 4.10), что нежелательно.

Рисунок 4.10 – Зерно пшеницы после воздействия ультразвука частотой 20 кГц и интенсивностью 3 Вт/см^2 в воде (4×)

Существенную роль при оценке качества муки отводят чистоте поверхности оболочки зерна и наличию следов зараженности, накопителями которых являются бороздка и бородка. Они должны быть в идеальном состоянии. С этой целью проверяли качество очистки и профилактической обработки зерна для его подготовки к хранению [268]. 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.

4.2.1 Исследование загрязненности оболочки зерна

Загрязненность оболочки зерна минеральными примесями, следами плесневых грибов и насекомых-вредителей определяли по суммарной площади единичных участков поверхностных загрязнений у пробной выборки зерен исходя из параметров их контура [254, 263].

Важной составляющей процесса очистки оболочки зерна является время обработки при установленной частоте ультразвуковых колебаний. Очистку оболочки зерна необходимо осуществлять без ее отъема с поверхности (см. рисунок 4.10), поскольку при простом обойном помоле она является необходимой составляющей клетчатки в муке.

С этих позиций исследовали зависимость температуры нагрева воды от времени УЗ-обработки 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, представленным в выражениях (2.24)–(2.32). При нагреве воды до 30 °С и очистке зерна в течение 40 с (рисунок 4.11) наблюдается практически полное устранение загрязненности зерна. Это свидетельствует о повышении коэффициента диффузии при массопередаче за счет ультразвуковых пульсирующих микропотоков и гидродинамических колебательных движений, активированных теплом.

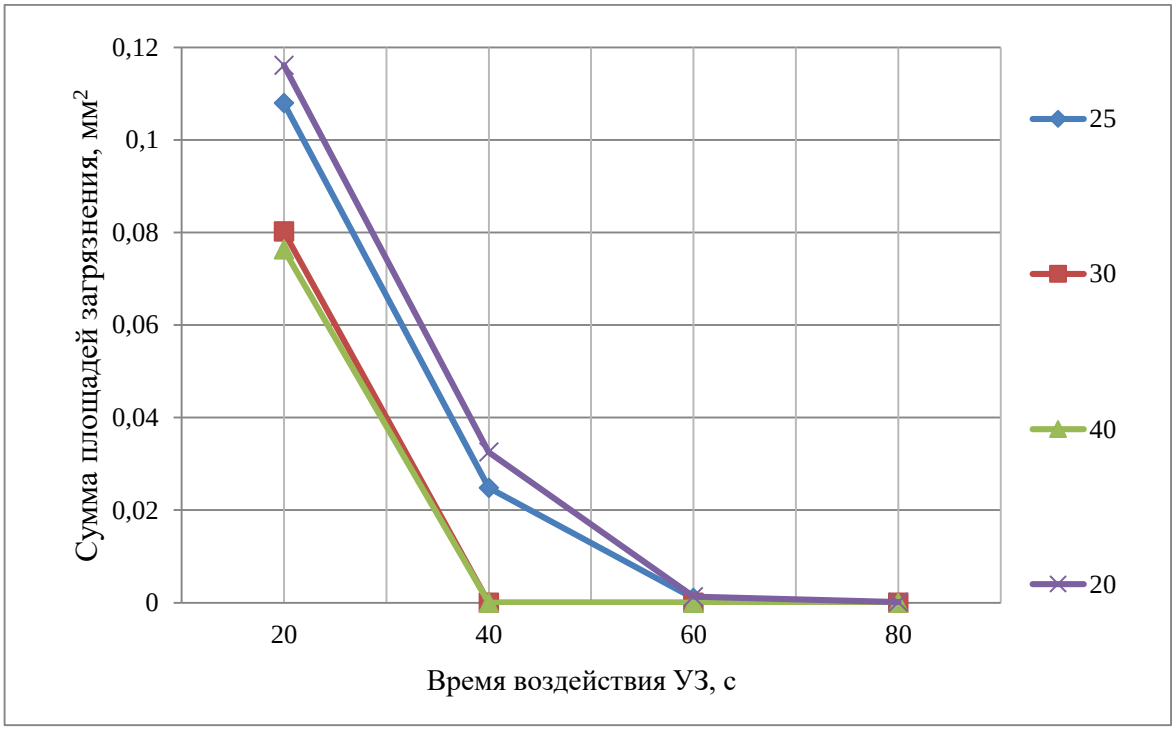


Рисунок 4.11 – Зависимость изменения суммарной площади загрязнения поверхности зерна от времени обработки и температуры воды (частота ультразвуковых колебаний 18 кГц)

Понижение температуры влечет за собой необходимость повышения длительности УЗ-обработки, что по причине уменьшения производительности и повышения энергозатрат при одинаковом итоговом результате не является целесообразным (рисунки 4.11, 4.12).

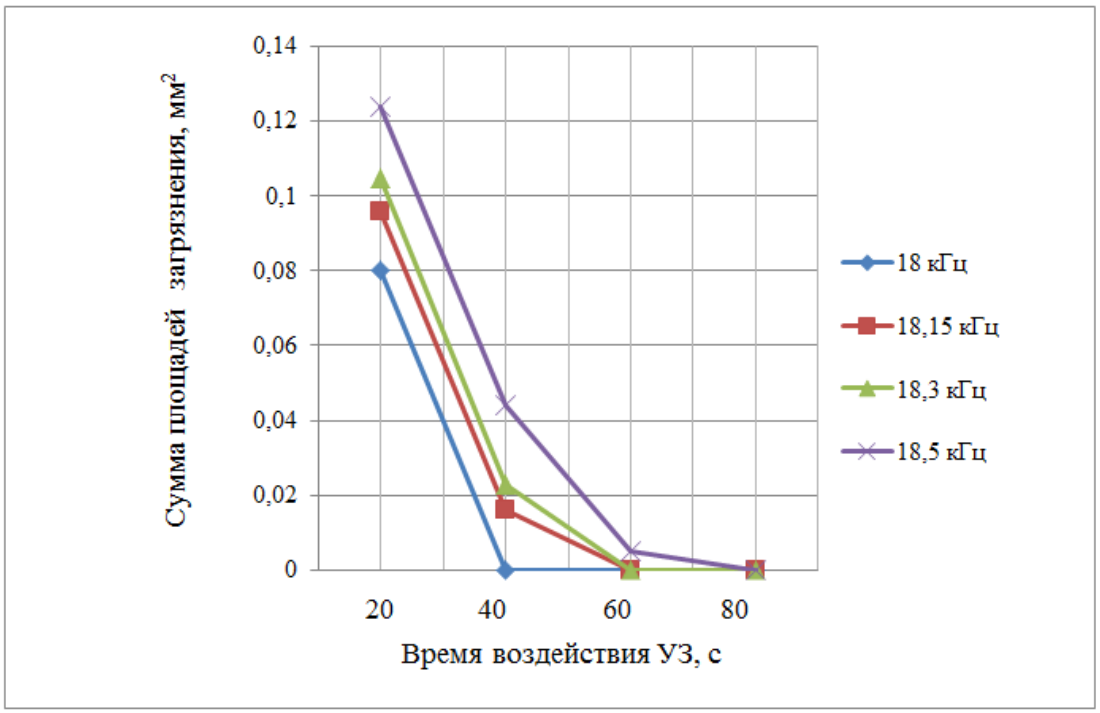


Рисунок 4.12 – Зависимость изменения суммарной площади загрязнения поверхности зерна от времени его обработки и частоты ультразвуковых колебаний при температуре обработки 30 °С

Исходя из данных, представленных на рисунках 4.11 и 4.12, установлено, что уровень остаточной загрязненности оболочки зерна зависит от частоты ультразвуковых колебаний и времени обработки. При увеличении времени обработки и снижении частоты загрязненность снижается, а при ультразвуковом водействии частотой 18 кГц в течение 40 с оболочка полностью очищается. С этих позиций установлены рациональные режимы: температура воды должна составлять 30 °С, частота колебаний – 18 кГц, время обработки 40 с.

4.2.2 Исследование зольности зерна

Зольность зерна является показателем, характеризующим в том числе и незерновые составляющие, такие, как минеральные загрязнения и следы зараженности.

Экспериментально подтверждено, что на зольность зерна влияет качество очистки его поверхности. Концентрация минеральных веществ, воздействующих на общие параметры показателя зольности зерна, зависит от анатомических частей зерновки. В нативном состоянии в зернах пшеницы и ржи зольность составляет 1,5–2,3 %, а в оболочке – 3,5–24,5 %. При этом большая часть минеральных загрязнений (до 65 %) находится на оболочке. Таким образом, при полном удалении минеральных загрязнений, следов плесневых грибов и вредителей зольность в зерне можно довести до достаточно низких показателей, когда она будет формироваться большей частью анатомическими составляющими зерна.

Результаты экспериментальных исследований зольности зерна представлены на рисунках 4.13 и 4.14. При исходной зольности 1,8 % минимальные показатели после обработки ультразвуком частотой 18 кГц при нагреве воды до 40 °С достигают уровня 1,05 % (время обработки 80 с), что свидетельствует о высоком качестве очистки оболочки.

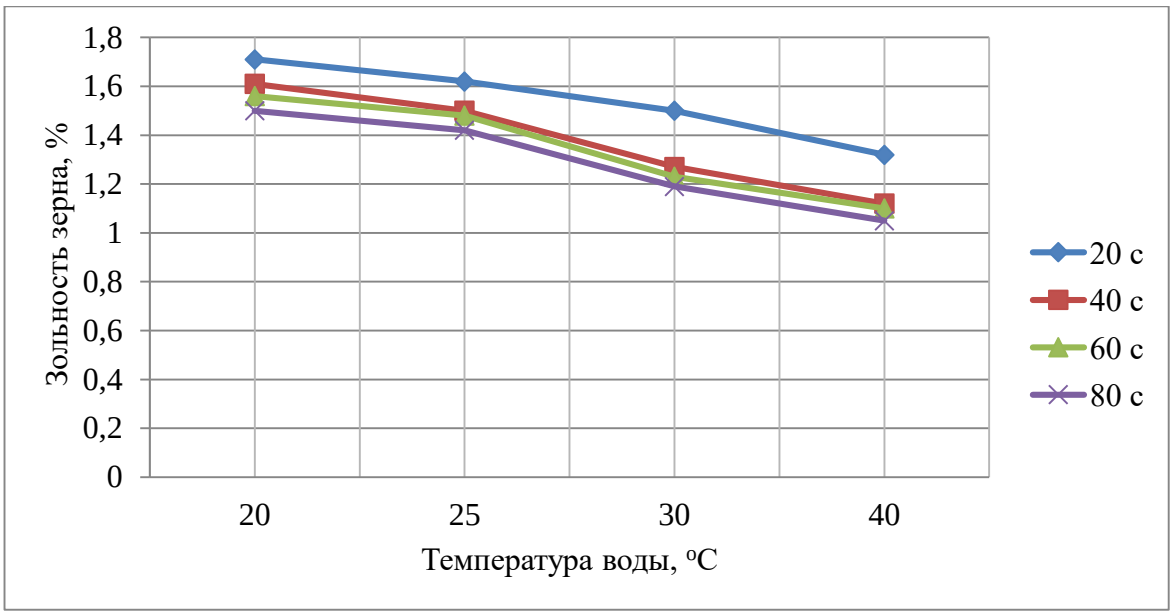


Рисунок 4.13 – Зависимость изменения зольности зерна от времени обработки и температуры воды (частота ультразвуковых колебаний 18 кГц)

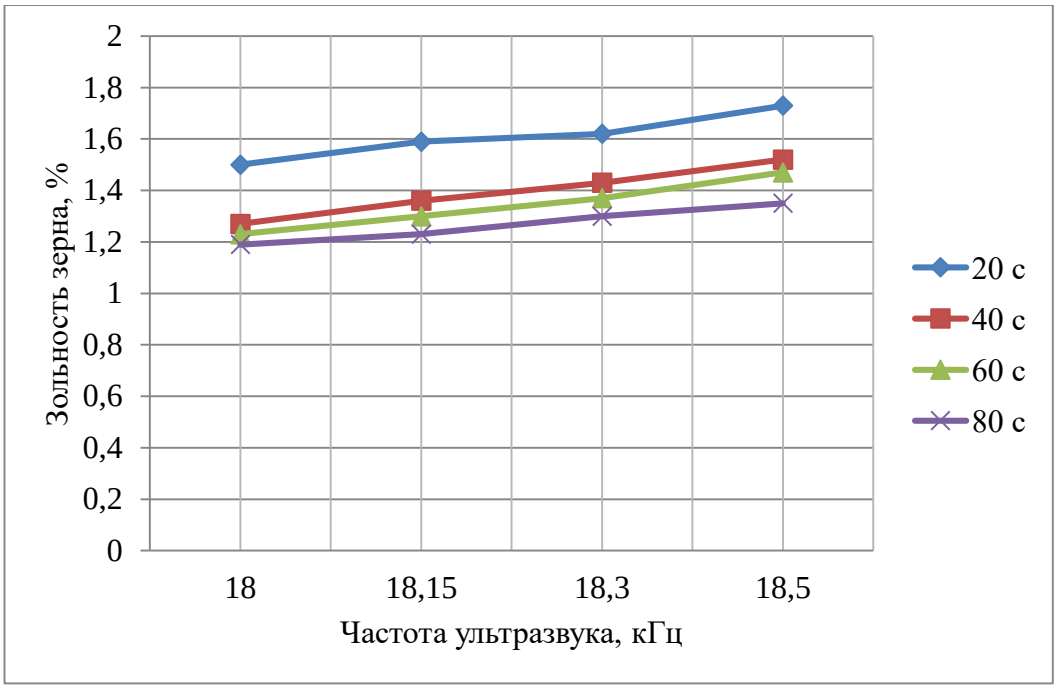


Рисунок 4.14 – Зависимость изменения зольности зерна от времени обработки и частоты ультразвуковых колебаний (температура обработки 30 °С)

По итогам исследований принято решение принять частоту ультразвуковых колебаний 18 кГц, температуру нагрева воды 30 °С, так как получаемый показатель зольности 1,19–1,2 % является достаточно высоким, сниженным более чем на 60 % по сравнению с показателем, полученным сухим шелушением, применяемым при простом помоле. Следует также отметить, что повышенные показатели частоты ультразвука, времени обработки и температуры нагрева не улучшают результативность.

4.2.3 Исследование влажности зерна

Влажность играет основополагающую роль при подготовке зерна к помолу. Только достижение кондиционных параметров влажности зерна, составляющих 14,5–17,0 %, позволяет получить муку высокого качества.

В соответствии с теоретическими исследованиями процесса массопередачи изучена возможность значительного повышения интенсивности проникновения влаги в твердую структуру зерна. Это позволяет многократно повысить кинетику процесса, протекающего при используемой технологии простого гидродинамического воздействия в емкостях в течение 8–48 ч в зависимости от

исходной влажности зерна. В случае ультразвукового воздействия капилляры и устьица зерна последовательно заполняются пульсирующими микропотоками, создаваемыми направленными акустическими колебательными движениями. При этом каждые предыдущие пульсирующие потоки, находящиеся в порах и устьицах зерна, постоянно подгоняются последующими, ускоряя тем самым процесс отволаживания зерна.

Экспериментально изучена зависимость влажности зерна от времени воздействия УЗ, частоты ультразвука и температуры (рисунки 4.15 и 4.16, приложение *Р*).

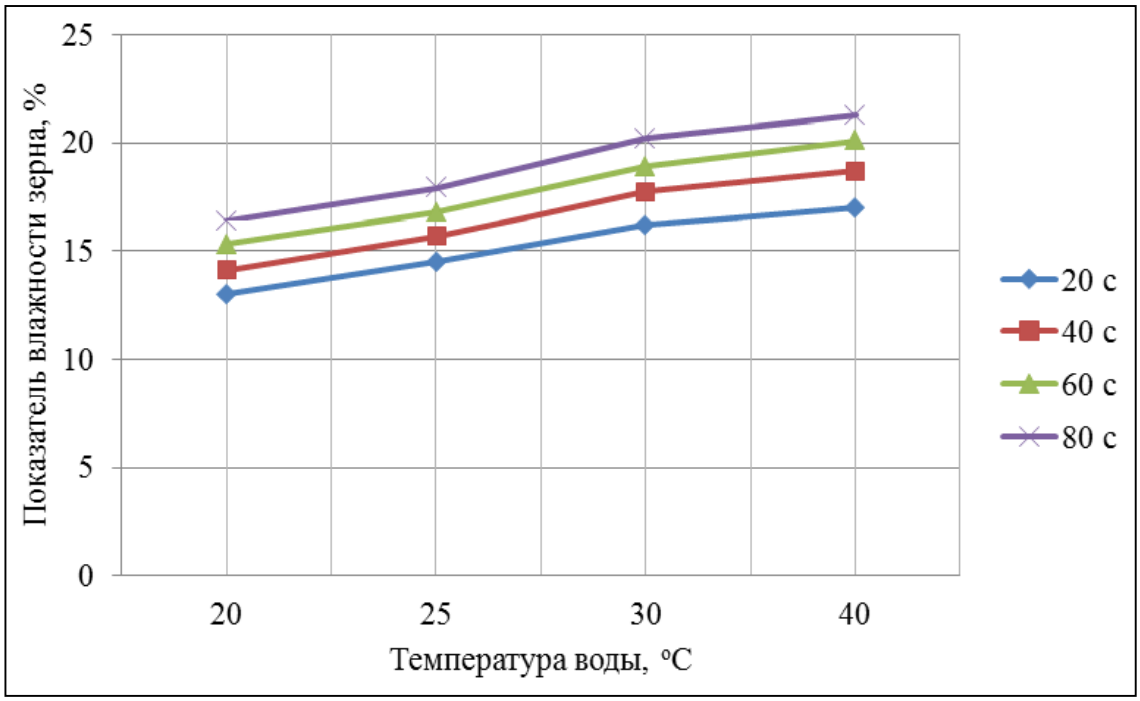


Рисунок 4.15 – Зависимость изменения влажности зерна от времени обработки и температуры воды (частота ультразвуковых колебаний 18 кГц)

В соответствии с графиками (см. рисунки 4.15 и 4.16) установлено, что процесс гидродинамической активности пульсирующих микропотоков резко активируется, обеспечивая достаточно высокие нормативные результаты увлажнения. В исследуемых параметрах ультразвукового воздействия, температуры и времени обработки достигаются стабильные узкоинтервальные результаты увлажненности зерна, полностью соответствующие нормативным помольным показателям.

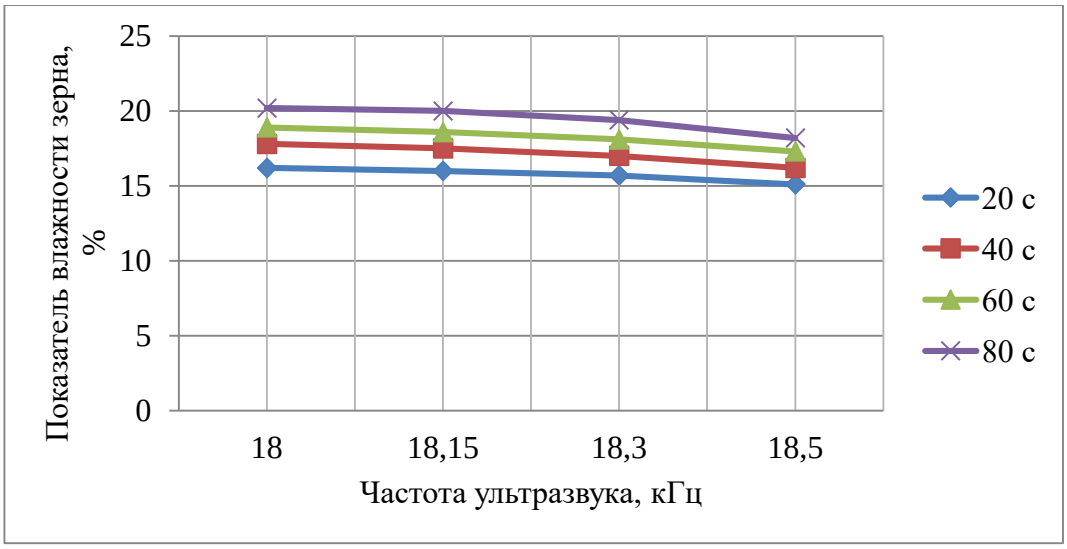


Рисунок 4.16 – Зависимость изменения влажности зерна от времени его обработки и частоты ультразвуковых колебаний (температура обработки 30 °С)

Анализ экспериментальных данных показал, что требуемых показателей влажности зерна можно достичь при обработке ультразвуком частотой 18,0–18,15 кГц, температуре 30 °С и времени обработки 30 с. Изменение времени и температуры обработки приведет к недоувлажнению или переувлажнению зерна с последующим ухудшением его помольных показателей и, как следствие, качества муки. Следует также отметить высокую стабильность процесса, все обработанное зерно находится в пределах нормируемого интервала влажности 14,5–17,0 %.

По итогам исследований увлажнения зерна очевидны достижения:

• параметров технологичности – обеспечивается 100%-я готовность зерна (влажность 14,5–17 %);

• технически необходимо не менее 30-секундной обработки зерна при температуре 30 ^{0}С с помощью ультразвуковых излучателей в разработанной поточно-механизированной линии взамен 8–48 ч отволаживания в емкостях.

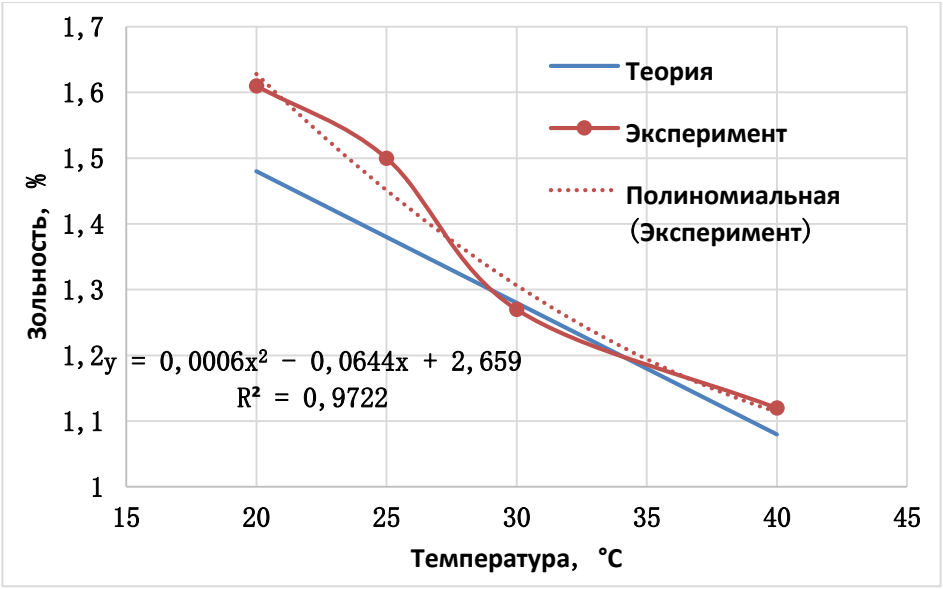
Расхождение между теоретически рассчитанными и измеренными значениями влажности составляют менее 10 %, что является допустимым и свидетельствует о применимости ультразвуковой обработки по предложенной теоретической модели для определения влажности зерна в зависимости от времени обработки, температуры, частоты ультразвука и коэффициента диффузии и формулы 2.16 для расчета влажности.

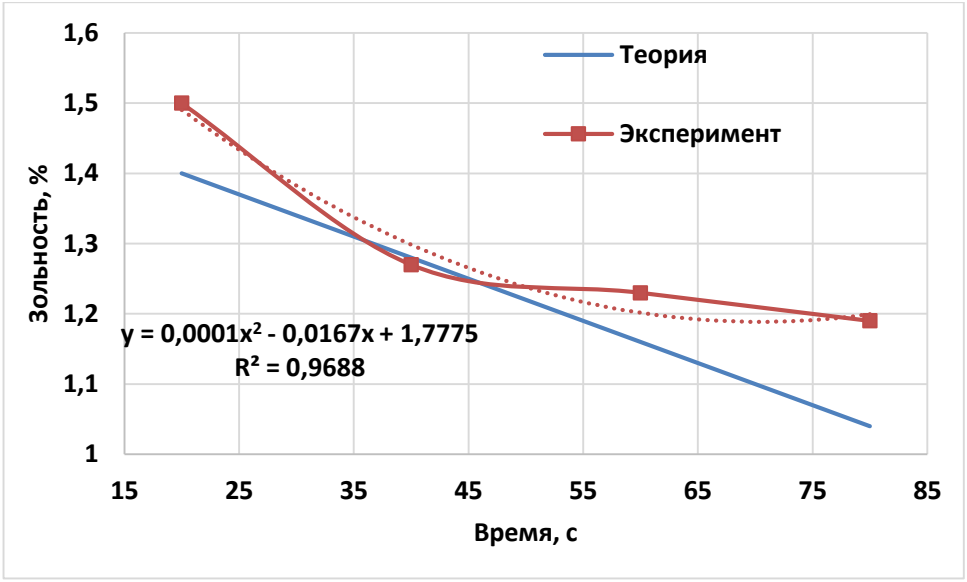
Таблица 4.2 – Результаты натурных измерений и расчетных данных влажности зерна пшеницы

План эксп.	Время, сек	Температура, °С	Частота, кГц	Влажность эксп., %	Влажность теор., %	Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными
1	20	20	18,15	13,3	13,23	0,53
2	80	20	18,15	16,8	15,43	8,88
3	20	40	18,15	19,0	17,68	7,47
4	80	40	18,15	20,1	22,23	9,58
5	20	30	18	13,5	14,37	6,05
6	80	30	18	17,9	19,8	9,6
7	20	30	18,5	12,7	13,43	5,44
8	80	30	18,5	16,0	17,21	7,03
9	30	20	18	16,2	15,59	3,91
10	30	40	18	20,2	18,72	7,91
11	30	20	18,5	15,1	14,62	3,28
12	30	40	18,5	18,2	18,9	3,7
13	30	30	18,15	16,5	15,34	7,56
14	30	30	18,15	16,6	15,34	8,21
15	30	30	18,15	16,5	15,34	7,56

На рисунках в приложении Ф представлен полигон распределения опытных вероятностей и теоретическое распределение опытных вероятностей, график исследования распределения величин влажности зерна пшеницы после проведенных исследований. Полигон показывают распределение опытных вероятностей для параметров влажности (φ). Значения влажности сосредоточены в диапазоне примерно от 12,84% до 22,44%. Пик распределения вероятностей для влажности приходится на диапазон 15,24%–18,84%, что указывает на наиболее вероятные значения этих параметров в данном эксперименте.

Сравнение теоретических и экспериментальных кривых по зольности в зависимости от изменения температуры, времени и частоты обработки, представлено на рисунке 4.17, по влажности – на рисунке 4.18.





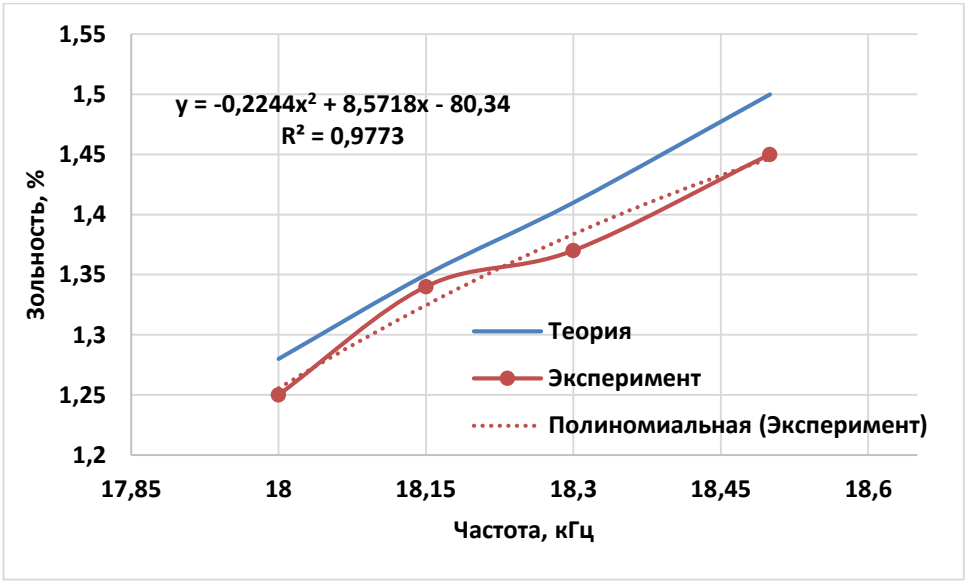
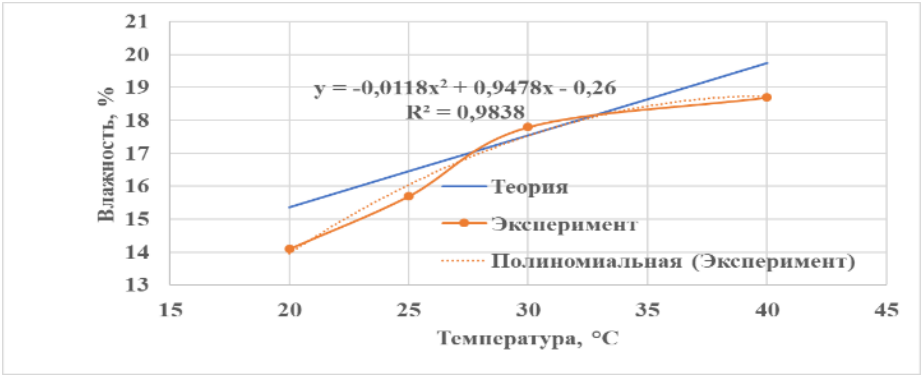
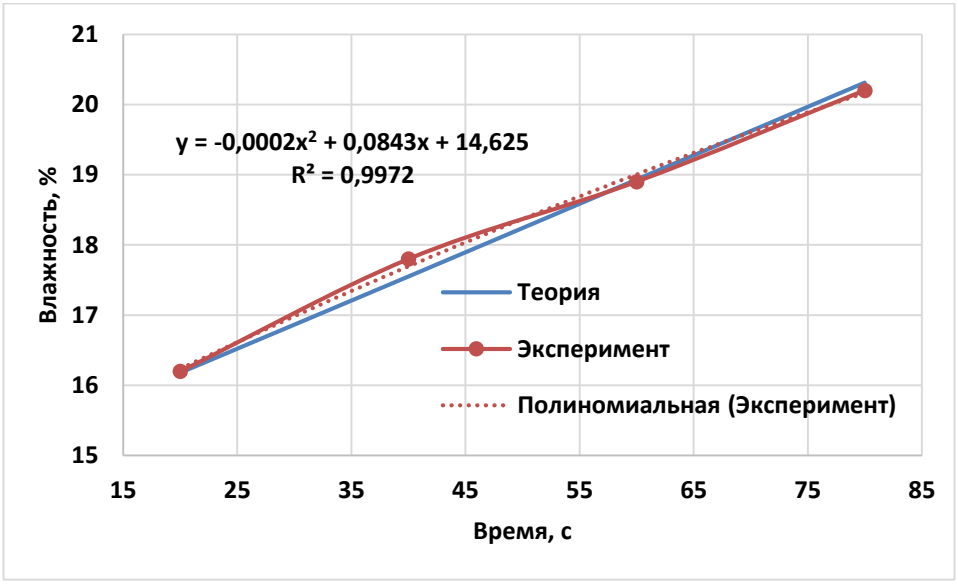


Рисунок 4.17 – Сравнение теоретических и эксперименальных кривых по зольности





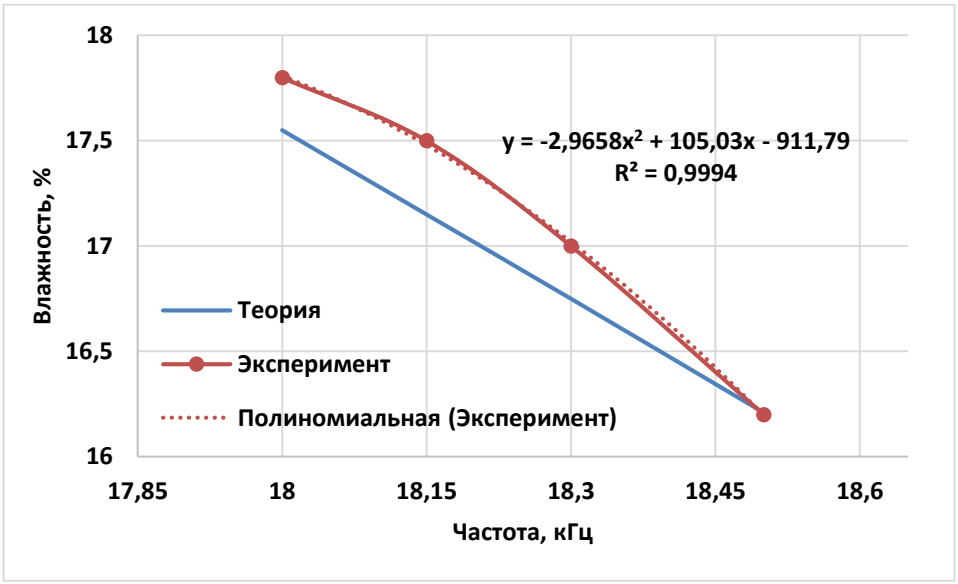


Рисунок 4.18 – Сравнение теоретических и эксперименталных кривых по влажности

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.

4.2.4 Исследование прочностных свойств зерна

Микротвердость зерна относится к структурно-механическим прочностным характеристикам. Она характеризует технологическую готовность зерна к помолу и заисит от его увлажненности. Установлено, что после сухого шелушения и отволаживания в емкостях в течение 26 ч всего 33,3 % зерна подготовлено к качественному размолу. Крайне нестабильный процесс отволаживания сопровождается избыточной прочностью структуры, превышающей 15 кг/мм^2, что требует увеличения прилагаемого усилия для разрушения эндосперма и алейронового слоя в размольном оборудовании. В технологическом плане это ведет к невозможности получения фракции тонкого помола вследствие высокой стойкости зерна к разрушению. В техническом плане происходит снижение изностойкости вальцов и показателей надежности, безотказности и долговечности оборудования. Пониженная прочность (менее 13 кг/мм^2) влечет за собой повышение пластичности структуры зерна. В данном случае в технологическом плане имеет место сплющивание микрочастиц, соответственно, снижается качество муки. В техническом плане ухудшается процесс размола зерна вальцами, забиваются размольные риски за счет залипания материала, возникает необходимость частых технических обслуживаний оборудования.

Экспериментально изучены зависимости микротвердости зерна от времени УЗ-обработки, частоты ультразвука и температуры (рисунки 4.17 и 4.18).

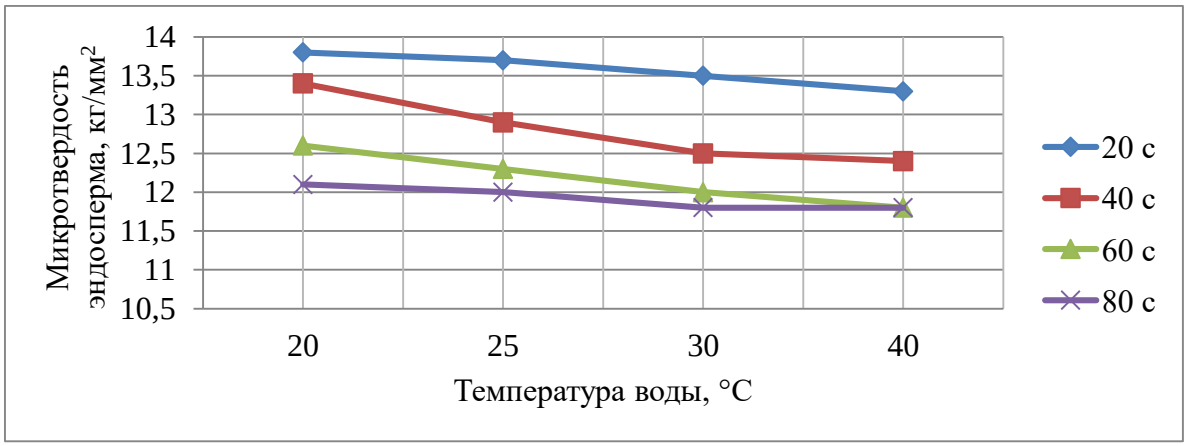


Рисунок 4.19 – Зависимость микротвёрдости зерна от времени обработки и температуры воды (частота ультразвуковых колебаний 18 кГц)

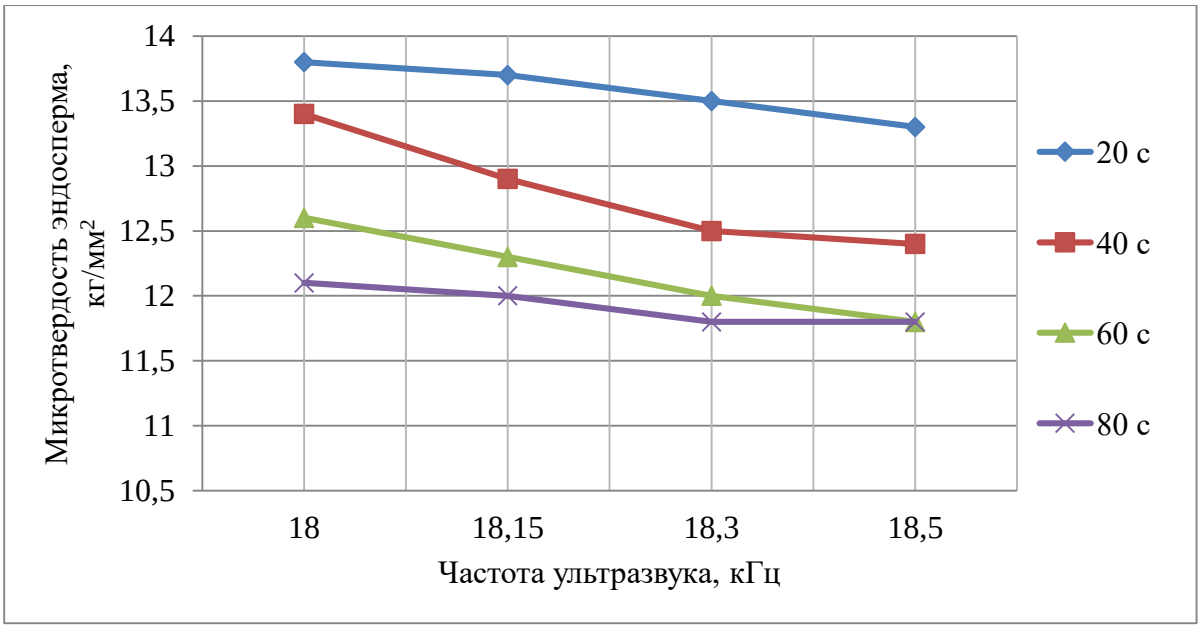


Рисунок 4.20 – Зависимость микротвёрдости зерна от времени его обработки и частоты ультразвуковых колебаний (температура воды 30 °С)

Результаты исследований показали, что ультразвуковая обработка позволяет стабилизировать прочность эндосперма и алейронового слоя и обеспечить нормируемые помольные показатели. Своего оптимума 13,0–13,4 кг/мм^2 этот показатель достигает при ультразвуковой обработке в диапазоне 18,0–18,5 кГц, температуре нагрева суспензии 30...40 °С и времени обработки 30–40 с. В данных диапазонах достигается 100%-я подготовленность зерна к помолу.

4.2.5 Исследование микробиологических показателей зерна, пораженного микроскопическими грибами и микотоксинами

Зерно, поставляемое на зерноперерабатывающие предприятия, может быть поражено плесневыми грибами и микотоксинами [76]. Данное обстоятельство отрицательно воздействует на качество муки и хлебобулочных изделий.

При производстве обойной муки профилактическую обработку зерна не проводят, а для профилактической обработки зерна при его хранении и подготовке к сортовому помолу применяют способ [267], основанный на использовании безопасного средства раствора анолита для обеззараживания зерна при

ультразвуковой обработке.

При экспериментальных исследованиях обеззараживания и очистки зерна, предназначенного для хранения, использовали частоты ультразвука 20 кГц; 24; 26; 35 кГц, интенсивность 0,3 Вт/см^2; 0,5; 1,0 Вт/см^2, время УЗ-обработки – 1 мин; 10; 20; 30; 40 мин [267].

Зерно на наличие микотоксинов исследовали методом жидкостной хроматографии по стандартным методикам [252, 253]. Результаты представлены в таблице 4.2.

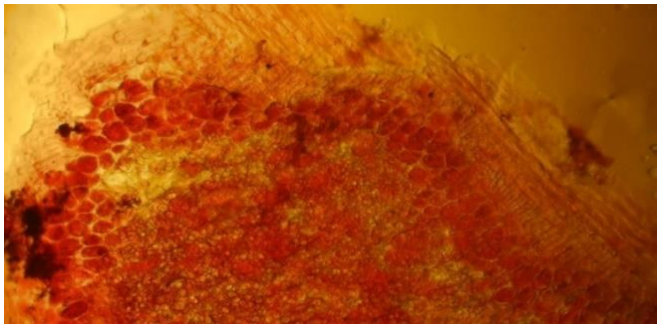
Таблица 4.2 – **Допустимое и действительное содержание микотоксинов в зерне пшеницы**

Показатель	Допустимое нормативное значение, мг/кг	Эксперимен-тальный показа-тель, мг/кг	Нормативные документы на методы измерений	Плесневые грибы, продуцирующие микотоксины
Афлатоксин B_1	не более 0,02	0,04*	ФР 1.31.2008. 04629	*Aspergillus*
Т-2 токсин	не более 0,1	0,01	МУ 3184-84	*Fusarium*
Охратоксин А	не более 0,05	0,03	ГОСТ 28001-88	*Aspergillus, Penicillium*

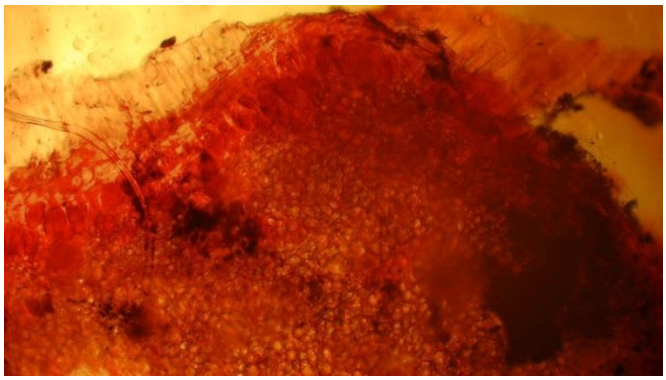
*Превышение нормы.

В зерне пшеницы обнаружено повышенное содержание афлатоксина B_1, Т-2 токсин и охратоксин А находятся в допустимом интервале (см. таблицу 4.2). Содержание афлатоксина B_1 превышает в два раза нормативные показатели, установленные Техническим регламентом Таможенного союза «О безопасности зерна» (ТР ТС 015/2011, 2011) [74].

Повышенное содержание микотксинов ведет к повреждению зерновки, что подтверждается данными срезов зерна на снимках, полученных на микроскопе-спектрофотометре МСФУ-К (рисунки 4.21 и 4.22).



4.21 – Срез сухого зерна пшеницы, содержащего микотоксины (1000×)

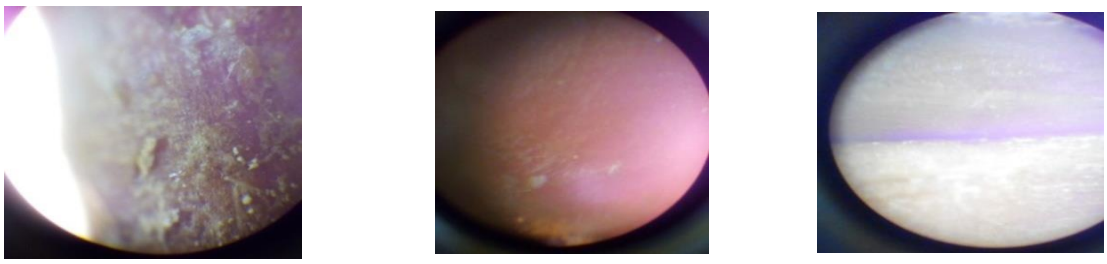


4.22 – Срез мокрого зерна пшеницы, содержащего микотоксины (1000×)

Установлено, что при простом увлажнении зерна площадь повреждения микотоксинами значительно повышается (см. рисунок 4.20). Это свидетельствует об интенсивном росте зараженности, что еще раз подтверждает необходимость сокращения времени отволаживания не только по производственной причине, но и по причине уменьшения зараженности зерна микотоксинами.

Продуцентами микотоксинов являются плесневые грибы [76], поэтому для предотвращения заражения и распространения необходимо вести профилактическую обработку зерна от плесневых грибов на стадии передачи на хранение, а не бороться с результатами их жизнедеятельности в период хранения и при подготовке к помолу.

Наиболее эффективной оказалась обработка зерна в растворе анолита ультразвуком частотой 26 кГц при интенсивности ультразвука 1 Вт/см^2 и времени обработки 30 мин (рисунок 4.23).

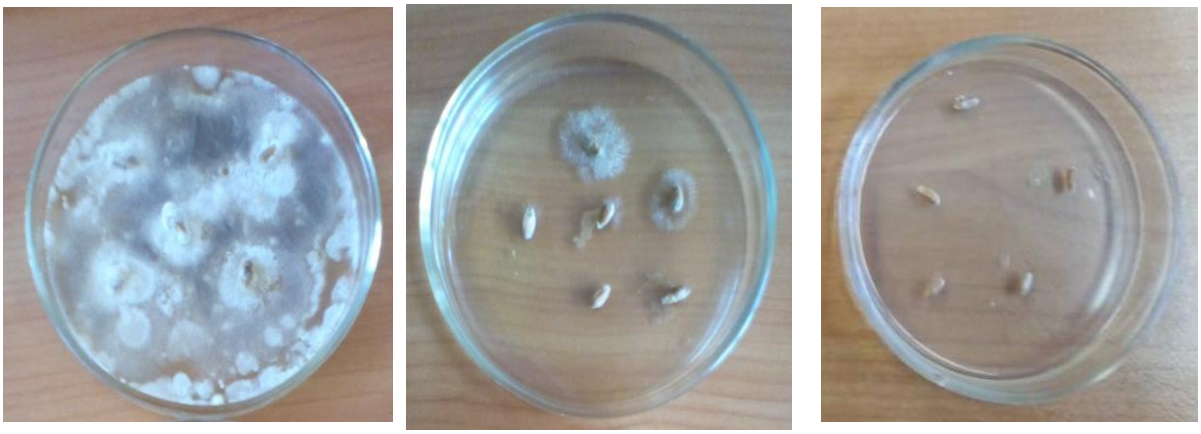


а *б* *в*

Рисунок 4.23 – Влияние ультразвука частотой 26 кГц и анолита АНК на развитие плесневых грибов на поверхности зерновки (160×): *а* – нативное зерно; *б* – обработанное ультразвуком в воде; *в* – обработанное ультразвуком в растворе анолита АНК

Следует отметить, что после обработки поверхность зерна была абсолютно чистой, даже в зоне бороздки и бородки (см. рисунок 4.23, *в*).

На рисунке 4.24 представлены образцы роста колоний нативного зерна (*а*); зерна, обработанного ультразвуком частотой 26 кГц в воде (*б*) и в среде анолита (*в*).



а *б* *в*

Рисунок 4.24 – 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

Рост колоний микроорганизмов наблюдается в течение всего периода исследований. На первой стадии в нативном зерне это происходит по причине их наличия в природе и, соответственно, от множества естественных условий (состояние семян, условия выращивания, уборки и хранения). В последующем колонии микроорганизмов только увеличиваются, подвергая заражению и порче всю оболочку зерна и его внутреннюю структуру. На рисунке 4.24 (*а*) ясно отражена картина развития микроорганизмов. На этом основании следует, что профилактическая обработка необходима уже на стадии приемки и хранения. Однако даже при соблюдении этого условия микроорганизмы в зерне имеют свойство регенерировать и распространяться при хранении, на оболочке при этом образуются новые колонии. Их достаточно эффективно можно удалить обработкой ультразвуком в воде (см. рисунок 4.24, *б*), но очаги

развития не пропадают. Очевидно, что необходима активация процесса, призванная свести на нет очаги развития. Эта цель может быть достигнута путем использования раствора анолита (см. рисунок 4.24, *в*).

Анолит относится к 4-му классу малотоксичных веществ согласно ГОСТ 12.1.007-76 [204], является экологически чистым раствором высокоактивных кислородных соединений хлора и озона. Он обладает дезинфицирующим, стерилизующим и универсальным биоцидным действием и полностью инактивирует жизнедеятельность продуцентов микотоксинов.

При исследовании зерна пшеницы на наличие бактерий и плесневых грибов способ ультразвуковой обработки показал следующие результаты (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – **Результаты микробиологического исследования зерна, обработанного ультразвуком частотой 26 кГц**

Вид обработки	Содержание микроорганизмов, %	Снижение содержания микроорганизмов, %
Обработка в растворе анолита без ультразвука	25	75
Ультразвуковая обработка в воде	37	63
Ультразвуковая обработка в растворе анолита	2	98

Обработка зерна в среде анолита при частоте ультразвука 26 кГц и интенсивности волны 1 Вт/см^2 в течение 30 мин позволила подавить развитие микрофлоры на 98 %. Это свидетельствует об исключительно высокой степени обеззараживания.

При обработке зерна предлагаемым способом его оболочка не повреждается, происходят очистка поверхности и обеззараживание, поэтому данный способ можно рекомендовать для профилактической обработки зерна перед переработкой или при его закладке на хранение.

4.2.6 Анализ экспериментальных данных технологического процесса обработки зерна

Статистическая обработка полученных результатов при подготовке зерна к помолу проведена с использованием программы Statistica 10.0. На основе

экспериментальных данных разработаны математические модели технологического процесса обработки зерна пшеницы в ультразвуковой установке при его подготовке к простому помолу и для обеззараживания.

4.2.6.1 Анализ экспериментальных данных технологического процесса увлажнения зерна

Опираясь на установленные нормативные параметры процесса подготовки зерна к помолу для производства обойной муки установлено, что основными технологическими параметрами, характеризующими качество процесса обработки, являются влажность зерна (14,5–17,0 %) и качество его очистки, выражающееся в зольности (≤1,9). Определение рациональных параметров температуры, времени обработки и частоты ультразвука для достижения нормируемых показателей влажности является важной задачей.

Построение профилей желательности – основной инструмент, используемый при оптимизации (рисунок 4.25).

Функция желательности зависит от трех точек (1-я точка – это влажность 17,0 %, т. е. максимум переменной, 3-я точка – влажность 14,5 %, наименее желательная, 2-я точка – средняя) и трех параметров переменных (время, температура и частота ультразвука).

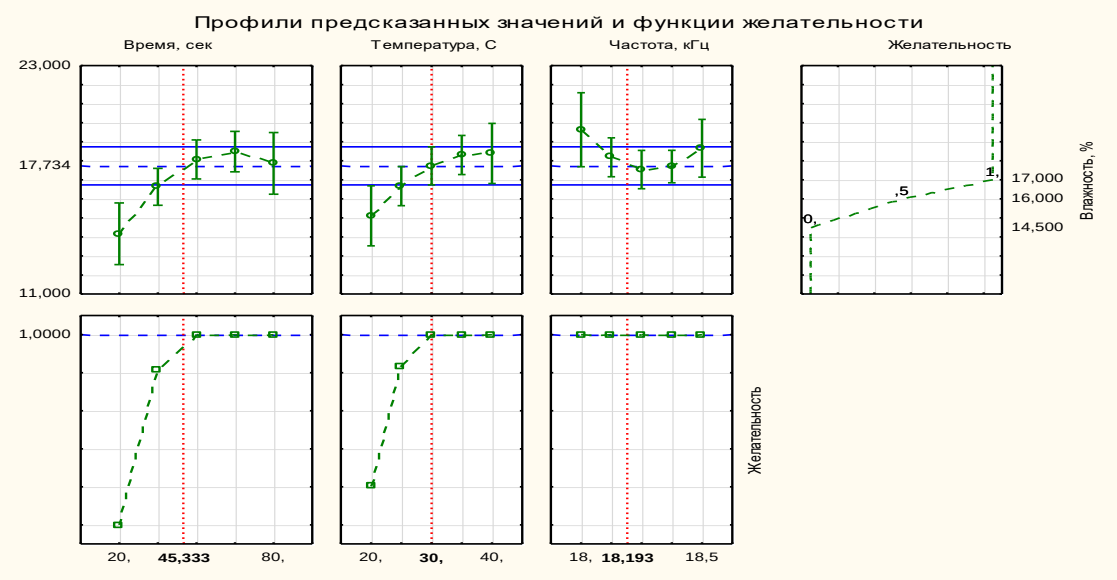


Рисунок 4.25 – Профили значений и функции желательности показателей влажности зерна

Зная минимальные (14,5 %) и максимальные (17,0 %) нормируемые показатели влажности зерна, были определены рациональные параметры обработки по профилям предсказанных значений, функциям желательности и трехмерным профилям отклика желательности (рисунки 4.25, 4.26).

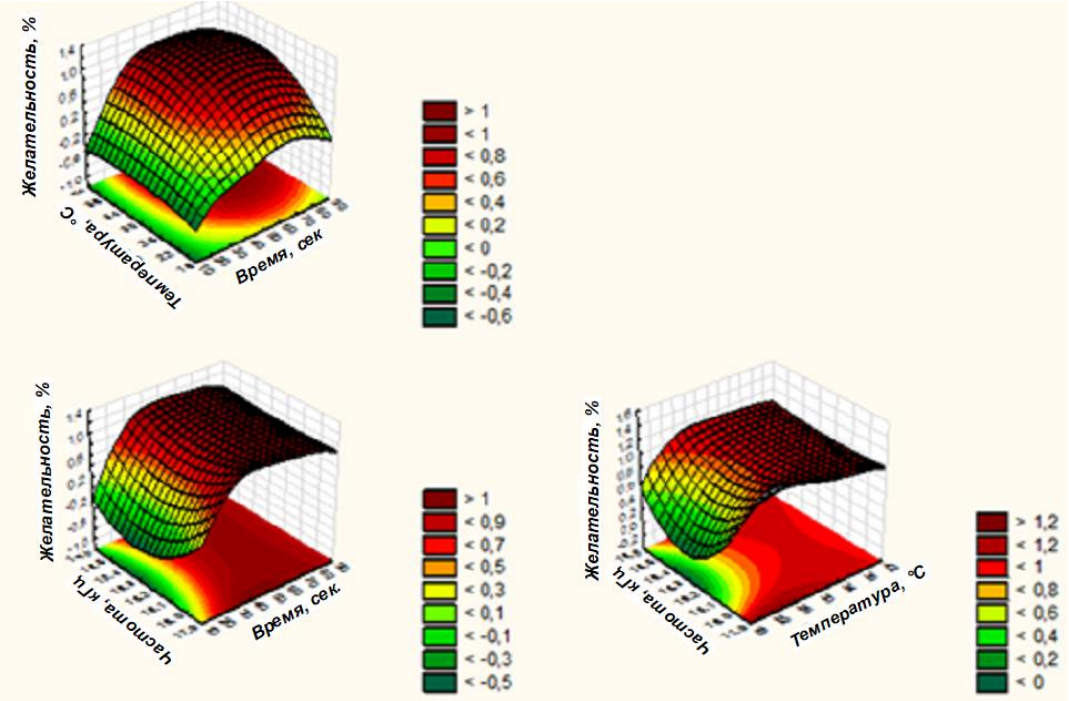


Рисунок 4.26 – Профили отклика желательности показателей влажности зерна

Для получения профилей отклика желательности были приняты интервалы влажности: 1,0–17,0 %; 0,5–16,0; 0–14,5 %. По полученным данным (см. рисунки 4.25, 4.26) установлены оптимальные параметры обработки зерна: температура 30 °С, время обработки – 45 с, частота ультразвука 18,0–18,2 кГц.

В соответствии с экспериментальными данными построена трехмерная поверхность отклика, по которой установлены оптимальные границы обработки зерна при изменяемых параметрах времени и температуры (рисунок 4.27).

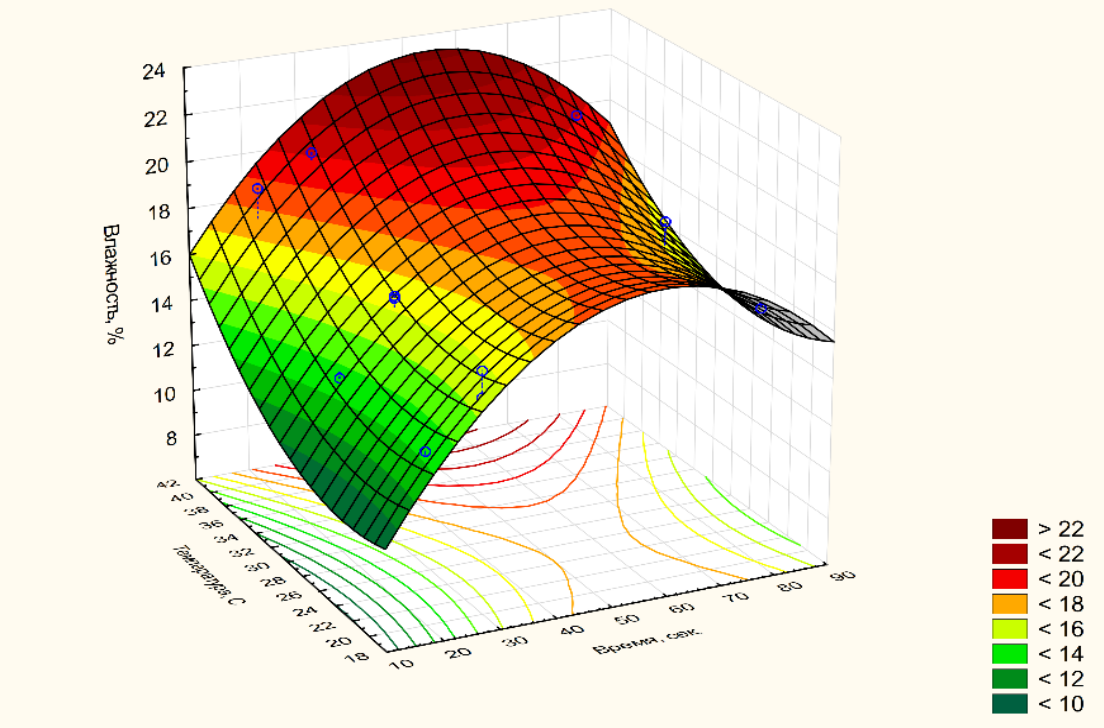


Рисунок 4.27 – Поверхность отклика обработки зерна
при изменяемых параметрах времени и температуры

Анализируя трёхмерную поверхность отклика (см. рисунок 4.27), можно сделать вывод о том, что выделенная оптимальная факторная область при минимальных (14,5 %) и максимальных (17,0 %) значениях влажности свидетельствует о сходимости теоретических и экспериментальных данных.

4.2.6.2 Анализ экспериментальных данных технологического процесса очистки зерна

Опираясь на минимальные (1,2 %) и максимальные (1,9 %) нормируемые показатели зольности, являющиеся основными технологическими параметрами, характеризующими качество зерна при обойном помоле, были определены оптимальные параметры обработки по профилям предсказанных значений, функциям желательности и трехмерным профилям отклика желательности (рисунки 4.28, 4.29).

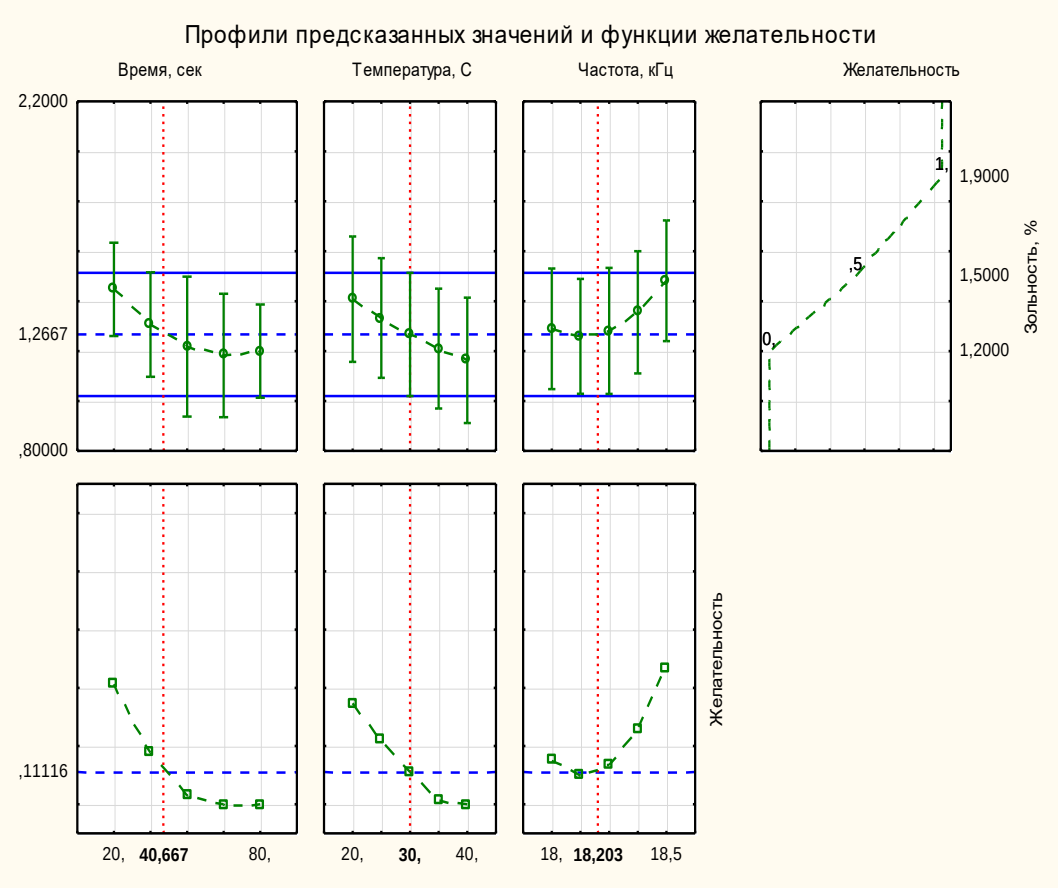


Рисунок 4.28 – Профили значений и функции желательности показателей зольности зерна

Для получения профилей отклика желательности были приняты интервалы зольности зерна: 1,0–1,9 %; 0,5–1,5; 0–1,2 %.

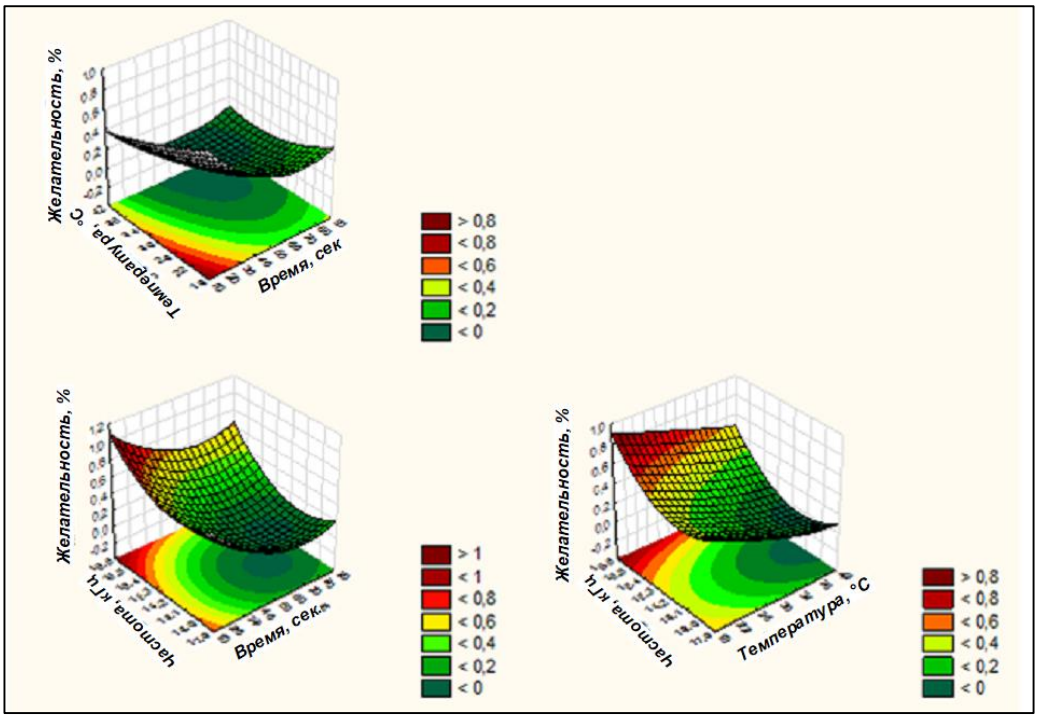


Рисунок 4.29 – Профили отклика желательности показателей зольности зерна

По данным, представленным на рисунках 4.28 и 4.29, получены оптимальные параметры обработки зерна: температура 30 °С, время обработки – 30–40 с, частота ультразвука – 18,0–18,2 кГц.

По экспериментальным данным построена трехмерная поверхность отклика, позволяющая оптимизировать режимные границы обработки зерна при переменных параметрах времени и температуры для достижения оптимального показателя зольности (рисунок 4.30).

При анализе трехмерной поверхности отклика, представленной на рисунке 4.28, установлено, что с увеличением времени и температуры обработки зольность снижается. Минимальных показателей она достигает при времени УЗ-обработки 30–40 с и температуре не ниже 30 °С.

Статистические исследования экспериментальных данных подтверждают их сходимость с теоретическим обоснованием режимов интенсификации процесса отволаживания при подготовке зерна к простому помолу. Таким образом, наиболее рациональными следует считать технологические режимные параметры, представленные в таблице 4.4.

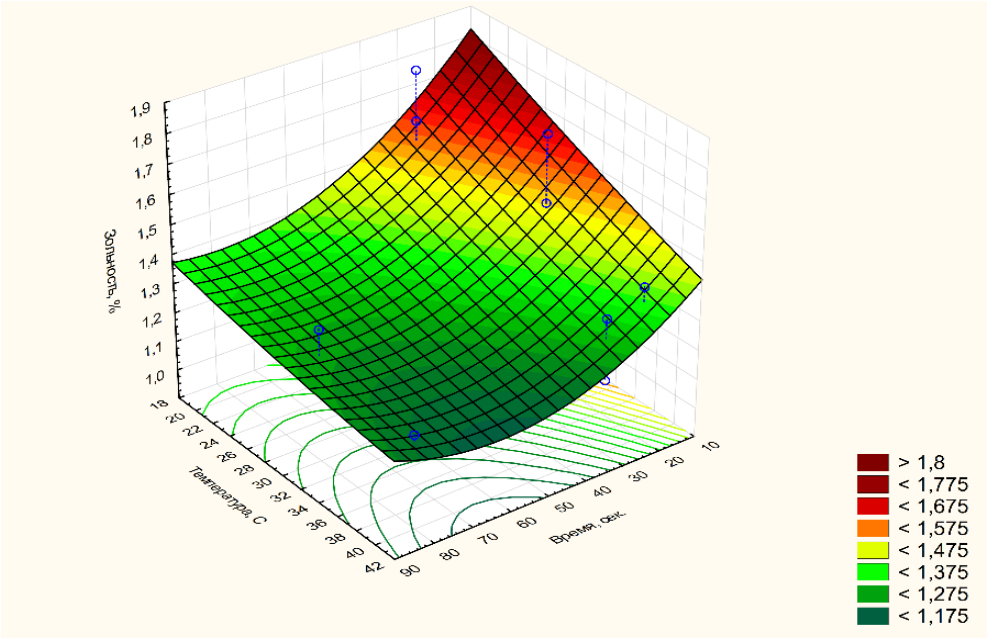


Рисунок 4.30 – Поверхность отклика зависимости показателя зольности от температуры и времени обработки

Таблица 4.4 – **Технологические режимные параметры подготовки зерна пшеницы к простому помолу**

Параметр	Единица измерения	Значение
Температура суспензии	ºС	30
Продолжительность обработки	с	40
Частота ультразвуковых колебаний	кГц	18,0–18,2
Интенсивность ультразвукового поля	Вт/см^2	1

4.2.6.3 Анализ экспериментальных данных технологического процесса профилактической обработки зерна

Анализ профилей значений, функций желательности и карты снижения уровня микроорганизмов позволил выявить оптимальные параметры профилактической обработки зерна для его обеззараживания.

Минимальный пороговый уровень снижения содержания микроорганизмов принят равным 95 %, максимальный по полученным результатам – 98 %. Установлены оптимальные показатели при обработке зерна в среде анолита с ультразвуковой обработкой (рисунки 4.31, 4.32).

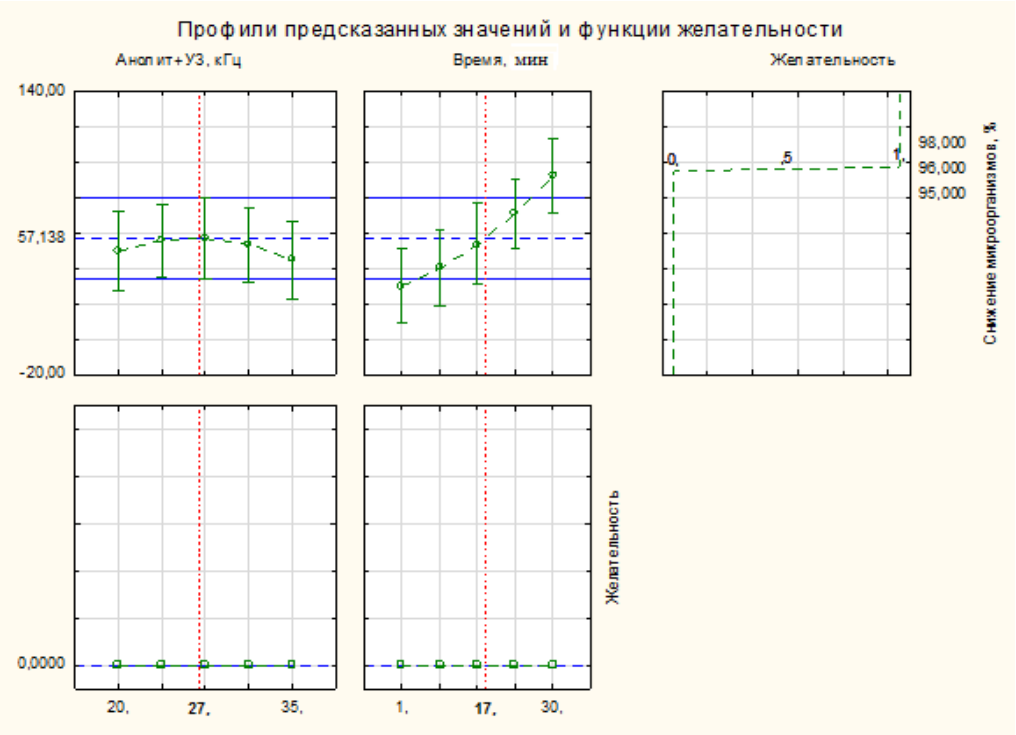


Рисунок 4.31 – Профили значений и функции желательности показателей снижения содержания микроорганизмов

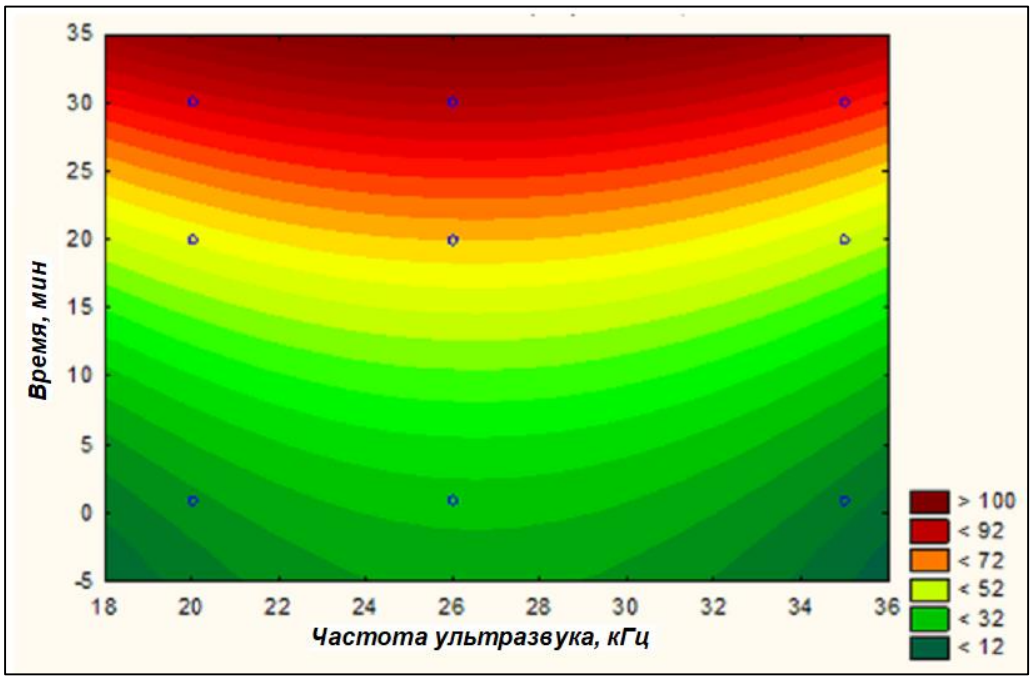


Рисунок 4.32 – Карта уровня снижения содержания микроорганизмов

Анализ полученных двухмерных сечений поверхности отклика (см. рисунок 4.31) и профилей значений и функции желательности (см. рисунок 4.32) показал, что при профилактической обработке зерна ультразвуком снижения зараженности микроорганизмами можно добиться обработкой зерна с частотой 24–27 кГц в среде анолита в течение не менее 17 мин. Наилучшее качество обработки обеспечивается при времени 30 мин и частоте ультразвука 26 кГц.

В соответствии с экспериментальными данными построена трехмерная поверхность отклика, позволяющая установить оптимальные режимные границы обработки зерна при переменных параметрах времени и частоты ультразвуковой обработки в анолите (рисунок 4.33).

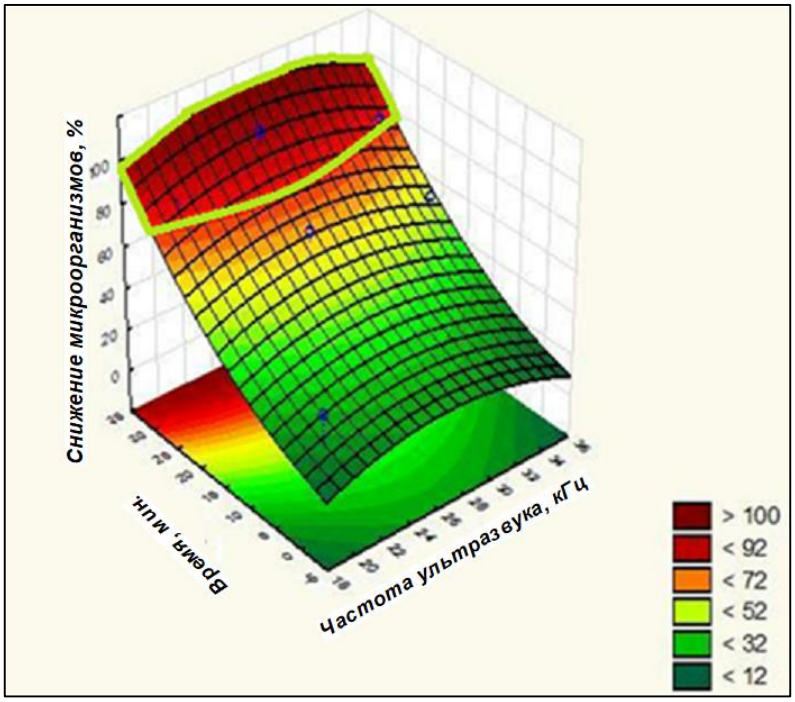


Рисунок 4.33 – Поверхность отклика зависимости снижения уровня микроорганизмов от времени и частоты ультразвуковой обработки

Анализ трехмерной поверхности отклика (см. рисунок 4.31) показал, что с увеличением времени обработки уменьшается зараженность микроорганизмами при рассматриваемых частотах ультразвука, однако наиболее качественное обеззараживание происходит при частоте 26 кГц.

Таким образом, наиболее рациональными следует считать следующие технологические параметры для профилактической обработки зерна (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – **Режимные параметры профилактической обработки зерна пшеницы**

Параметр	Единица измерения	Значение
Температура воды	ºС	20–24
Продолжительность обработки	мин	30
Частота ультразвуковых колебаний	кГц	26
Интенсивность ультразвукового поля	Вт/см^2	1

По результатам факторного эксперимента были получены регрессионные математические модели, адекватно отражающие зависимость времени обработки, температуры и частоты ультразвука:

$$Y_1 = -6{,}13418 - 0{,}00368X_1 - 0{,}01225X_2 + 0{,}44256X_3 \qquad (4.1)$$

$$Y_2 = 55{,}8439 + 0{,}06879X_1 + 0{,}21939X_2 - 2{,}68774X_3, \quad (4.2)$$

где X_1 – время обработки, мин;

Y_1 – зольность, %;

Y_2 – влажность зерна, %;

X_2 – температура, °С;

X_3 – частота ультразвука, кГц.

Проверку адекватности уравнений проводили путем сравнения расчетного критерия Фишера с табличным. Достаточно близкие значения расчетных и табличных показателей свидетельствуют об адекватности и применимости математических моделей для описания влияния исследуемых факторов на показатели влажности, зольности и обеззараживания зерна.

4.3 Результаты экспериментальных исследований обработки зерна сои

В ходе теоретических исследований установлено, что основными факторами, определяющими эффективность обработки, являются: частота ультразвука, интенсивность ультразвуковых колебаний, степень измельчения семян, концентрация окислителя в рабочем растворе и время обработки [128, 271, 272]. В пищевой технологии показатели уреазы для продуктов из зерна сои не нормируются, а в кормовой индустрии к нормируемым показателям относится содержание уреазы для жмыха – 0,1–0,3 ед. pH [273] или для шрота – 0,02–0,2 ед. pH [274]. Ингибитор трипсина в сое рекомендован не более 5 мг/г [165]. Однако имеются научно обоснованные предпосылки к снижению нормируемого показателя активности уреазы [275]. Протеиновая ценность кормов с добавками из зерна сои непосредственно зависит от содержания в ней белков-ингибиторов, от которых следует избавляться.

4.3.1 Исследование качественных показателей зерна сои

Исходя из проведенных расчетов установлены рациональные режимно-конструктивные параметры для экспериментальных исследований

показателей инактивации (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – **Сводные расчетные режимно-конструктивные параметры установки для обработки зерна сои**

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Скорость распространения звуковых волн c, м/с	1473	Гидростатическое давление $P_{пол}$, Па·10^5	1,01
Скорость микропотока v, м/с·10^{-1}	3,99	Длина волны λ, м	0,08
Ускорение b, м/$с^2$·10^4	4,52	Минимальное значение кавитационного радиуса R_{min}, м·10^{-8}	7,5
Амплитуда скорости V, м·10^{-1}	5,65	Максимальное значение кавитационного радиуса R_{max}, м·10^{-6}	1,08
Амплитуда ускорения B, м·10^4	6,39	Максимальное удельное давление схлопывания пузырьков $P_{уд}$, Па·10^9	4,81
Звуковое давление $P_з$, Па·10^5	9,12	Скорость схлопывания пузырьков U, м/с·10^3	1,34
Полное гидростатическое давление $P_{пол}$, Па·10^6	1,01	Коэффициент затухания α_0, $с^2$/м·10^{-3}	4,6
Среднее значение энергии E, Н/$м^2$	179	Максимальная амплитуда колебаний A_{max}, м·10^{-6}	4,99
Количество энергии J, Вт/$м^2$·10^5	2,63	Максимальная интенсивность колебаний J_{max}, Вт/$м^2$·10^5	2,62

Для исследований использовали сорта сои, выращенные в Саратовской области, имеющие различные показатели белка и жира (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – **Качественные показатели зерна сои**

Сорт	Содержание, %					Активность	
	белка	жира	клетчатки	золы	БЭВ	уреазы, ед. рН	ингибитора, мг/г
Злато	38,86	21,78	6,83	5,05	23,70	2,33	21,10
Бара	34,08	20,30	7,08	7,10	29,28	2,26	51,20
Соер 4	30,48	19,90	7,10	8,23	32,90	2,21	45,60
Соер 5	37,00	20,11	7,03	5,23	26,50	2,31	61,30

Установлено, что по содержанию белка и жира лидирующее место занимают сорта Злато и Соер 5, а по количеству безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ) – Соер 4 и Бара. В сорте Злато наблюдается минимальное содержание ингибитора трипсина. Эти данные необходимы для последующего анализа результатов исследований.

4.3.2 Исследование активности уреазы от степени измельчения обрабатываемых нативного зерна сои

Теоретически обоснована необходимость измельчения зерна сои, что позволяет увеличить площадь поверхности контакта семян с водой и ускорить процесс массопередачи. Результаты исследований приведены на рисунке 4.34.

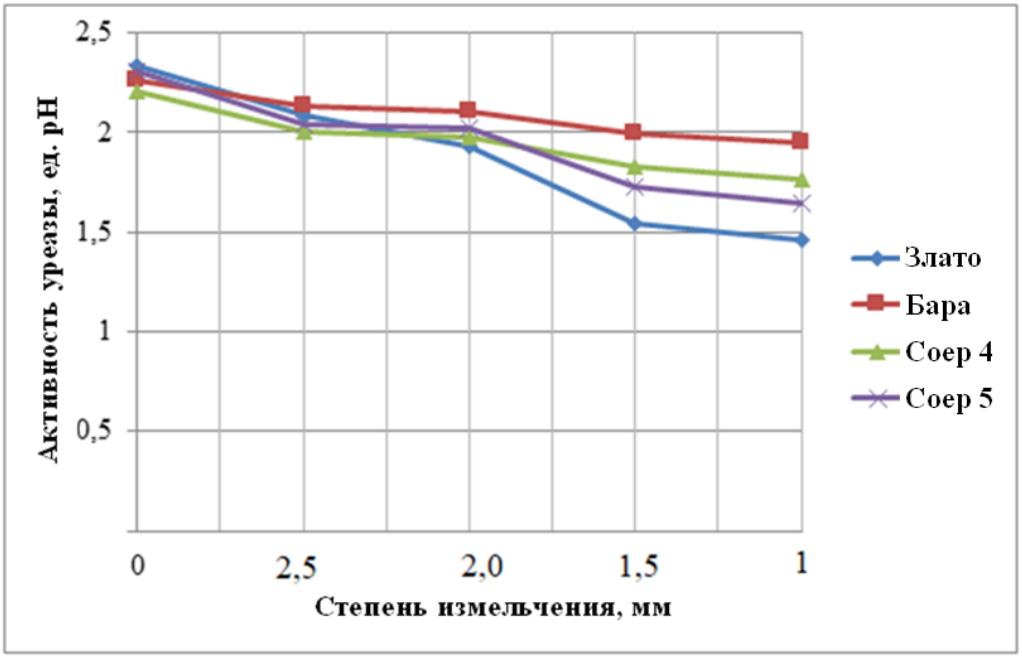


Рисунок 4.34 – Зависимость активности уреазы от степени измельчения зерна сои

Исследованиями установлена зависимость массопередачи при гидродинамической обработке от степени измельчения зерна сои. После 8-часовой обработки массопередача и, соответственно, продвижение растворителя только начинаются. С течением времени проницаемость пор повышается, проникновение влаги приобретает характер слабой инертности. Это объясняется слабой активностью гидродинамических микропотоков и тупиковостью пор. Данное обстоятельство подтверждает теоретическое предположение о необходимости воздействия на диффузию, оцениваемую коэффициентом диффузии, изменением размерного состояния объекта обработки. Снижение сопротивления диффузии возможно за счет увеличения единичных площадей измельченного зерна сои. Важным технологическим параметром является степень измельчения.

Исследование показателей, представленных на рисунке 4.34, подтверждает общую теоретическую закономерность воздействия на процесс массопередачи измельчения гидродинамической обработкой единичных обрабатываемых площадей сыпучей продукции растениеводства.

Результаты исследований позволяют считать степень измельчения зерна сои важным технологическим фактором обработки. В начальном состоянии активность уреазы для всех сортов зерна сои приблизительно одинакова – 2,1–2,3 ед. pH. В последующем, по мере измельчения, она уменьшается. При степени измельчения 2,5 мм она составляет 2,0–2,13 ед. pH, при 2,0 мм – 1,93–2,1 ед. pH, при 1,5 мм – 1,5–1,9 ед. pH, при 1,0 мм – 1,46–1,9 ед. pH, что в целом составляет 60 % уменьшения активности уреазы от начального состояния. Таким образом принято, что оптимальная степень измельчения находится в интервале 1,5–1,0 мм; дальнейшее уменьшение размеров частиц не целесообразно.

4.3.3 Исследование концентрации окисляющего раствора

Концентрация окисляющего раствора при инактивации зерна сои имеет существенное значение для повышения технологической эффективности процесса ее обработки. На практике при инактивации зерна сои используют инертное средство – пероксид водорода. Он воздействует на ингибиторы как окисляющее средство, ускоряющее инактивацию. На этом основании при экспериментальных иследованиях уделяли внимание концентрации окисляющего раствора, так как установлено, что процесс массопередачи, интенсифицированный ультразвуковыми пульсирующими микропотоками, ведет в зоне обрабатываемой поверхности к химической реакции, диссоциирующей пероксид водорода [271]. В этой связи проверяли технологическую достаточность образованного пероксида водорода для инактивации ингибитора трипсина и уреазы.

На рисунке 4.35 представлена зависимость снижения активности уреазы от концентрации раствора пероксида водорода в воде 3 %, 6, 9 и 12 %.

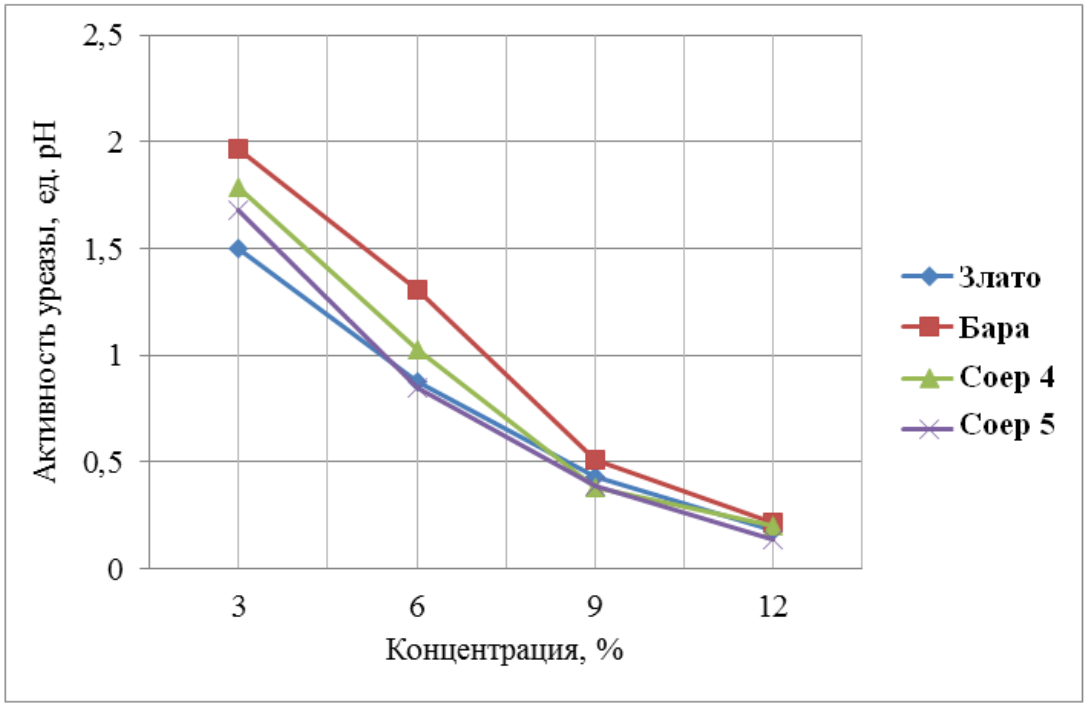


Рисунок 4.35 – Зависимость изменения активности уреазы
от конценрации пероксида водорода в растворе

Как видно из рисунка 4.35, с увеличением концентрации окисляющего раствора заметно изменяется активность уреазы, а при содержании пероксида водорода 12 % она достигает нормативных показателей. При такой концентрации раствора наблюдается активизация его взаимодействия с белком зерна сои, что ускоряет процесс нарушения его межклеточной структуры и интенсифицирует отделение ингибиторов трипсина со стенок клетки, как предположительно было теоретически установлено в главе 2. Окисленные белки быстрее проявляют гидрофильные свойства и лучше поддаются перевариванию в желудочно-кишечном тракте [269]. В последующем процентное соотношение пероксида водорода в растворе будет уточнено в зависимости от количества зерна сои, диссоциируемого в ходе химической реакции в пульсирующих кавитирующих потоках жидкости.

4.3.4 Исследование зависимости изменения активности ингибитора трипсина от времени замачивания зерна сои

Согласно выработанной схеме опыта, в качестве объектов исследования

были приняты образцы зерна сои, измельченные до крупности мелкого помола. Полученные образцы подвергали замачиванию в течение 1 ч, 4, 6 и 8 ч.

Продолжительность процесса массоперередачи зависит от времени обработки и создания условий для уменьшения сопротивления диффузии. На основании данных, представленных на рисунке 4.35 и в таблицах 4.6 и 4.6, расчитаны табличные показатели изменения сопротивления диффузии при гидродинамической 8-часовой обработке зерна сои (рисунок 4.36).

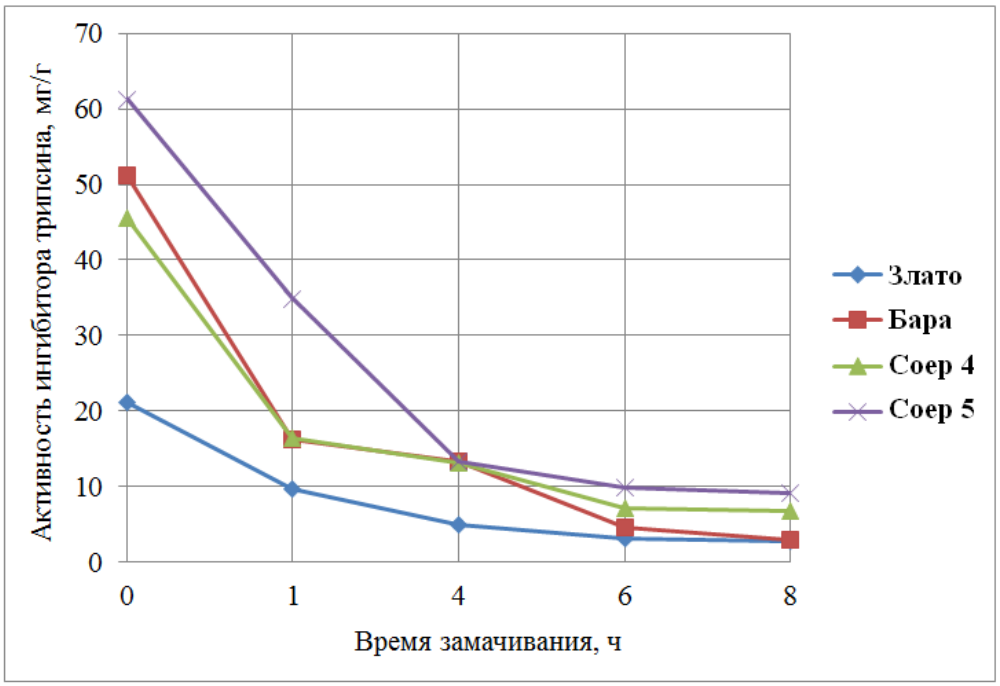


Рисунок 4.36 – Зависимость изменения активности ингибитора трипсина от времени замачивания

Сначала создаются условия для гидродинамического продвижения жидкости, а затем, по мере повышения проходимости пор и устьиц, протекает сам процесс инактивации. Этот процесс длительный. Установлено, что активность ингибитора трипсина снижается с увеличением времени замачивания и степени измельчения зерна сои. Изменение активности уреазы зависит прежде всего от степени измельчения зерна сои. Определено, что сопротивление диффузии при удалении уреазы и ингибиторов трипсина по своей абсолютной величине различно. Уреаза, представляющая собой фермент, осуществляющий гидролитическое расщепление мочевины с образованием аммиака и углекислого газа, составляет приблизительно 6 % от

количества всех белков, ее активность более 0,3 ед. pH. Этап активного снижения (до 70 %) происходит в период первых 4 ч замачивания, к 6-му часу активность снижения показателя ингибитора трипсина достигает 80 %, а затем заметно падает, и процесс продолжается в безрезультативной линейной зависимости. Необходимо отметить, что сорт Злато имел самые высокие показатели снижения активности ингибитора трипсина в зависимости от времени обработки.

Замачивание является простейшим методом, его результативность крайне низка по параметрам качества и длительности процесса, поэтому он может быть использован только в качестве изучения закономерности массопередачи.

Рисунок 4.37 позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, 8-часовая гидродинамическая обработка способствует удалению всего 48,4 % уреазы и 20 % ингибитора трипсина. Это явно недостаточные показатели.

Во-вторых, измельчение зерна сои имеет существенное значение для удаления антипитательных веществ (таблица 4.8).

По данным таблицы 4.8 установлена целесообразность измельчения зерна сои в интервале размеров 1,5–1,0 мм.

Таблица 4.8 – **Зависимость активности уреазы и ингибитора от размеров измельчения**

Показатель	Размеры измельчения, мм				
	5,0 (нативная)	2,5	2,0	1,5	1,0
Активность уреазы, ед. pH/%	2,31/100	2,15/7	2,01/13	1,75/53	1,21/48
Активность ингибитора, г/мг/%	61,3/100	54,3/12	38,5/38	22,1/64	9,1/86

В-третьих, для повышения эффективности инактивации антипитательных веществ зерна сои следует обеспечить прежде всего снижение сопротивления диффузии, обеспечив тем самым усиление интенсивности массопередачи и массоотдачи.

4.3.5 Исследование качественных показателей зерна сои после гидротермической обработки

Тепловую обработку зерна сои проводили в автоклаве в течение 15 мин при температуре нагрева 120 °С и давлении 0,1 МПа. Качественные показатели зерна сои после тепловой обработки представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – **Качественные показатели зерна сои после тепловой обработки**

Сорт	Содержание, %					Активность	
	белка	жира	клетчатки	золы	БЭВ	уреазы, ед. pH	ингибитора, мг/г
Злато	37,42	23,51	6,70	5,24	25,93	0,68	6,21
Бара	32,37	21,87	6,90	7,08	27,78	0,59	7,17
Соер 4	28,49	21,10	6,95	7,53	31,33	0,57	5,02
Соер 5	35,40	21,88	6,78	5,78	26,36	0,64	4,90

Установлено, что гидротермическая обработка способствует уменьшению активности ингибитора трипсина и уреазы. Однако активность уреазы не достигает показателей нормы. При высоких температуре и давлении повышается на 1,2–1,7 % содержание жира, уменьшается содержание клетчатки из-за распада целлюлозы и протекает процесс денатурации. Кроме того, температурная обработка ведёт к потере аминокислот – лизина, гистидина, аргинина, треонина и фениланина, а также 90 % витаминов [284].

4.4 Динамика процесса экстрагирования зерна сои ультразвуковом

Как было отмечено ранее, физико-химическая обработка зернового материала, основанная на использовании эффекта воздействия воды и реактивных свойств кислорода, обладает высоким потенциалом. Он связан прежде всего с возможностями значительного ускорения процесса инактивации; сохранения в обрабатываемом материале биологически заложенных аминокислот, особенно незаменимых; повышения протеиновой и продуктовой ценности; безопасности получаемого корма; создания оборудования небольших габаритных размеров модульного типа для производства кормов с различными объемами производства. Кинетика

химического воздействия на зерно, представленная на рисунке 4.37, по параметру скорости реакции постоянна. При этом технологические возможности ограничены и связаны со временем воздействия, а при гидротермической обработке – еще и с повышенным энергопотреблением.

Теоретические исследования процессов массопередачи, представленные во второй главе, позволили охарактеризовать кинетические явления, протекающие при ультразвуковой обработке под воздействием активных пульсирующих акустических микротечений, развиваемых кумулятивными кавитационными схлопываниями паровоздушных пузырьков. Это дает воможность повысить интенсивность массообменных процессов за счет нарушения структурного состояния зерна, воздействовать на макромолекулы белка и выводить с их поверхности в раствор белки ингибитора трипсина.

4.4.1 Исследование активности ингибитора трипсина

Процесс гидратации, протекающий между водой и расположенными на поверхности макромолекулами белка ингибитора и гидрофильными группами, разрушает связи, удеживающие ионы, переходящие в раствор. Таким образом, исходя из закономерности кинетики растворения А. Н. Щукарева, растворенный ингибитор трипсина значительно интенсивнее переходит в пульсирующие микротечения жидкости и отводится в основную массу раствора. Согласно принятой схеме экспериментальных исследований, растворение и удаление из размолотого зерна сои ингибитора трипсина осуществляли несколькими путями. Для интенсификации процесса экстрагирования зерно сои обрабатывали ультразвуком частотой 18 и 20 кГц на ультразвуковой установке УЗУ 4-1,6-О в течение 10 мин, 20, 30, 40 и 50 мин. Результаты исследований представлены на рисунках 4.37 и 4.38.

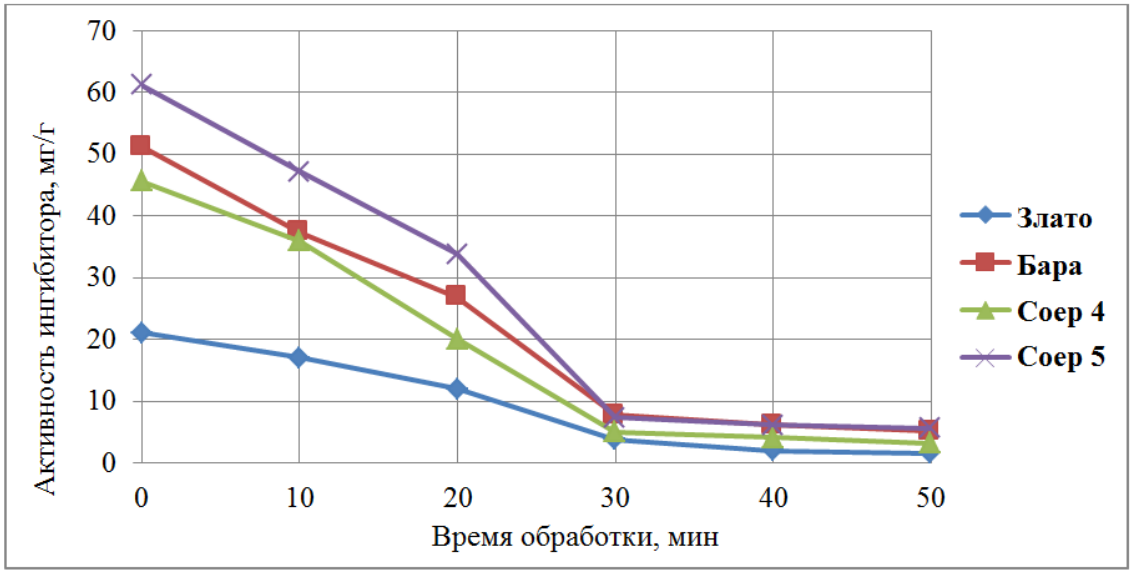


Рисунок 4.37 – Зависимость активности ингибитора трипсина от времени обработки (частота ультразвука 18 кГц)

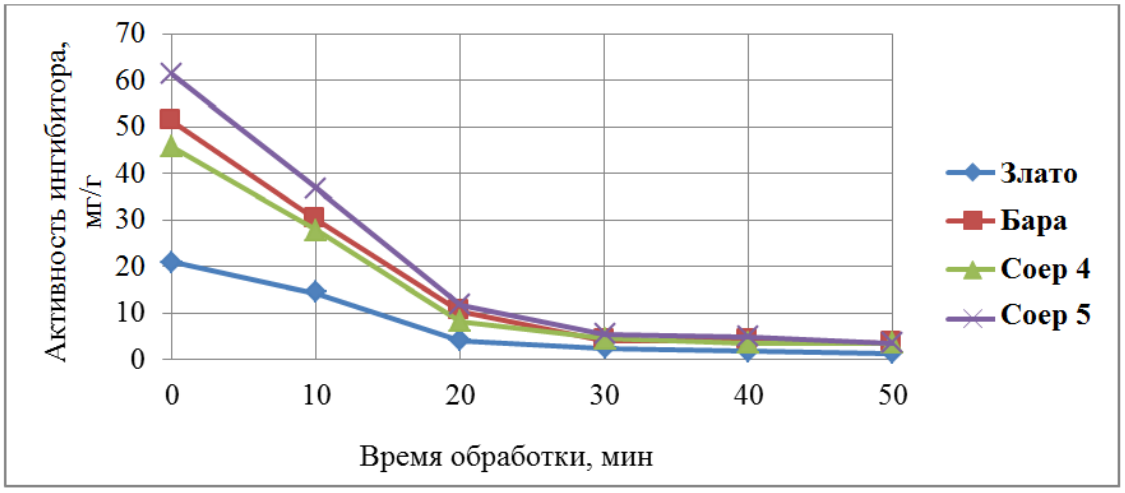


Рисунок 4.38 – Зависимость активности ингибитора трипсина от времени обработки (частота ультразвука 20 кГц)

Из рисунка 4.37 следует, что на первые 10–20 мин ультразвукового воздействия приходится начальная стадия разрушения микросвязей в структуре зерна сои. Происходят насыщение пор и устьиц влагой, их подготовка к последующему активному продвижению влаги за счет пульсирующих микропотоков, образуемых постоянным подталкиванием слоев жидкости и изменяющимся акустическими колебаниями частотой 18 кГц. При этом активирующиеся кумулятивные удары обеспечивают условия для создания внутреннего давления. Интенсивное снижение активности ингибитора трипсина наблюдается после 30 мин обработки, далее снижение

активности ингибитора незначительно.

По сравнению с простым замачиванием (см. рисунок 4.38) интенсивность процесса снижения активности ингибитора трипсина при ультразвуковой обработке увеличивается на 86 %. Так, например, для сорта Злато при простом замачивании в течение 8 ч этот показатель составляет 2,7 мг/г, а при ультразвуковой обработке уже к 30 мин он достигает 2,3 мг/г. Это свидетельствует о высокой эффективности применения ультразвука в процессе инактивации ингибитора трипсина в сое.

Идентичный характер протекания процесса удаления ингибитора трипсина наблюдается и при повышении частоты ультразвука до 20 кГц (см. рисунок 4.39). При этом эффективность снижения активности ингибитора трипсина повышается. Так, у сорта Злато при 30-минутной обработке он дополнительно уменьшается на 39 %, Бара – на 48 %, Соер 4 – на 8 %, Соер 5 – на 25 %.

Дальнейшее повышение частоты ультразвука не оказывает позитивных воздействий на интенсивность инактивации зерна сои. Исходя из этого следует сделать вывод о физической, технологической и технической достаточности использованияя ультразвука частотой 20 кГц при постоянных значениях амплитуды колебаний $4{,}99 \cdot 10^{-6}$ м, плотности мощности $9{,}79 \cdot 10^{3}$ Вт/м^2 и интенсивности акустической волны $2{,}62 \cdot 10^{5}$ Вт/м^2, что явилось основой для конструктивной реализации способа.

4.4.2 Исследование изменения показателя активности уреазы

Отрицательные свойства фермента уреазы заключаются в осуществлении гидролититического расщепления мочевины с образованием аммиака и углекислого газа. В зерне сои содержание уреазы составляет примерно 6 % от количества всех белков, что ухудшает такие органолептические показатели, как вкус и запах, а активность превышает 0,3 ед. pH. Данное обстоятельство ведет к снижению качества кормов за счет плохой увояемости белков и аминоксилот.

Активность уреазы снижают различными способами, в частности, при экструдировании она уменьшается до 0,1–0,2 ед. pH. Это достаточно высокий показатель, но даже он приводит к нарушению переваримости протеина. Гидротермическая обработка при инактивации уреазы имеет те же последствия, что и при удалении ингибитора трипсина.

В наших исследованиях преследовали цель максимального снижения активности уреазы путем ультразвуковой обработки при теж же режимах, что и при инактивации ингибиторов трипсина. Существенным при этом является достижение положительных результатов по обоим показателям при одновременной обработке в разработанном оборудовании.

На рисунке 4.39 представлена зависимость активности уреазы от применяемых способов экстракции.

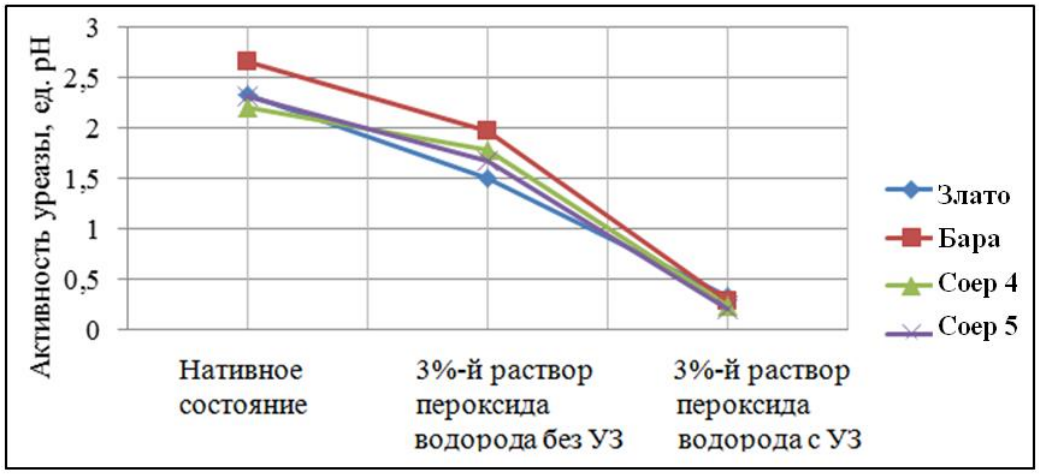


Рисунок 4.39 – Активность уреазы в зависимости от способов экстракции

Для сравнения интенсивности процесса инактивирования уреазы при воздействии ультразвука исследовали зерно сои средней фракции. Принята 3%-я концентрация раствора пероксида водорода в ультразвуковом поле частотой 20 кГц в течение 30 мин.

При выбранных параметрах обработки (частота ультразвука 20 кГц, время обработки 30 мин, 3%-я концентрация раствора пероксида водорода) активность уреазы снижается на 85–98 % в зависимости от сорта сои. Необходимо отметить, что при таком режиме достигается нормируемое значение активности уреазы и у всех остальных исследуемых сортов сои.

4.4.3 Исследование основных показателей качества зерна сои после ультразвуковой обработки

В результате проверки зерна сои, прошедшего ультразвуковую обработку в течение 30 мин при 3%-й концентрации раствора пероксида водорода и частоте ультразвуковых колебаний 20 кГц, установлены следующие качественные показатели (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – **Качественные показатели зерна сои после ультразвуковой обработки**

Сорт	Содержание, %					Активность	
	белка	жира	клетчатки	золы	БЭВ	уреазы, ед. pH	ингибитора, мг/г
Злато	38,03	21,10	6,57	5,09	26,98	0,30	2,3
Бара	33,97	20,21	7,02	7,02	27,84	0,29	4,0
Соер 4	30,12	19,41	6,96	8,04	33,64	0,24	4,6
Соер 5	36,89	19,83	6,99	5,12	28,61	0,21	3,6

Результаты исследований, представленные в таблице 4.10, свидетельствуют о том, что ультразвуковая обработка способствует значительному (94–96 %) снижению активности ингибитора трипсина, что в целом не уступает показателям при гидротермической обработке зерна сои (см. таблицу 4.9).

По показателю снижения активности уреазы исследуемый способ эффективнее на 20 %. Снижение активности уреазы до нормируемых значений достигается также при 30-минутной обработке.

Установлено, что при ультразуковой обработке происходят небольшие изменения по содержанию жира (на 0,4 – 3,0 %) и клетчатки (на 0,5 – 3,8 %), что связано с процессом окисления некоторой их части. С учетом того, что при низкотемпературной ультразвуковой обработке практически отсутствуют тепловая денатурация, плавление и разрушение аминокислот, витаминов и минеральных составляющих, несомненным является тот факт, что теоретически, технологически и конструктивно исследованные направления инактивации зерна сои обладают высоким научно-производственным потенциалом.

4.4.4 Анализ экспериментальных данных технологического процесса обработки зерна сои

Установив минимальные (3 мг/г) и максимальные (6 мг/г) показатели активности ингибитора трипсина были определены оптимальные параметры обработки по профилям предсказанных значений, функциям желательности и трехмерным профилям отклика желательности (рисунки 4.40, 4.41).

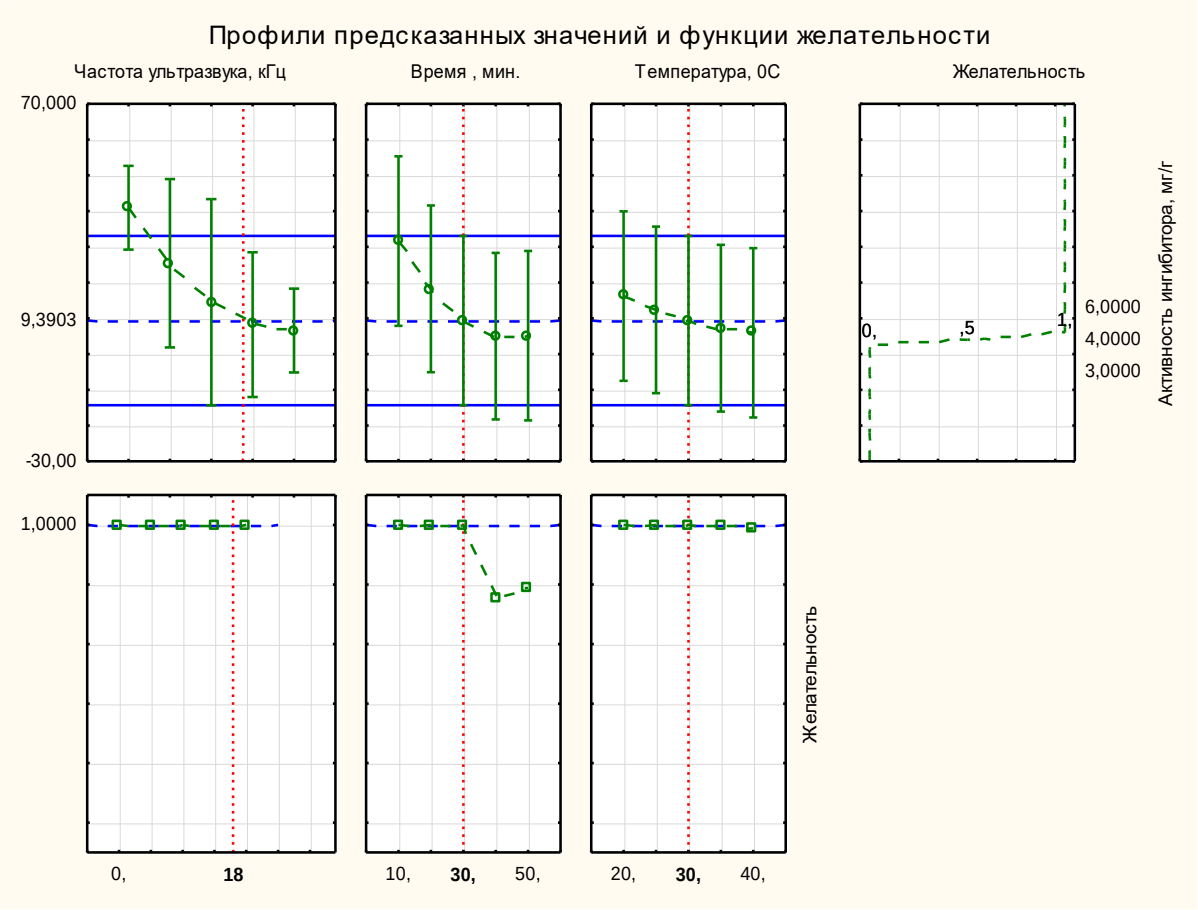


Рисунок 4.40 – Профили значений и функции желательности показателей снижения активности ингибитора трипсина

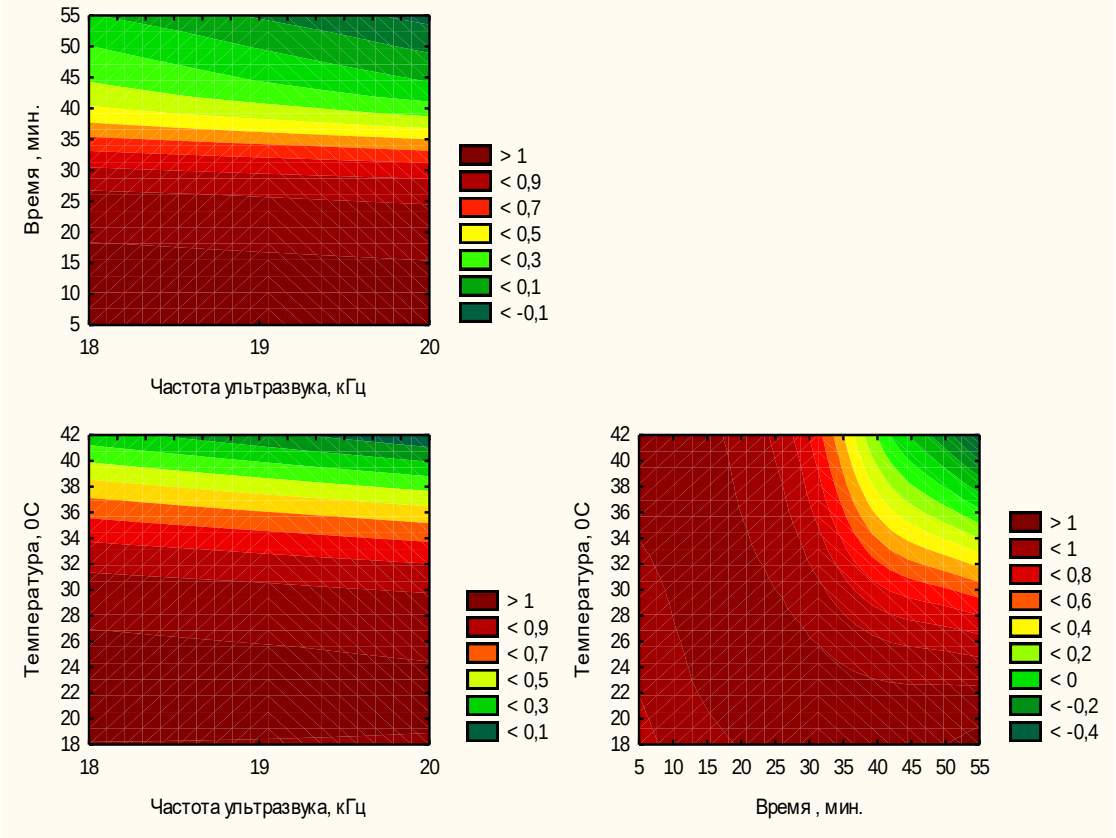


Рисунок 4.41 – Поверхности и контуры желательности

Для получения поверхностей желательности были приняты интервалы активности ингибитора: 0–3,0 мг/г; 0,5– 4,0; 1,0–5,0 мг/г. Анализ полученных двухмерных сечений поверхности отклика и профилей значений и функции желательности (см. рисунок 4.41) показал, что сою необходимо обрабатывать не менее 30 мин при температуре 30 °С и частоте ультразвука 18–20 кГц. При этом при увеличнии температуры время обработки сокращается. По экспериментальным данным были построены поверхности отклика для ультразвуковой обработки частотой 18 и 20 кГц (рисунки 4.42 и 4.43).

Исходя из анализа поверхностей отклика, представленных на рисунках 4.43 и 4.44, можно заключить, что технологический процесс осуществляется при установленных частотах с одинаковыми интенсивностью и закономерностью, однако при частоте 20 кГц он протекает интенсивнее.

Исходя из вышеизложенного установлены технологические параметры для обработки зерна сои, представленные в таблице 4.11.

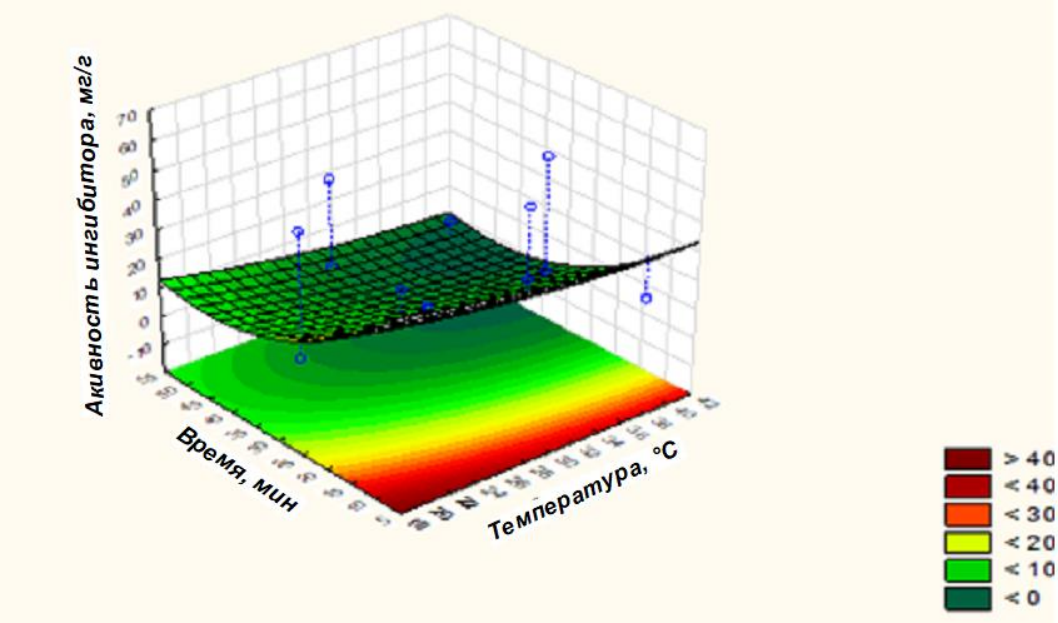


Рисунок 4.42 – Поверхность отклика обработки зерна сои при частоте ультразвука 18 кГц

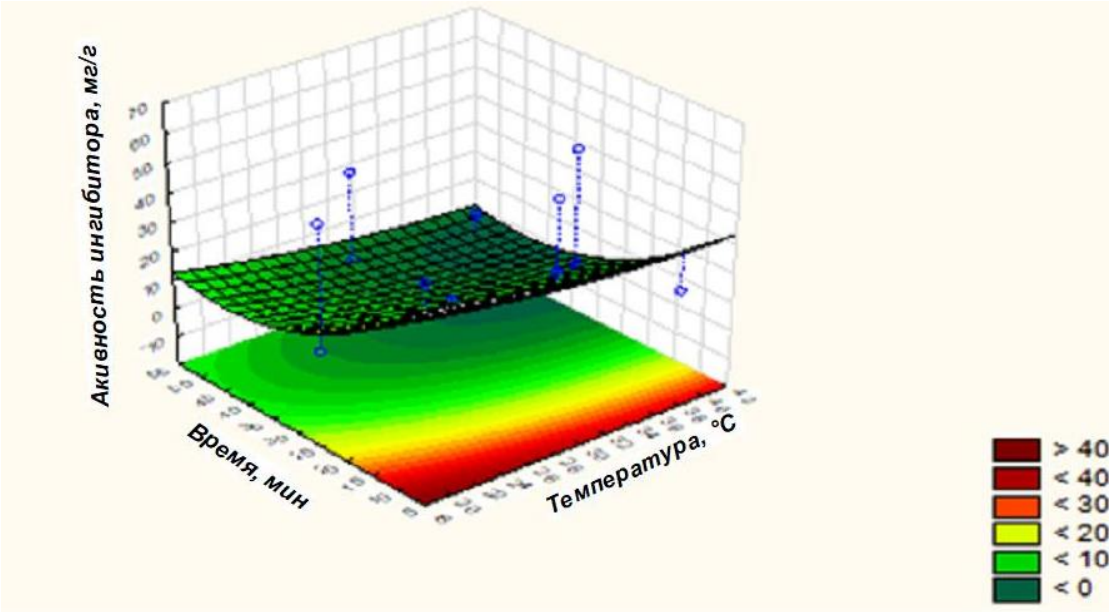


Рисунок 4.43 – Поверхность отклика обработки зерна сои при частоте ультразвука 20 кГц

Таблица 4.11 – **Режимные параметры обработки зерна сои**

Параметр	Единица измерения	Значение
Температура воды	ºС	30
Продолжительность обработки	мин	30
Частота ультразвуковых колебаний	кГц	18–20
Интенсивность ультразвукового поля	Вт/см^2	не менее 1
Концентрация раствора	%	3
Диисперсность помола	мм	1,5–1,0

По результатам факторного эксперимента была получена регрессионная математическая модель, адекватно отражающая зависимость активности ингибитора трипсина, времени обработки, температуры и частоты ультразвука:

$$Y = 10,236 + 2,3X_1 - 1,079X_2 - 0,077X_3 -$$
$$-0,071X_1^2 + 0,012X_2^2 + 0,014X_3^2, \quad (4.3)$$

где Y – активность ингибитора трипсина, мг/г;

X_1 – частота ультразвука, кГц;

X_2 – время обработки, мин;

X_3 – температура, °С.

При построении математической модели не произошла потеря данных, N = 15. Величина достоверности апроксимации R^2 = 0,998 свидетельствует об адекватности разработанной модели.

Анализ процесса обработки зерна сои позволяет сделать вывод о возможности снижения времени на проведение экспериментов и прогнозировать изменение активности ингибитора трипсина в зависимости от времени, частоты ультразвука и температуры суспензии.

4.4.5 Обоснование конструкции универсального оборудования непрерывного действия для обработки зерна пшеницы и сои

Исходя из данных теоретического анализа, экспериментальных данных и результатов математического моделирования для конструктивного решения наиболее перспективной принята схема универсального технического средства непрерывного действия, основанного на принципе работы шнекового подающего транспортного механизма [296–300]. Идея использования шнекового механизма сконцентрирована прежде всего на возможности создания нескольких рабочих зон на одном валу и корпусе шнека, изменения частоты вращения вала шнека посредством мотор-редуктора и частотного преобразователя и на этой основе варьирования временем прохождения обрабатываемого материала под действием ультразвуковых волноводов,

установленных на корпусе. Наряду с этим на одном шнековом валу можно проектировать винты разных конструктивных размеров и количеством в зависимости от предусмотренных процессов в технологических операциях. Рассматриваемое техническое решение обладает уникальными свойствами универсальности, обеспечивающими непрерывное выполнение всех технологических операций: загрузка зерна сои, создание водно-соевой суспензии, обработка суспензии ультразвуком в течение установленного времени, предварительный и окончательный отжим обработанной продукции и ее выгрузка. Это позволяет за счет основных установленных режимных показателей осуществить важную составляющую современного производства кормов и пищевых продуктов – частичную автоматизацию, которая заключается в автоматизации технологических операций и наиболее эффективна тогда, когда управление процессами вследствие их сложности, скрытности и скоротечности практически недоступно человеку.

Разработанное оборудование позволяет использовать его с высокой степенью эффективности для различных технологических целей при переработке сыпучих материалов растениеводческой продукции и суспензий, в первую очередь зерновых и зернобобовых культур, а также семян посолнечника. Это обеспечивается за счет установленных режимных и конструктивных параметров: диаметра и длины трубы шнека и частоты вращения вала шнека от приводного механизма. Наиболее технологически и технически предпочтительным является то, что по длине единого шнекового вала можно разместить различные зоны для выполнения отличающихся друг от друга технологических операций, в совокупности составляющих законченный технологический процесс. Технологические процессы подготовки зерна к помолу, очистки различных сыпучих материалов продукции растениеводства и инактивации зерна сои в общем виде идентичны, имеются лишь отличия в конечной цели обработки.

Шнековое подающее транспортное устройство используется на практике преимущественно для перемещения сыпучих грузов и различных видов суспензий. В нашем случае перемещение дополнено технологическими операциями ультразвуковой обработки зерна пшеницы и сои.

Конструктивная схема шнекового подающего транспортера для ультразвуковой обработки зерна пшеницы и сои представлена на рисунке 4.44.

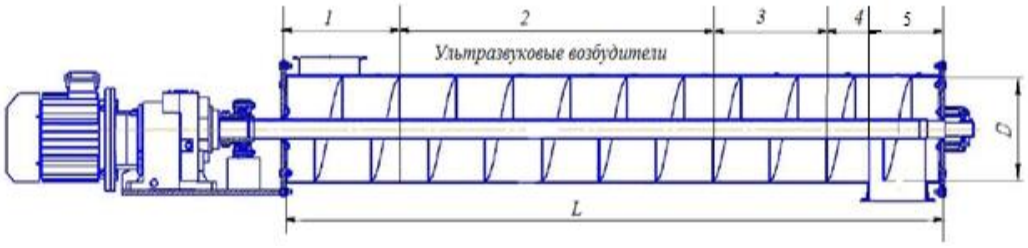


Рисунок 4.44 – Конструктивная схема шнекового подающего транспортера для ультразвуковой обработки зерна пшеницы и сои

Конструктивно шнековый механизм расположен в трубе и по длине подразделяется на рабочие зоны (см. рисунок 4.45): 1 – приемки материала для обработки и создания водно-зерновой суспензии; 2 – ультразвуковой обработки; 3 – предварительного отжима; 4 – окончательного отжима обработанного сырья; 5 – выгрузки обработанного сырья. При этом все технологические операции по переработке сыпучей продукции растениеводства могут быть сведены в одну общую технологическую схему (рисунок 4.45), дополненную для примера входными данными для конструирования установки для инактивации зерна сои.

В технологической схеме представлены обобщенные данные, учитывающие особенности технологических процессов, для которых проектируется установка. В частности, для установок для переработки зерна сои и пшеницы определены следующие входные данные:

- ультразвуковая обработка зерна сои и пшеницы должна происходить в суспензии пропорцией 50:50; для обеспечения постоянного уровня жидкости шнековый механизм должен быть расположен под углом к горизонтали и снабжен подпиточным устройством; для установления рабочей температуры обработки суспензии устройство должно иметь систему подогрева;
- в зависимости от времени обработки суспензии установку необходимо укомплектовать пьезоэлектрическими колебательными системами с пьезокерамическими элементами, последовательно сформированными волновыми модулями, имеющими несколько излучающих поверхностей; данное конструктивное решение позволит снизить суммарное время УЗ-обработки и увеличить площадь обрабатываемой поверхности;

• установка должна быть приспособлена к поточно-технологической линии кормового цеха и мукомольного предприятия;

• установка должна быть мобильной и модульно встраиваемой в производство;

• установка должна быть легко переналаживаемой для обработки различной продукции кормовой и пищевой индустрии в соответствии с назначением и целью обработки;

• рабочая часть и питающий шнек установки должны обеспечивать обработку материала в пределах установленного критического времени.

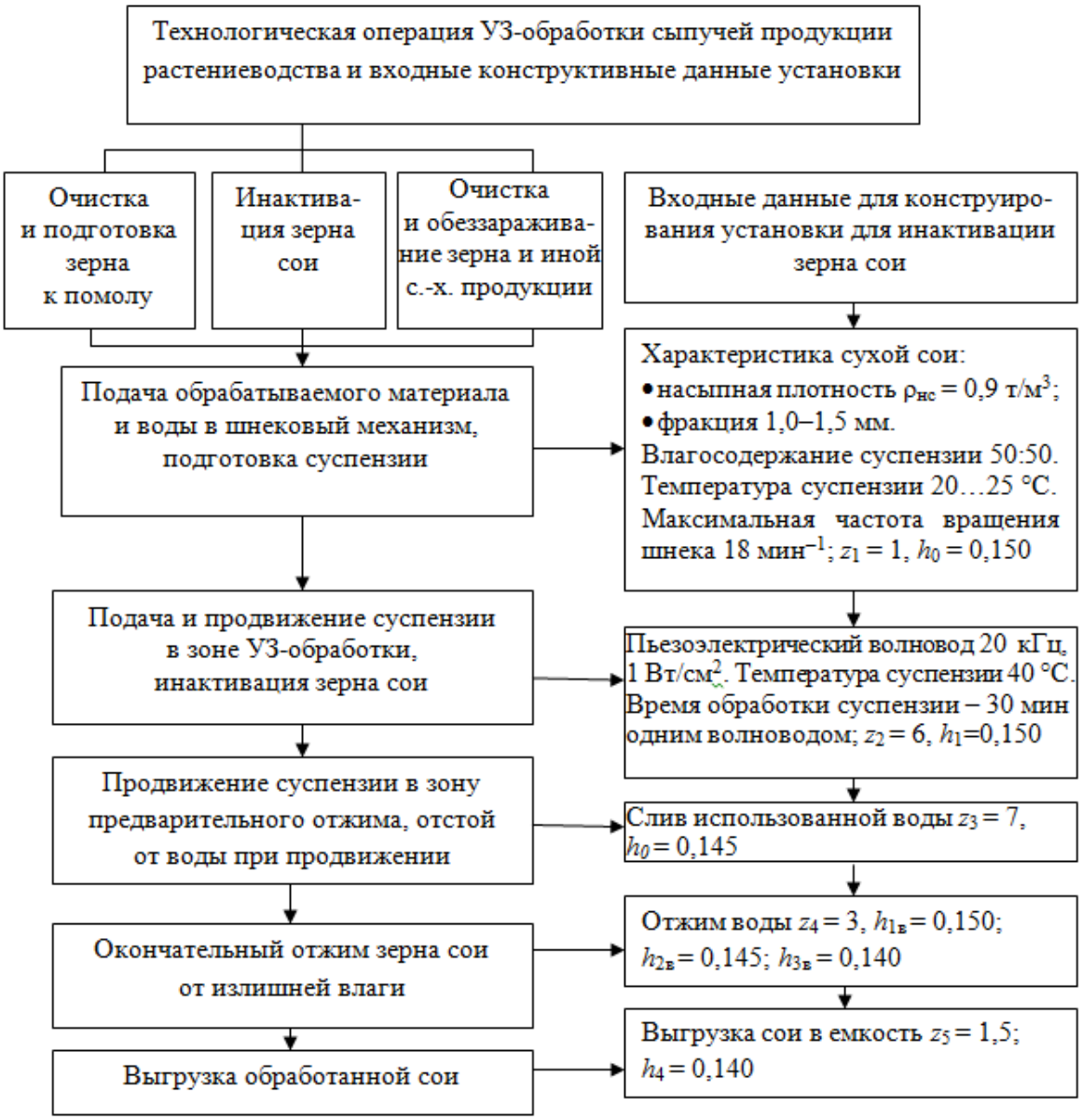


Рисунок 4.45 – Схема технологического процесса УЗ-обработки зерна сои с конструктивными входными данными

Данные конструктивного расчета сведены в таблицу 4.12.

Таблица 4.12 – **Конструктивные параметры установки**

№ п/п	Конструктивный параметр	Единица измерения	Расчетная формула	Значение
1	Диаметр шнека	мм	принято	200 (156 в зоне выгрузки)
2	Шаг шнека	мм	принято	155
3	Частота вращения шнека	мин$^{-1}$	$n = 2L / S$, где L – длина шнека, м; S – шаг шнека, м	18 (устанавливают мотор-редуктором и частотным преобразователем)
4	Производительность шнека	т/ч	$Q = \frac{En\varphi\rho_н R_\beta D}{0,275}$, где E – отношение шага винта к диаметру винта; n – частота вращения винта, мин$^{-1}$; φ – коэффициент заполнения желоба; $\rho_н$ – насыпная плотность груза, т/м; R_β – коэффициент уменьшения производительности от наклона конвейера; D – диаметр шнека, м	1,7
5	Мощность привода	кВт	$N = \frac{KN_0}{\eta}$, где K – коэффициент запаса мощности; η – КПД привода, η = 0,6…0,85; N_0 – мощность на валу винта, кВт	Принимают в зависимости от шага шнека, частоты его вращения и производительности
6	Минимальное время обработки в установке	с	$t = \frac{L}{v}$, где v – осевая скорость винта, м/с; L – длина, м.	30
7	Регулируемый угол наклона шнекового механизма	град.	–	15–45
8	Давление в зоне отжима	МПа	$P_о$	0,2

Схема установки представлена на рисунке 4.46.

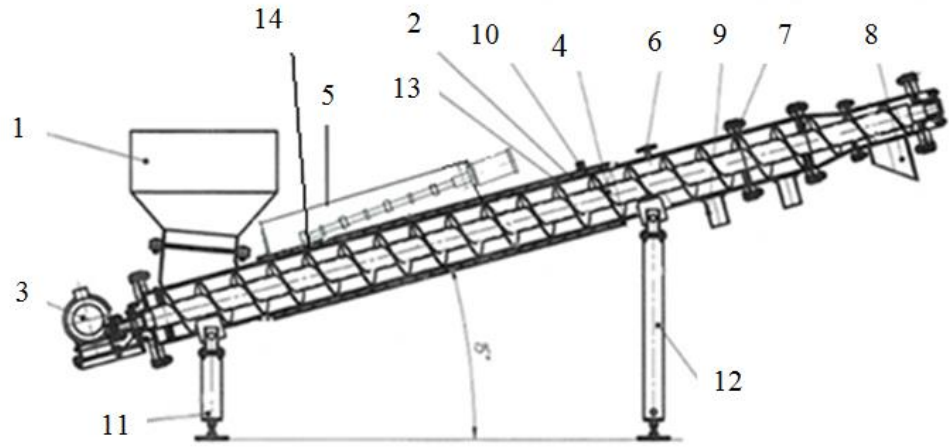


Рисунок 4.46 – Схема ультразвуковой установки для обработки зерна:
1 – бункер; 2 – корпус; 3 – мотор-редуктор; 4 – шнек; 5 – ультразвуковой излучатель; 6 – штуцер подачи воды; 7 – перфорированная перегородка; 8 – выгрузной патрубок; 9 – патрубок с сеткой для отвода воды; 10 – датчик температуры; 11 – неподвижная стойка; 12 – регулируемая стойка; 13 – кабельный нагреватель; 14 – защитный экран с утеплителем

Зерно загружают в бункер 1, с помощью шнека 4 оно перемещается вверх по корпусу 2 установки. Ультразвуковая обработка зерна осуществляется системой последовательных ультразвуковых пьезоэлектрических излучателей 5, расположенных по всей длине зоны обработки ультразвуком. Через штуцер 6 в корпус подается вода в количестве, необходимом для поддержания уровня влажного зерна выше уровня размещения ультразвукового излучателя. Уровень подаваемой воды ограничивается углом подъема установки 30°, обеспечивающим время нахождения суспензии в зоне УЗ-обработки. Для контроля заполнения водой служат два смотровых окна, установленные на противоположных сторонах корпуса напротив друг друга. Зерно подвергается обработке в течение времени нахождения в рабочем диапазоне действия ультразвуковых излучателей. Необходимый диапазон действия ультразвуковых излучений на обрабатываемую суспензию устанавливают частотой вращения и шагом витка шнека.

Для удаления (отжима) воды из зерна после обработки в корпусе предусмотрена перфорированная перегородка 7, через которую зерно продавливается шнеком, тем самым осуществляется предварительный отжим. За перфорированной перегородкой имеется коническое сужение корпуса, проходя через которое зерно за счет уплотнения подвергается второму, окончательному, отжиму. Вода удаляется через патрубки с сеткой 9, один из которых установлен перед перфорированной перегородкой, а второй – перед конусом корпуса. Затем обезвоженное зерно выгружается через выгрузной патрубок 8.

С целью соблюдения температурного режима часть корпуса установки в зоне ультразвуковой обработки снабжена кабельным нагревателем 13. Температуру нагрева регулируют и контролируют датчиком температуры 10. Нагрев необходим лишь при пуске установки, в дальнейшем температурный режим поддерживается процессами внутреннего трения микропотоков при УЗ-обработке.

Корпус закреплен на двух стойках – неподвижной 11 и регулируемой 12, с помощью которой регулируют угол наклона.

Бункер загрузки зерна имеет два исполнения:

- для расположения корпуса установки под углом 15°…30°.
- для расположения корпуса установки под углом 35°…45°.

Шнек установки включает в себя:

- зону загрузки из бункера;
- рабочую зону, где зерно перемешивается с водой, образуя 50%-ю водную суспензию, и обрабатывается ультразвуком;
- зону предварительного обезвоживания суспензии за счет свободного стекания воды в рабочую зону;
- зону отжима, где из суспензии удаляется до 88 % влаги; при этом вода после отжима возвращается в шнек, что существенно сокращает технологический расход воды.

Регулировку подачи зерна в рабочую зону осуществляют с помощью изменения частоты вращения шнека, а также ножевым шибером, ограничивающим поступление сухого зерна сои из бункера. Давление в зоне отжима обеспечивается коническим сужением корпуса шнека и соответствующим плавным уменьшением диаметра винта.

На рисунках 4.47 и 4.48 представлена установка для УЗ-обработки сыпучей продукции растениеводства.

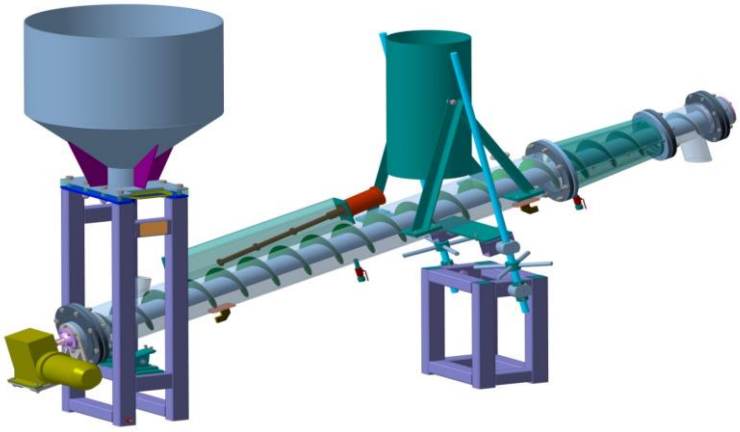


Рисунок 4.47 – Ультразвуковая установка для обработки сыпучей продукции растениеводства с фиксацией рабочих зон

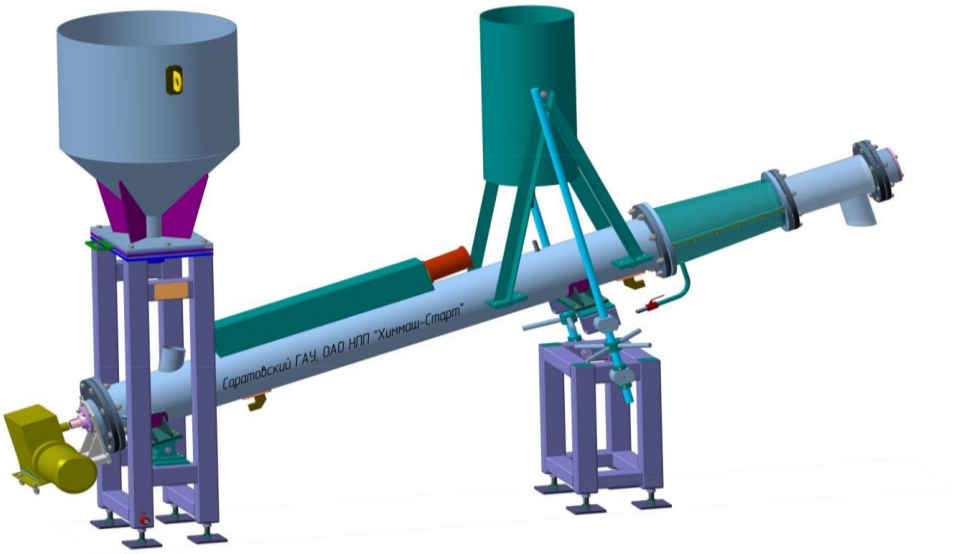


Рисунок 4.48 – Общий вид ультразвуковой установки для обработки сыпучей продукции растениеводства

Установка позволяет обрабатывать зерно с регулируемыми временем и температурой обработки, что позволяет применять данную конструкцию для обработки зерна пшеницы, сои и другого идентичного сырья.

Разработана также конструкция установки периодического действия малой производительности для ультразвуковой обработки зерна сои. Она основана на инактивации ограниченного объема продукта [275] и имеет определенную практическую ценность для производства малого количества корма в условиях индивидуальных малых предприятий (рисунок 4.50).

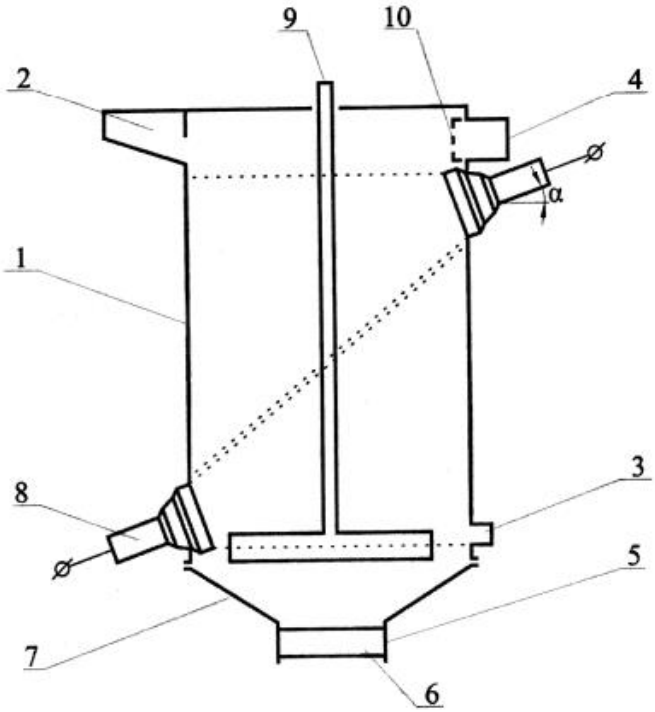


Рисунок 4.49 – Ультразвуковая установка малой производительности для обработки зерна сои: 1 – корпус; 2 – загрузочный лоток; 3 – патрубок подачи жидкости; 4 –патрубок для вывода жидкости; 5 – выгрузной патрубок; 6 – выгрузное устройство; 7 – съемное дно; 8 – ультразвуковые излучатели; 9 – мешалка; 10 – фильтр

Конструктивные параметры для данной установки представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – **Конструктивные параметры установки малой производительности для обработки зерна**

№ п/п	Конструктивный параметр	Единица измерения	Расчетная формула	Значение
1	Производительность	кг/ч	$Q = 3600\dfrac{Wy}{t_з + t_м + t_в}\varphi,$ где W – объем рабочей камеры установки, м^3; y – плотность сырья, т/м^3; φ – коэффициент заполнения рабочей камеры; $t_з$, $t_м$, $t_в$ – время загрузки, мойки, выгрузки, с, $3600\dfrac{0,212\cdot 0,9}{60+1800+120}\cdot 0,35 = 120$	120
2	Объем рабочей камеры установки	м^3	$W = \dfrac{\pi D^2}{4}L,$ где D – диаметр корпуса, м; L – длина корпуса, м, $\dfrac{3,14\cdot 0,52^2}{4}\cdot 1 = 0,212$	0,212
3	Частота вращения мешалки	мин$^{-1}$	принято	10
4	Мощность двигателя	кВт	принято	0,25
5	Частота излучения	кГц	принято	18
6	Расход воды	м^3/ч	принято	0,63
7	Количество излучателей	ед.	принято	2
8	Габаритные размеры установки	мм		520×520×1000

Установка работает следующим образом. Воду подают через патрубок 3 (см. рисунок 4.50), а зерно – через загрузочный лоток 2. Обработка происходит в противотоке, когда зерно загружают сверху через загрузочный лоток 2, а жидкость подают снизу через патрубок подачи жидкости 3. Зерно перемешивается с жидкостью (температура 18…20 °С) в цилиндрическом корпусе 1 мешалкой 9 с одновременной акустической обработкой в течение 30 мин от двух ультразвуковых излучателей мощностью 1,6 кВт, создающих плотность акустической кавитации не менее 1 Вт/см^2. Затем зерно осаждается в нижней части устройства, откуда выгружается через патрубок 5, оборудованный выгрузным устройством 6 в съемном дне 7. Фильтр 10 препятствует пролету частиц в патрубок вывода жидкости 4.

Источники ультразвука 8 расположены по диагонали в противоположном направлении относительно друг друга с углом наклона α = 30°…40°, что позволяет добиться эффекта интенсивной кавитации по всему объему суспензии и повышения эффективности микротечений. При угле наклона менее 30° наблюдается снижение плотности акустической кавитации, что влечет за собой появление застойных зон и ухудшение обработки зерна, а при значениях α более 40° имеет место пересечение ультразвуковых волн, что приводит к неравномерности обработки зерна.

4.5 Результаты экспериментальных исследований очистки нерафинированных растительных масел от продуктов окисления и взвеси загрязнений

При экспериментальном моделировании режимных характеристик и конструктивно-параметрических показателей ультразвуковой установки для фильтрования масел установлено, что в связи с разной степенью загрязнённости, зависящей от принятой на производстве схемы предварительной очистки сырых и нерафинированных подсолнечных масел, не всегда обеспечивается необходимое постоянство качества фильтрации и, как следствие, резко падает производительность установки. Это объясняется значительными разбросами в показателях проницаемости среды, забиванием фильтровальной перегородки продуктами осадка. Поэтому энергия в обрабатываемом масле в форме импульса должна выделяться одновременно в большом количестве малых локальных зон, равномерно распределённых во всем рабочем объёме установки. Это обеспечит стабильно высокое качество очистки масла от первичных продуктов окисления.

Важным техническим решением при этом является направленный вынос твёрдых частиц из зоны фильтрационной поверхности установки для очистки масла в полость для их сбора и удаления. Протекающий в масле интенсивный массообменный процесс способствует снижению сил отталкивания одинаково заряженных мелкодисперсных частиц взеси загрязнений, упорядочению хаотических Броуновских движений (рисунок 4.50).

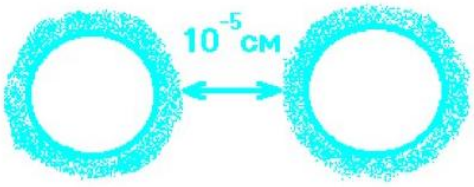


Рисунок 4.50 – Силы межмолярного притяжения

Сближение сил межмолярного притяжения в пространстве менее 10^{-5} см способствует агрегации, коагуляции и укрупнению частиц, их интенсивному осаждению и последующему съёму с фильтрационной поверхности слоя загрязнения, выносу частиц, что позволит повысить скорость фильтрации масла и, соответственно, производительность установки. Как было установлено теоретически, дополнительные механические колебания должны обеспечить подъем грубодисперсных частиц с фильтрационной поверхности и их перенос в накопительную емкость по наклонной поверхности продольными ультразвуковыми микротечениями.

4.5.1 Исследование количества взвешенных частиц в обрабатываемом масле

Концентрация взвешенных коллоидно-дисперсных частиц, находящихся в сыром и нерафинированном масле, зависит в начальный период от технологии очистки, принятой при производстве. При хранении мелкие взвешенные частицы загрязнений, не выделенные при центрифугировании, коагулируют, выпадают в осадок, портят вид и качество масла за счет зарождения свободных радикальных кислотных реакций, переходящих в дальнейшем в активную фазу свободной радикальной реакции, ведущей к порче масла.

Любое технологическое насыщение при производстве сырых и нерафинированных растительных масел требует дополнительных затрат на использование технических средств, энергетических и трудовых ресурсов, производственных площадей, что весомо сказывается на себестоимости

продукта. С этих позиций изучение количества взвеси мелких частиц загрязнений, остающихся в сырых и нерафинированных растительных маслах при различных способах их очистки, играет существенную роль в исследовании процесса и обоснования в последующем оптимальных конструктивных решений в целях повышения качества на момент производтва и сохранения стабильности показателей при хранении.

Количественные соотношения взвешенных частиц, содержащихся в контролируемом объеме жидкости, на стади проверок до и после очистки позволили судить о критичности состоянии вопроса, проследить кинетику и эффективность процесса очистки нерафинированных растительных масел от мелкодисперсных частиц загрязнения и осуществить необходимые исследования технологической и технической реализации поставленной цели. Зависимость концентрации загрязнений масел, очищенных после производства без центрифугирования и с центрифугированием с интенсификций процесса акустическими колебательными движениями, от времени обработки представлена на рисунке 4.51.

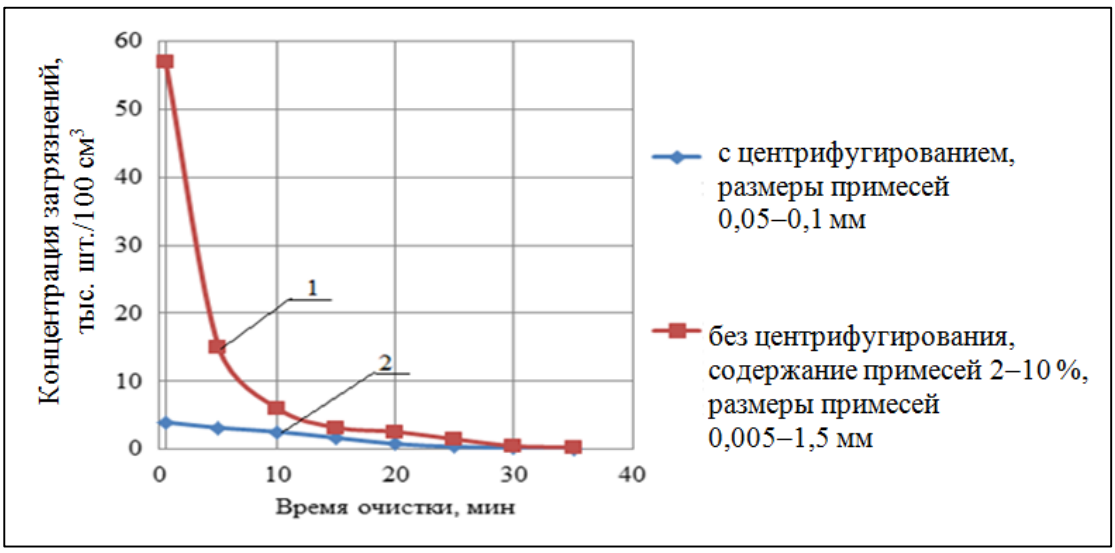


Рисунок 4.51 – Зависимость концентрации загрязнений от продолжительности разделения растительного масла при ультразвуковом воздействии

Установлено, что в условиях малых производств обычно не используют операции центрифугирования ввиду высокой стоимости оборудования. Считается достаточным проведение неконтролируемого осаждения. В результате

концентрация загрязнений в таком масле на момент его производства составляет 57 тыс. шт./100 см^3 (см. рисунок 4.52, график 1). Запах масла природный и приятный, но цветность и качество низкие, особенно это заметно уже через короткий срок его хранения (1,5–2,0 мес.). Исследованиями также установлено, что даже при простейшей операции центрифугирования концентрация загрязнений достигает 4–5 тыс. шт./100 см^3 (график 2 рисунка 4.52). Также очевидно, что масло, очищенное без центрифугирования, обладает значительным количеством грубодисперсных частиц, осаждающихся при очистке на фильтрационной перегородке и ухудшающих ее проницательную способность. Их необходимо удалять для повышения пропускной способности адсорбента. При воздействии ультразвука частотой 18…20 кГц уже после 5-минутной обработки наблюдалось резкое снижение концентрации взвешенных частиц, масло очищалось достаточно активно и к 30 мин очистки достигало достаточно высоких параметров чистоты. В дальнейшем его прогоняли через слой адсорбента. При этом одновременно решались две проблемы очистки:

- очистка от твердых примесей и загрязнений, укрупненных за счет коагуляции под воздействием ультразвуковых колебательных движений и осажденных на фильтрационной поверхности;
- ультразвуковые колебательные движения создавали пульсирующие микропотоки, способствующие интенсификации прогонки масла сквозь слой сорбента.

В порах и устьицах минерала сорбента происходят задержка и очистка масла от кислотных составляющих по принципу «твердое тело – газ».

Высокая результативность обработки ультразвуком наблюдалась у поверхности раздела двух фаз, где активизировался процесс диспергирования твёрдых включений в жидкой фазе и происходило эмульгирование восковых и других включений, выпадающих также в виде осадка. Концентрация загрязняющих частиц в масле в начальный период без центрифугирования составляла 57,4 тыс. шт./100 см^3. В последующем, по мере увеличения времени

очистки, этот показатель резко снижался, что объясняется активизацией процесса коагуляции, усилением гравитационного эффекта осаждения частиц с большей массой и, соответственно, ускорением процесса седиментации. Уже к 10 мин обработки он достигал 4,01 тыс. шт./100 см^3, что соответствует качеству масла после центрифугирования. Соответствие показателям высшего сорта масло достигало к 30–40 мин обработки.

Отрицательным фактом является то, что при производстве масла без центрифугирования (что в принципе недопустимо по причине его низкого качества) происходит интенсивное загрязнение поверхности фильтрационной перегородки крупными твёрдыми частицами. По этой причине ухудшается проницаемость сорбента. Все это ведет к уменьшению производительности, снижению качества очистки нерафинированного масла и увеличению времени процесса.

4.5.2 Результаты исследования проницаемости фильтрующей перегородки в зависимости от ее загрязненности

Производительность картриджа характеризуется количеством масла гарантированного качества, проникающего сквозь адсорбент в установленный период времени обработки. Результаты исследования производительности картриджа позволили получить сравнительную картину осаждения и адгезии в фильтрующую перегородку нежировых примесей.

Необработанные сырые и нерафинированные подсолнечные масла содержат более 2 % общих примесей, включающих в себя мезгу, жмых, шрот, мыла, воска, следовые количества металлов, 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. За счёт гидромеханических и гравитационных сил в масле при его обработке в виброакустической установке наблюдаются коагуляция частиц и их осаждение на

фильтрационную поверхность. Характер закупоривания пор и устьиц сорбента, удаления и выноса отложений потоками полидисперсной системы представлен на рисунке 4.52.

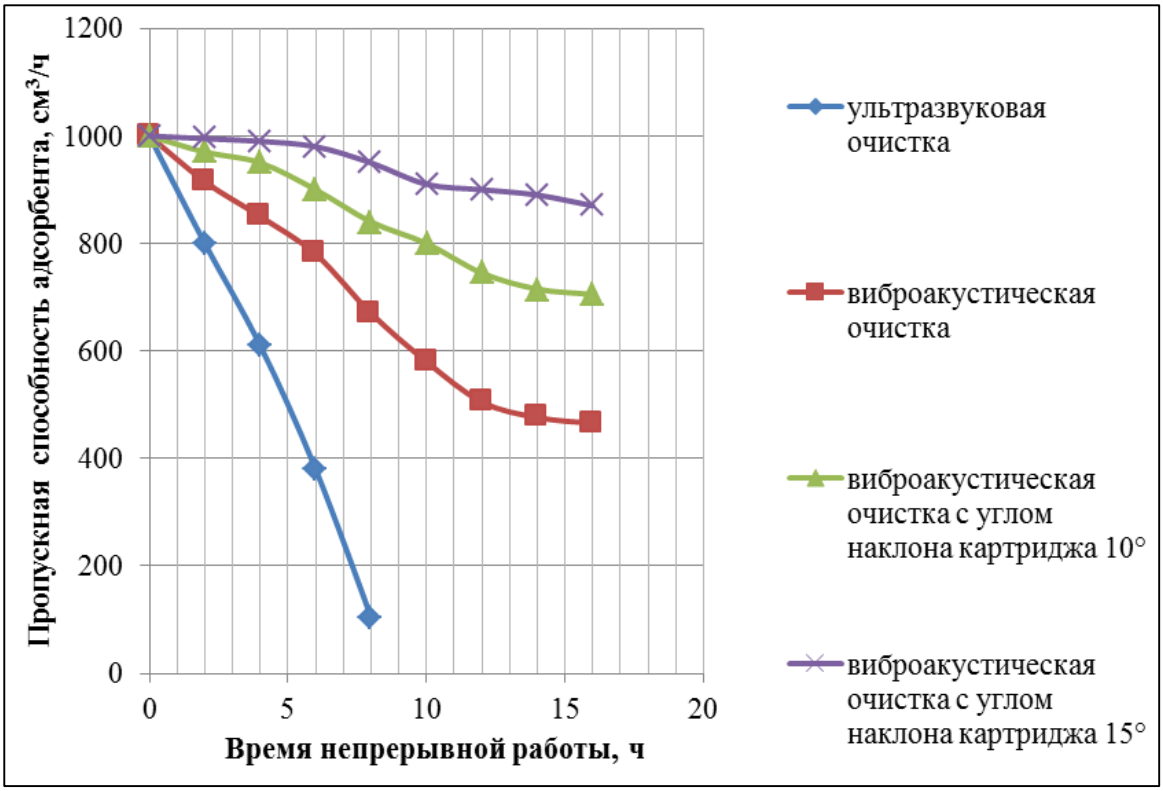


Рисунок 4.52 – Пропускная способность адсорбента
в зависимости от времени непрерывной очистки

Проницаемость фильтра при адсорбции только в акустическом потоке с горизонтально расположенным картриджем замедляется уже в первый двухчасовой цикл исследования на 18 %, к 8 ч работы установки она снижается с 1000 до 111 см^3, т. е. на 88,9 %.

Исследованиями совмещенного акустического и гидромеханического процессов установлена необходимость создания направленных продольных акустических микропотоков и поперечных вибрационных пульсирующих колебаний, снижающих седиментационную устойчивость осажденных частиц и приподнимающих их над фильтрационной поверхностью с целью последующего выноса в накопитель загрязнений. Наряду с этим определена повышенная эффективность выноса твёрдых частиц загрязнений по наклонно установленной фильтрационной поверхности картриджа под углом 12°…15°.

После 16-часового цикла испытаний скорость фильтрации при угле наклона 10° уменьшалась на 29 %, а при 15° – на 13 %. Это свидетельствует об увеличении производительности установки на 56 %.

4.5.3 Результаты исследования параметров кислотного числа и антиоксиданта токоферола

Результаты анализа изменения кислотности и концентрации антиоксидантов в сырых и нерафинированных подсолнечных маслах сразу после их производства, хранения и регенерации представлены на рисунке 4.53.

Интенсивность окисления к 3-му месяцу хранения достигает 52,6 %, а к 4-месячному 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 и концентрация антиоксидантов, призванных препятствовать окислительному процессу.

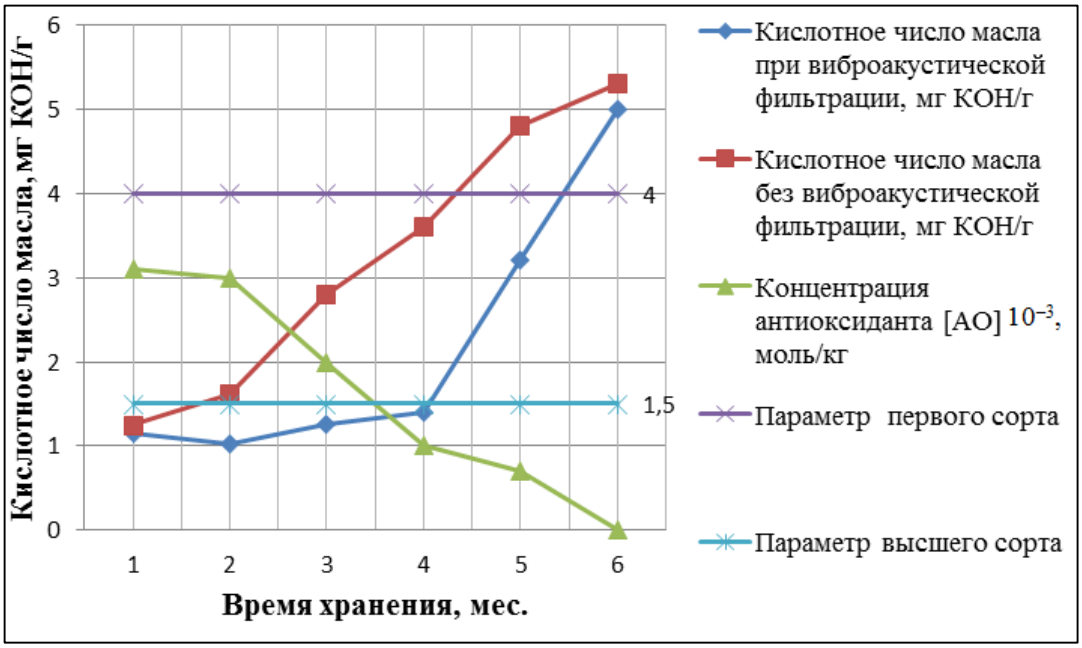


Рисунок 4.53 – Изменение кислотного числа и концентрации антиоксидантов в зависимости от времени хранения

Установлено, что если на момент производства масла окислительная стойкость свободных жирных кислот была на достаточном для высшего сорта уровне, составляющем 3,1 $[АО]\cdot10^{-3}$ моль/кг, а интенсивность ее снижения в период инициирования свободной радикальной реакции после 2 мес. хранения

не превышала 6 %, то уже к 3-му месяцу концентрация антиоксидантов снизилась до 2,0 [АО]·10^{-3} моль/кг. Это соответствует 32%-му уменьшению концентрации антиоксидантов и свидетельствует об активизации процесса окисления и порче масла в условиях разветвления цепной свободной радикальной реакции.

В дальнейшем, по мере увеличения срока хранения, концентрация антиоксидантов снижается: к 4 мес. – на 62 %, к 5 мес. – на 96 %, а к 6 мес. она доходит до нулевого состояния. Представленные данные свидетельствуют о том, что с повышением срока хранения сырые и нерафинированные подсолнечные масла подвергаются интенсивному окислению и после 4-месячного хранения они выходят за пределы 1-го сорта и в соответствии с требованиями, установленными ГОСТом, могут быть использованы только в технических целях. Исходя из этого подтверждено, что кислотное число характеризует процесс расщепления молекулы триглицерида с образованием свободных жирных кислот, ухудшающих вкус, запах, цвет, прозрачность и антиоксидантные свойства масла. При повышении кислотности и появлении масляной, капроновой и каприновой кислот появляются запах разложения и мыльный привкус продукта. Таким образом, увеличение кислотности и содержания свободных жирных кислот вызывает порчу масла, при этом чем дольше оно хранится, тем интенсивнее процесс порчи. При очистке сырых и нерафинированных подсолнечных масел в ультразвуковой установке возможно снижение кислотного числа с максимально достигнутого при хранении уровня 5,4 мг КОН/г до показателей, нормируемых ГОСТ [202].

4.5.4 Результаты исследования цветного и перекисного чисел

При световых воздействиях образуются гидроокиси и гидроперекиси, которые, являясь высокоактивными и неустойчивыми соединениями, при распаде превращаются в свободные радикалы в процессах инициирования, разветвления и обрыва цепей свободной радикальной реакции (рисунок 4.54).

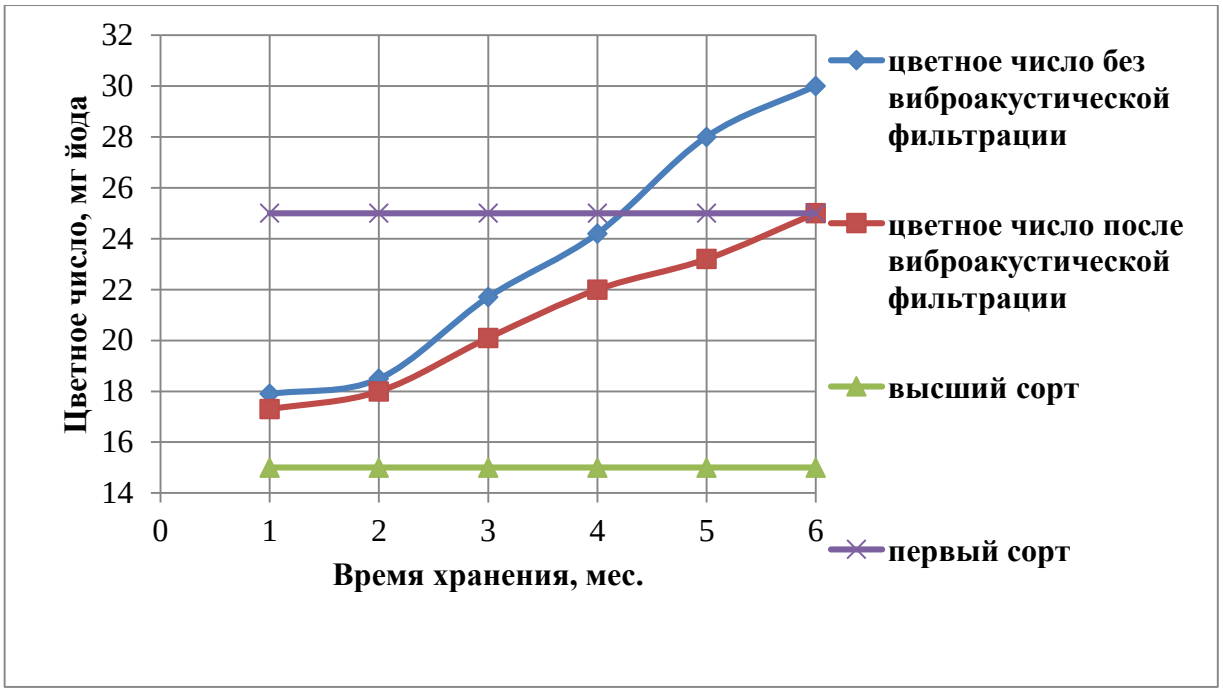


Рисунок 4.54 – Изменение цветного числа

Таким образом, показатель цветного числа характеризует качество переработки семян. Оно связано с эффективностью фильтрации и активностью окисления как в процессе производства, так и при хранении, а также с наличием в перерабатываемом продукте каротиноидов и хлорофилла. Последний нежелателен в масле, так как является сенсибилизатором окисления.

Уже на начальной стадии показатель цветного числа у нерафинированного масла низок, так как при производстве не представляется возможным освободиться от каротиноидов и хлорофилла, как это происходит при рафинации. Это биологически естественно, и масло по цветному числу соответствует уровню первого сорта. Однако по причине активизации окислительного процесса за счет свободной радикальной реакции показатель цветности ухудшается, и цвет масла от светло-желтого переходит в тёмно-желтое. Так, уже к третьему месяцу хранения этот показатель увеличивается от 20 до 22 ед. мг йода, к четвертому месяцу – до 24 ед. мг йода, а после пятого месяца продукт соответствует 2-му сорту и для употребления в пищу становится не пригодным. В процентном соотношении после 3 мес. хранения параметры цветности ухудшаются на 23 %, а после 4 мес. – на 30 %.

Виброакустическая обработка позволяет резко снизить активизацию ухудшения цветности, за весь шестимесячный период хранения она находилась в интервале продукта первого сорта (17–25 ед. мг йода). За этот же период у необработанного масла цветное число достигло 30 ед. мг йода.

Данное обстоятельство свидетельствует о снижении под действием виброакустической фильтрации содержания каротиноидов и хлорофилла, что положительно сказывается на качестве нерафинированного масла.

Перекисное число, характеризующее процесс образования гидроперекисей, активирующих окисление масла, описывается графиком, представленным на рисунке 4.55.

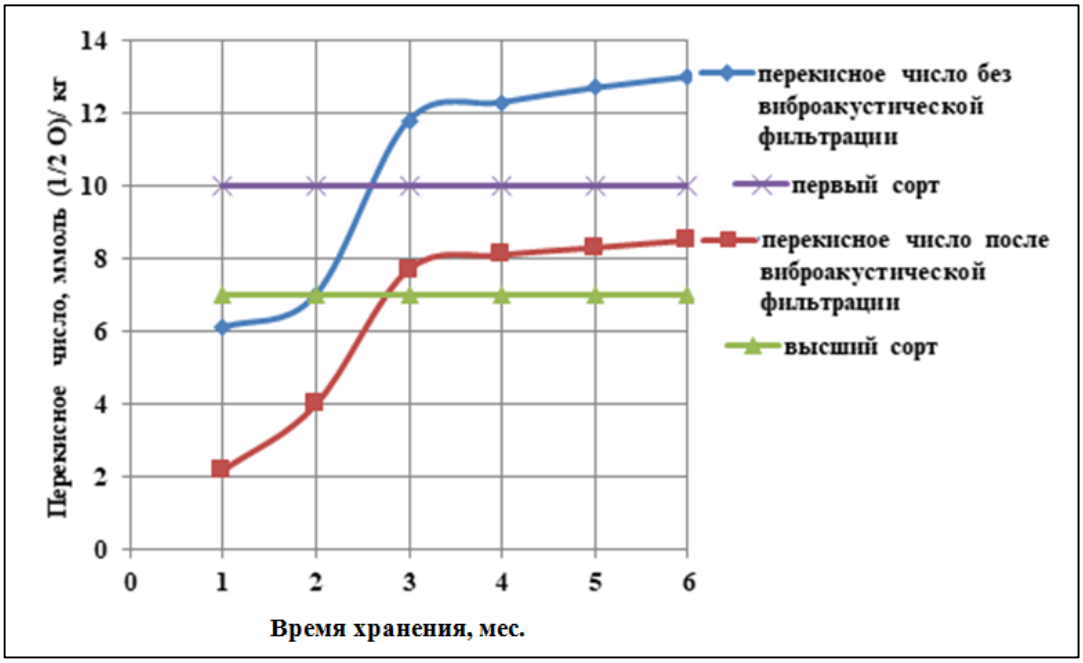


Рисунок 4.55 – Изменение перекисного числа в зависимости от времени хранения

Содержание гидроперекисей в нерафинированном масле достаточно высоко, уже после первого месяца хранения оно превышает 6 ммоль/кг. Характерным для этого масла является то, что даже при таком показателе перекисного числа резко активизируется окислительная реакция, и вследствие этого уже после двух месяцев хранения оно достигает 6,5 ммоль/кг. Далее линейная зависимость повышения перекисного числа в функции времени значительна, после 3 мес. хранения оно увеличивается на 50 %, и масло выходит из рамок первого сорта с резко изменяющимися органолептическими показателями

вкуса, запаха и цвета. В свою очередь, в масле, прошедшем адсорбционную очистку с использованием виброакустических потоков, за счет интенсификации прохода в слое адсорбента снижается кислотная базовая составляющая. Это положительно влияет и вынос вторичных продуктов окисления, также резко отрицательно воздействующих на перекисное число. Уменьшение данного показателя после первого месяца хранения нерафинированного масла до 2,1 ммоль/кг (на 65 %) и в последующем сохранение достаточно стабильных показателей со сниженным на 40 % перекисным числом позволяют значительно (на 50 %) повысить сроки хранения продукта.

Если при регенерации масла все показатели кислотного, перекисного, анизидинового и цветного чисел можно уменьшить (см. рисунки 4.53–4.55) и использование масла как продукта питания возобновить, то токоферол – основной антиоксидант – не возобновляем. При окислении масла уже после 6 мес. хранения этот показатель достигает нулевого значения. Отсюда следует, что сырые и нерафинированные подсолнечные масла следует подвергать регенерации после 3 мес. хранения.

4.5.5 Анализ экспериментальных данных технологического процесса очистки масла

Статистический анализ полученных результатов проведен с использованием программы Statistica 10.0. На основе экспериментальных исследований разработана математическая модель технологического процесса обработки масла в ультразвуковой установке при установленной частоте ультразвука 18 кГц.

Установив нормируемые показатели кислотного числа для нерафинированных растительных масел высшего и первого сортов 1,5 и 4,0 мг КОН/г соответственно, определены рациональные параметры очистки масла (рисунок 4.56).

Построена трехмерная поверхность отклика по выбранным критериям желательности, времени хранения и продолжительности очистки масла

(рисунок 4.57).

Для получения поверхности отклика, представленной на рисунке 4.58, были приняты интервалы параметров кислотного числа 0–0,5 мг КОН/г; 0,5–1,5; 1,0–4,0 мг КОН/г. За 1 принято значение, выше которого растительное масло выходит за пределы первого сорта.

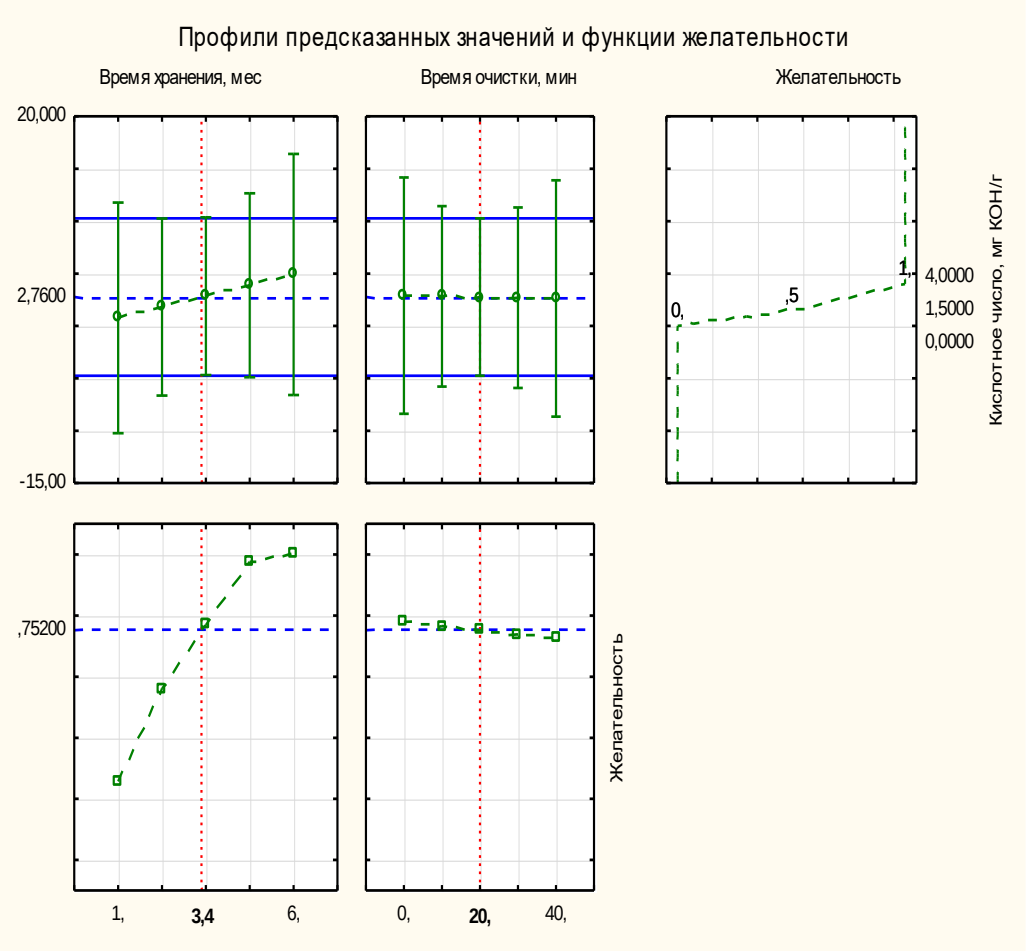


Рисунок 4.56 – Профили значений и функции желательности показателей кислотного числа в зависимости от времени хранения и продолжительности фильтрования

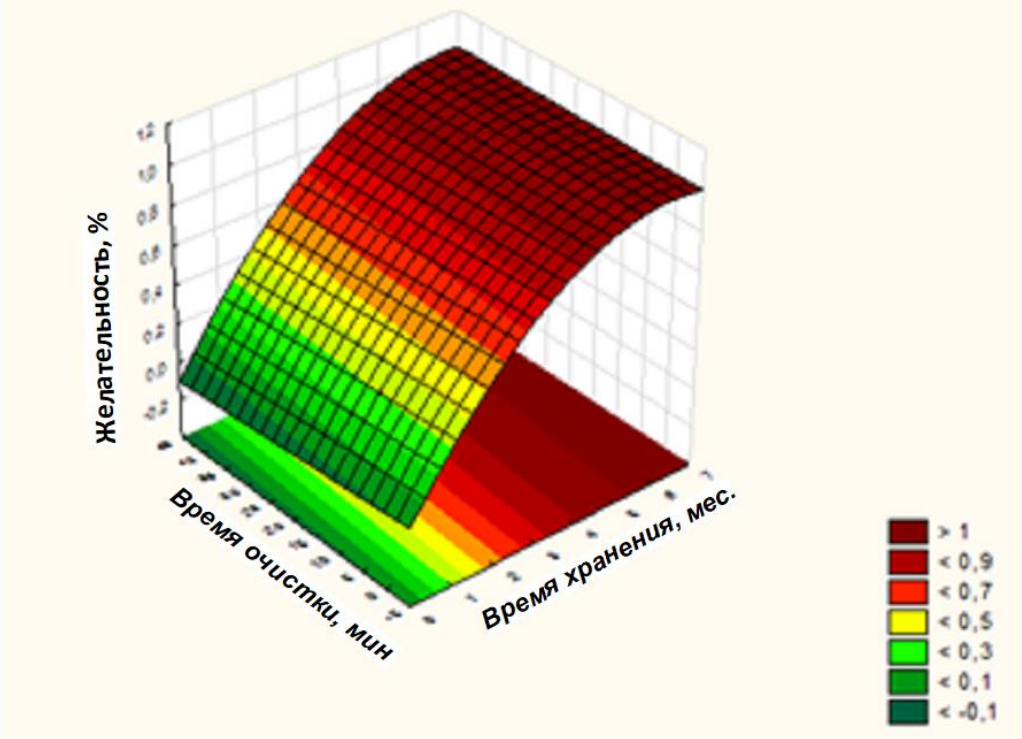


Рисунок 4.57 – Поверхность отклика и контур желательности

Профили значений и функции желательности показателей кислотного числа, представленные на рисунке 4.58, устанавливают оптимальные значения времени очистки и продолжительности хранения в зависимости от принятых критериев желательности (0 мг КОН/г; 1,5 и 4,0 мг КОН/г).

Установлено, что фильтрация в ультразвуковой установке должна длиться не менее 20 мин. При 3–4 мес. хранения кислотное число соответствует ГОСТ [164] и выходит за пределы 1-го сорта к 5–6 мес. хранения.

На основании экспериментальных данных построена поверхность отклика для ультразвуковой обработки масла с частотой ультразвука 18 кГц (рисунок 4.58).

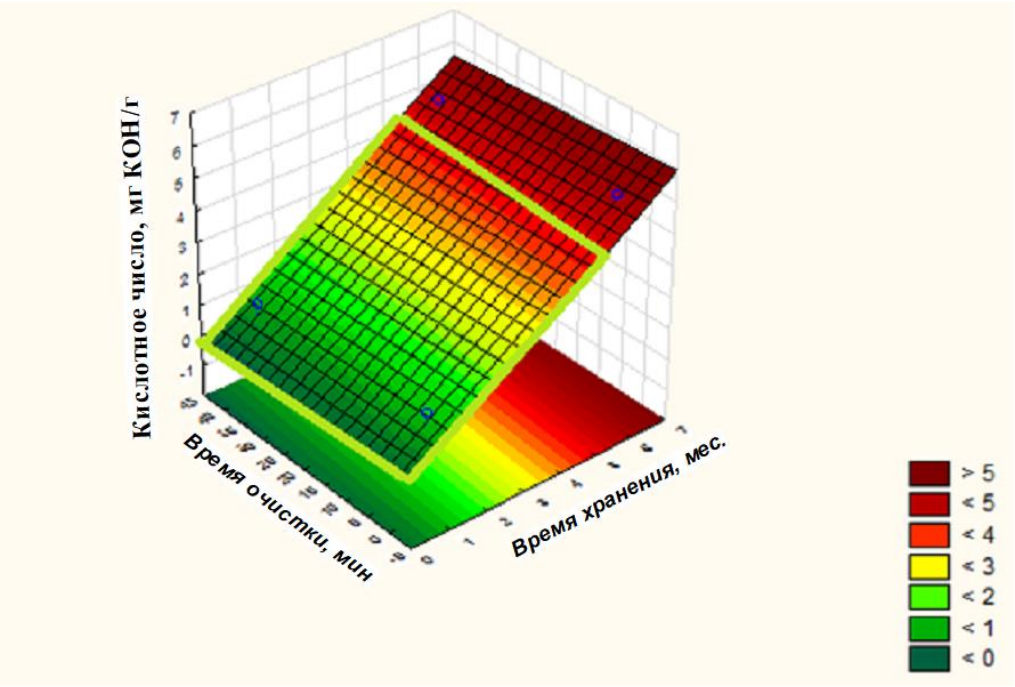


Рисунок 4.58 – Поверхность отклика для ультразвуковой обработки масла (частота ультразвука 18 кГц)

Анализ трехмерной поверхности отклика (см. рисунок 4.58) показывает, что с увеличением времени обработки уменьшается кислотность масла при хранении, однако после 6 мес. хранения нерафинированного масла ее значение выходит за пределы ГОСТ [164].

Исходя из вышеизложенного установлены рациональные технологические параметры для фильтрования масла (таблица 4.14).

Таблица 4.14 – **Режимные параметры фильтрования масла**

Параметр	Единица измерения	Значение
Продолжительность обработки	мин	20–30
Частота ультразвуковых колебаний	кГц	18
Интенсивность ультразвукового поля	Вт/см^2	не более 1

По результатам факторного эксперимента была получена регрессионная математическая модель, адекватно отражающая зависимость кислотного числа от времени очистки и времени хранения:

$$Y = 1,85 - 0,788X_1 - 0,01X_2 + 0,228X_1^2, \quad (4.4)$$

где Y – кислотное число, мг КОН/г;

X_1 – время хранения, мес;

X_2 – время очистки, мин.

При построении математической модели потеря данных не произошла, N = 15. Величина достоверности апроксимации R^2 = 0,999 свидетельствует об адекватности и эффективности модели процесса фильтрования масла по выбранной технологии.

4.5.6 Обоснование режимов очистки растительного нерафинированного масла

Полученные данные подтверждают целесообразность виброакустической фильтрации сырых и нерафинированных подсолнечных масел как последней операции при производстве и хранении.

Экспериментальные и теоретические исследования позволили усовершенствовать конструкцию фильтрационной установки, которую применяли для опытов [281, 282, 285].

Общий вид и схема усовершенствованной ультразвуковой фильтрационной установки представлены на рисунках 4.59–4.61.

Сорбентом для картриджа служат доступные минералы – доломит и опока фракцией 5–10 мм; доломит промыт и просушен при температуре 500 °С, опока – при 200 °С.

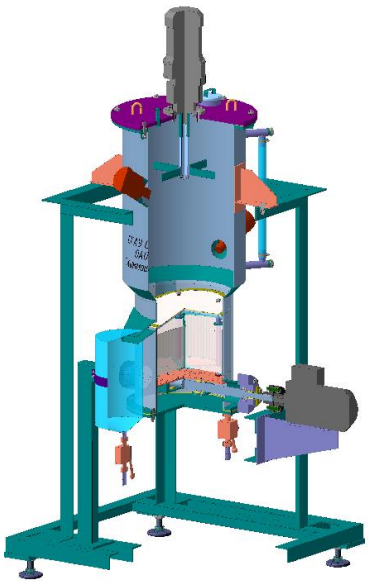


Рисунок 4.59 – Ультразвуковая фильтрационная установка для очистки масла

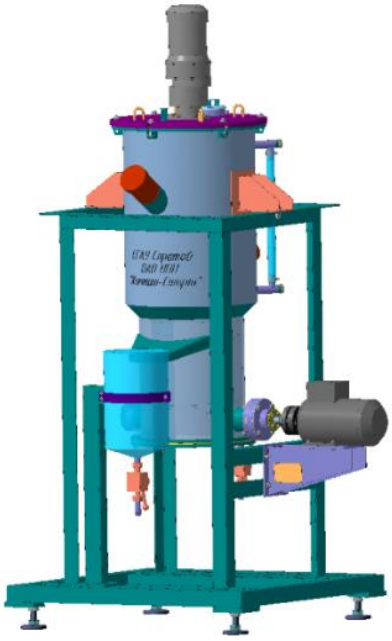


Рисунок 4.60 – Общий вид ультразвуковой фильтрационной установки для очистки масла

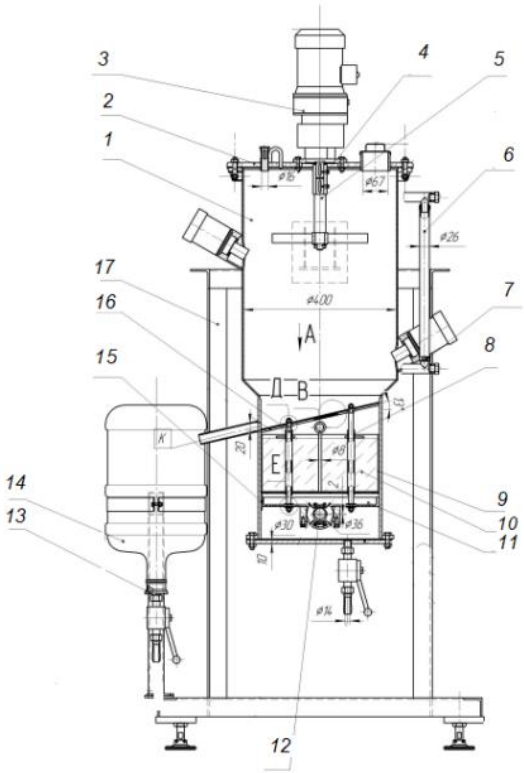


Рисунок 4.61 – Схема ультразвуковой фильтрационной установки для очистки масла: 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – мотор-редуктор; 4 – винтовое крепление мешалки; 5 – мешалка; 6 – ротаметр; 7 – ультразвуковой излучатель; 8 – нажимная букса; 9 – картридж для сорбента; 10 – сорбент; 11 – днище; 12 – электромеханический вибратор; 13 – кран; 14 – отстойник; 15 – сливной цилиндр; 16 – фильтрационная мембрана; 17 – опора

В таблице 4.15 даны конструктивные параметры предлагаемой ультразвуковой фильтрационной установки для очистки растительного масла.

Таблица 4.15 – **Конструктивные параметры фильтрационной установки для очистки масла**

Параметр	Расчётное значение
Частота вибрационных колебаний ω $с^{-1}$	15
Амплитуда колебаний f, мм	4
Коэффициент поглощения акустических волн средой α	4,24
Скорость вибрационных колебаний V, мм/с	15
Ускорение вибрационных колебаний a, мм/$с^2$	225
Сопротивление среды вибрационным колебаниям ε	16
Диаметр картриджа $d_к$, м	0,21
Высота картриджа $h_к$, м	0,44
Перепад давления в слое картриджа $\Delta P_с$, Па	745
Сила сопротивления среды $F_с$, Н	16,8
Площадь поперечного слоя картриджа S, $м^2$	0,023
Вынужденная сила, развиваемая дисбалансом, F_a, Н	227
Статический момент массы дисбаланса, Н·м	0,38
Мощность привода вибровозбудителя N, Вт	30
Частота ультразвука, кГц	18
Производительность установки, л/ч	100

Ультразвуковая фильтрационная установка работает следующим образом. Нерафинированое растительное масло объемом 100 л загружают в емкость, где установлена лопастная мешалка, предназначенная для перемешивания масла и создающая условия для интенсификации проникновения акустических колебательных движений в виде пульсирующих микропотоков. На корпусе емкости взаимно перпендикулярно расположены две пьезоэлектрические колебательные системы, осуществляющие направленное акустическое колебательное воздействие на обрабатываемое масло, интенсифицируя его проникновение сквозь устьица и поры адсорбента и ускоряя сход осадка с фильтрационной мембраны в отстойник. Внизу емкости имеется наклонный фильтрующий элемент, состоящий из фильтрационной мембраны, картриджа с адсорбентом и электромеханического вибратора, который за счет кулачкового вала и системы штоков колебательными механническими движениями нарушает седиментационную устойчивость осадка загрязнений. Обрабатываемое нерафинированное масло, проникая через устьица адсорбента, очищается и попадает в поддон для чистого масла, а осадок за счет акустических микропотов и механических колебательных движений перемещается в

отстойник. Слив загрязнений и очищенного масла осуществляется через патрубки, на которых имеются краны.

Качественные показатели растительных масел (кислотное, перекисное, цветное числа) определяли по формуле (2.83). В таблице 4.16 приведены для сравнения экспериментальные параметры кислотного, перекисного и цветного чисел, рассчитанные параметры кислотного числа для линии тренда (колонка «опыт») и величина кислотного числа по предложенной формуле (колонка «теория»), последняя колонка в таблице показывает относительную погрешность в % сравнения. Для расчетов были приняты следующие коэффициенты: $K_{мо}$ = 1,25 мг КОН/г; K_1=0,029 мг КОН/(г·мес^3); K_2=0,0085 мг КОН/(г·мес). Зеленым цветом указаны параметры, соответствующие высшему сорту, а красным – для продукции, которую возможно использовать только в технических целях.

Как видно из рисунка 4.62, к третьему месяцу хранения интенсивность окисления достигает 52,6 %, а к четвертому месяцу показатель приближается к границе, за которой масло перестает соответствовать требованиям первого сорта, что делает его непригодным для пищевого использования. Полученные данные показывают, что сырые и нерафинированные подсолнечные масла подвергаются активному окислению по мере увеличения срока хранения. Уже через четыре месяца хранения они выходят за пределы норм первого сорта и, согласно ГОСТу, могут применяться только в технических целях.

Это подтверждает, что кислотное число отражает процесс расщепления молекул триглицеридов с образованием свободных жирных кислот, которые негативно влияют на вкус, запах, цвет, прозрачность и антиоксидантные свойства масла. При повышении кислотности и появлении таких кислот, как масляная, капроновая и каприновая, продукт приобретает запах разложения и мыльный привкус. Таким образом, рост кислотности и увеличение содержания свободных жирных кислот приводят к порче масла, причем чем дольше оно хранится, тем быстрее этот процесс прогрессирует. Однако при очистке сырых

и нерафинированных подсолнечных масел с помощью ультразвуковой установки удается снизить кислотное число с максимального значения 5,4 мг КОН/г, достигнутого в процессе хранения, до нормируемых ГОСТом показателей. Для нерафинированных растительных масел высшего и первого сортов установлены нормы кислотного числа в 1,5 и 4,0 мг КОН/г соответственно.

На начальном этапе показатель цветного числа нерафинированного масла остается низким, поскольку в процессе производства невозможно полностью удалить каротиноиды и хлорофилл, что достигается при рафинации. Это естественный биологический процесс, и по цветному числу такое масло соответствует первому сорту. Однако из-за активизации окислительных процессов, вызванных свободной радикальной реакцией, цветность масла ухудшается: цвет изменяется от светло-желтого до темно-желтого. Уже к третьему месяцу хранения показатель цветного числа увеличивается с 20 до 22 ед. мг йода, к четвертому месяцу — до 24 ед. мг йода, а после пятого месяца продукт переходит во второй сорт и становится непригодным для пищевого использования. В процентном выражении ухудшение цветности составляет 23 % через три месяца хранения и 30 % — через четыре месяца. Применение виброакустической обработки позволяет значительно замедлить ухудшение цветности. В течение шести месяцев хранения цветное число обработанного масла остается в пределах норм первого сорта (17–25 ед. мг йода). В то же время у необработанного масла за этот же период показатель достигает 30 ед. мг йода. Нормативные значения цветного числа для нерафинированных растительных масел высшего и первого сортов составляют 15 и 25 ед. мг йода соответственно.

Уровень гидроперекисей в нерафинированном масле изначально высок и уже через месяц хранения превышает 6 ммоль/кг. При таком уровне перекисного числа окислительные процессы значительно ускоряются, и через два месяца хранения показатель достигает 6,5 ммоль/кг. В дальнейшем наблюдается выраженная линейная зависимость роста перекисного числа от времени: через три месяца хранения оно увеличивается на 50 %, что приводит к выходу масла

за пределы стандартов первого сорта. При этом значительно ухудшаются органолептические свойства продукта — вкус, запах и цвет. Однако в масле, обработанном с использованием виброакустической адсорбционной очистки, наблюдается снижение базовой кислотности благодаря интенсификации прохождения масла через слой адсорбента. Важную роль играет и удаление вторичных продуктов окисления, которые негативно влияют на перекисное число. В результате такой обработки уже через месяц хранения перекисное число снижается до 2,1 ммоль/кг (на 65 %), а в дальнейшем сохраняется на стабильно низком уровне, что на 40 % ниже исходных показателей. Это позволяет увеличить срок хранения продукта на 50 %. Если при регенерации масла все показатели кислотного, перекисного, анизидинового и цветного чисел можно уменьшить и использование масла как продукта питания возобновить, то токоферол – основной антиоксидант – не возобновляем. При окислении масла уже после 6 мес. хранения этот показатель достигает нулевого значения. Отсюда следует, что сырые и нерафинированные подсолнечные масла следует подвергать регенерации после 3 мес. хранения.

Таблица 4.16 – **Теоретические и экспериментальные параметры обработки масла**

Время хранения, месяцев	Время очистки, мин	Кислотное число	Перекисное число	Цветное число	Опыт	Теория	Погрешность, %
1	0	1,25	18	6	1,35	1,28	5,47
2	0	1,7	18,5	7	1,426	1,48	3,65
3	0	2,8	21,8	11,8	2,078	2,03	2,36
4	0	3,6	24,1	12,2	3,306	3,11	6,3
5	0	4,9	28	12,8	5,11	4,88	4,71
6	0	5,2	30	13	7,49	7,51	0,27
1	10	1,25	6,04	3,18	1,25	1,16	7,76
2	10	1,326	6,56	4,31	1,326	1,36	2,5
3	10	1,978	7,09	5,43	1,978	1,92	3,02
4	10	3,206	7,61	6,55	3,206	2,99	7,22
5	10	5,01	8,14	7,68	5,01	4,76	5,25
6	10	7,39	8,66	8,8	7,39	7,4	0,14
1	20	1,15	6,04	3,18	1,15	1,05	9,52
2	20	1,226	6,56	4,31	1,226	1,26	2,7
3	20	1,878	7,09	5,43	1,878	1,81	3,76
4	20	3,106	7,61	6,55	3,106	2,88	7,85
5	20	4,91	8,14	7,68	4,91	4,65	5,59

6	20	7,29	8,66	8,8	7,29	7,29	0
1	30	1,05	6,04	3,18	1,05	0,96	9,38
2	30	1,126	6,56	4,31	1,126	1,17	3,76
3	30	1,778	7,09	5,43	1,778	1,72	3,37
4	30	3,006	7,61	6,55	3,006	2,79	7,74
5	30	4,81	8,14	7,68	4,81	4,56	5,48
6	30	7,19	8,66	8,8	7,19	7,2	0,14
1	40	0,95	6,04	3,18	0,95	0,89	6,74
2	40	1,026	6,56	4,31	1,026	1,1	6,73
3	40	1,678	7,09	5,43	1,678	1,65	1,7
4	40	2,906	7,61	6,55	2,906	2,72	6,84
5	40	4,71	8,14	7,68	4,71	4,49	4,9
6	40	7,09	8,66	8,8	7,09	7,13	0,56
1	50	0,85	6,04	3,18	0,85	0,84	1,19
2	50	0,926	6,56	4,31	0,926	1,04	1,49
3	50	1,578	7,09	5,43	1,578	1,59	0,75
4	50	2,806	7,61	6,55	2,806	2,66	5,49
5	50	4,61	8,14	7,68	4,61	4,43	4,06
6	50	6,99	8,66	8,8	6,99	7,07	1,13
1	60	0,75	6,04	3,18	0,75	0,79	5,06
2	60	0,826	6,56	4,31	0,826	0,99	7,19
3	60	1,478	7,09	5,43	1,478	1,54	4,03
4	60	2,706	7,61	6,55	2,706	2,61	3,68
5	60	4,51	8,14	7,68	4,51	4,38	2,97
6	60	6,89	8,66	8,8	6,89	7,02	1,85

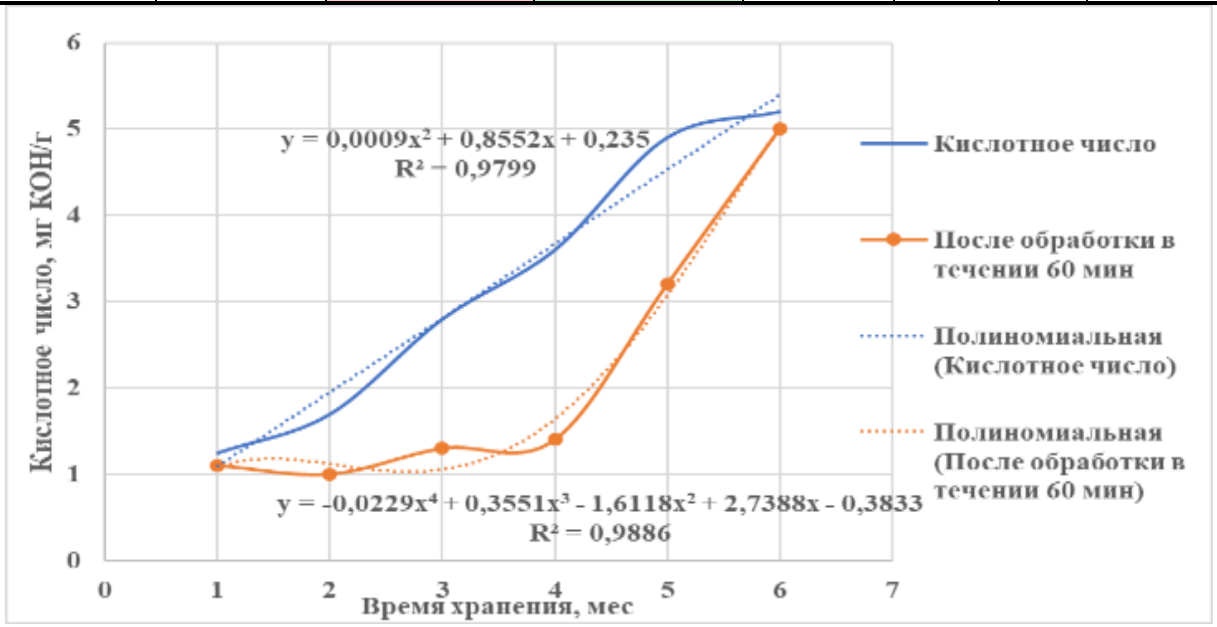


Рисунок 4.62 – Диаграмма параметров кислотного числа без обработки и после обработки масла на ультразвуковой вибрационной установке

Полученные данные подтверждают целесообразность виброакустической фильтрации сырых и нерафинированных подсолнечных масел как последней

операции при производстве и хранении. Ультразвуковая обработка в установленных режимах (частота ультразвука 18 кГц, его интенсивность 1 Вт/см^2 и продолжительность обработки 30 мин) позволяет уменьшать до нормируемых контролируемые параметры качества (кислотное, перекисное и цветное числа).

Математическим моделированием установлена высокая сходимость теоретических и экспериментальных данных, принятых за основу конструктивных решений при проектировании установки периодического действия для очистки нерафинированных растительных масел.

Выводы по главе

1. При технологическом воздействии в установленных режимных параметрах наблюдается значительное повышение интенсивности и результативности обработки продукции растениеводства с различными целевыми функциями, направленными на очистку оболочки зерна от прочных минеральных отложений и следов зараженности микроорганизмами; на увлажнение зерна до помольных кондиций; на устранение биологически активных антипитательных веществ зернобобовых; на очистку нерафинированных растительных масел от кислотных составляющих ультразвуковой обработкой.

2. При подготовке зерна к помолу установлены повышенная остаточная загрязненность оболочки и зараженность зерна пшеницы микроорганизмами, сконцентрированными в бороздке и бородке, – в пределах 5–10 %. Это приводит к образованию зольности 1,5–2,2 % (по нормируемым критериям этот показатель не должен превышать 2,0 %). Применяемая в настоящее время сухая обработка зерна снижает зольность всего на 0,01–0,02 %. После ультразвуковой обработки частотой 18,0–18,5 кГц и интенсивностью 1 Вт/см^2 в течение 40 с загрязненность оболочки зерна устраняется, а зольность стабилизируется в пределах 1,19–1,2 % (ее наличие обусловлено только внутренним биологическим строением зерна).

3. Разброс показателей микротвёрдости свидетельствует о крайне не стабильном процессе увлажнения зерна. Повышенная и пониженная пластичность зерна ухудшает процесс размола и, соответственно, качество муки. При обработке ультразвуком по установленным режимам обработки достигается 100%-я готовность зерна к помолу по параметру влажности.

4. После ультразвуковой обработки содержание клейковины стабилизируется и составляет 27,5–27,7 %. Количество белка достигает достаточно высоких показателей 12,3–13,4 %, что объясняется отсутствием денатурации.

5. После профилактической ультразвуковой обработки зерна в среде анолита наблюдается подавление развития микрофлоры на 98 %.

6. Определена кинетика процессов подавления активности ингибитора трипсина при различных условиях обработки зерна сои. Низкотемпературная ультразвуковая обработка при частоте ультразвука 20 кГц, его интенсивности 1 Вт/см^2 и времени обработки 30 мин способствует снижению активности уреазы на 98 %. При этом установлено, что в связи с отсутствием нагрева и денатурации аминокислотный состав не претерпевает изменений.

7. При обработке нерафинированного растительного масла установлены наличие значительного количества остаточных кислотных составляющих и развитие остаточной радикальной реакции, ведущей к порче продукта уже после 3 мес. хранения. Это связано с повышенным состоянием кислотного, перекисного и цветного чисел.

8. Ультразвуковая обработка в установленных режимах (частота ультразвука 18 кГц, его интенсивность 1 Вт/см^2 и продолжительность обработки 30 мин) позволяет уменьшать до нормируемых контролируемые параметры качества (кислотное, перекисное и цветное числа). Все показатели соответствуют уровню продукта высокого качества.

9. Установлена высокая степень качества очистки от коллоидно-дисперсной взвеси твердых дисперсных частиц.

10. Определено, что за счет одновременного воздействия ультразвуковых и механических колебательных движений снижается седиментационная

устойчивость загрязнений на фильтрационной поверхности. Это способствует их перемещению в емкость-накопитель и позволяет повысить производительность установки.

11. Математическим моделированием установлена высокая сходимость (98 %) теоретических и экспериментальных данных, принятых за основу конструктивных решений при проектировании универсальной шнековой установки непрерывного действия для обработки зерна, зернобобовых культур и установки периодического действия для очистки нерафинированных растительных масел.

12. Разработаны конструкции установок для обработки зерновых и зернобобовых культур и очистки сырого и нерафинированного растительных масел.

5 ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА, ЗЕРНОБОБОВЫХ КУЛЬТУР И НЕРАФИНИРОВАННЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

5.1 Результаты производственных испытаний ультразвуковой установки для непрерывной обработки зерна сои

Исходя из принятой конструктивной схемы (приложение *И*), установка шнекового типа включает в себя:

- зону загрузки сухой измельченного зерна сои из бункера;
- зону образования водно-соевой 50%-й суспензии, где обеспечиваются регулировка подачи зерна сои и дозированная подпитка воды;
- зону обработки суспензии системой пьезокерамических колебательных возбудителей (время обработки устанавливают изменением подачи зерна сои и регулировкой частоты вращения шнека);
- зону предварительного обезвоживания;
- зону отжима, обеспечивающую 82%-е удаление жидкости;
- зону выгрузки обработанной продукции.

Конструктивные параметры винта шнека представлены таблице 5.1.

Таблица 5.1 – **Конструктивные параметры винта шнека**

Параметр	Значение
Диаметр, м	
вала винта	0,089
винта в зоне загрузки	0,203
винта в рабочей зоне	0,203
винта в зоне предварительного отжима	0,203
винта в зоне выгрузки	0,156
Средний диаметр винта в зоне отжима, м	0,18
Начальный	0,203
Конечный	0,156
Толщина витка винта, м	0,003

Окончание табл. 5.1

Параметр	Значение
Количество витков винта шнека	
в зоне загрузки	2
в рабочей зоне	5
в зоне предварительного отжима	6
в зоне отжима	3
в зоне выгрузки	1,5
Шаг винта, м	0,155
Диаметр ячейки металлической проволочной сетки, образующей зону отжима, мм	0,8
Толщина перфорированного листа, мм	3,0
Расчетное давление в зоне отжима, Мпа	0,2

Технологические и технические характеристики установки представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – **Технологические и технические характеристики установки для ультразвуковой обработки зерна сои**

Показатель	Значение
Действительная плотность частиц с учетом гранулометрического состава и насыпной плотности ρ_c, кг/м^3	1100
Плотность воды при рабочей температуре, кг/м^3	980
Плотность суспензии, кг/м^3	1036,5
Производительность установки, кг/с	0,236
Средний угол подъема винта, град.	23,3
Частота вращения шнека, мин$^{-1}$	16
Время обработки ультразвуком, с	49,3
Мощность мотор-редуктора, Вт	716
Длина установки, м	2,7
Частота ультразвука, кГц	18

Экспериментальные исследования и принятая впоследствии конструкция установки, оснащенной двумя пьезокерамическими колебательными возбудителями с определенными параметрами ультразвука, позволили обеспечить инактивацию ингибитора трипсина и уреазы до 97 % за 30 мин обработки. Большая продолжительность обработки обусловлена плохой проницаемостью ультразвуковых микропотоков сквозь обрабатываемую суспензию, образованием застойных зон, гравитационным оседанием твердых частиц зерна сои. Для обеспечения постоянной концентрации суспензии 50 % в обрабатываемом объеме была изменена конструкция установки. В

результате появилась возможность постоянного перемещения суспензии шнеком, улучшилась проницаемость обрабатываемого материала и устранены препятствия при проникновении пульсирующих микротечений.

В конструкции предлагаемой установки использована пьезоэлектрическая колебательная система УЗТА-1/18-0 увеличенной площади (рисунок 5.1). Это позволяет рассредоточить обрабатываемый материал по длине рабочей зоны.

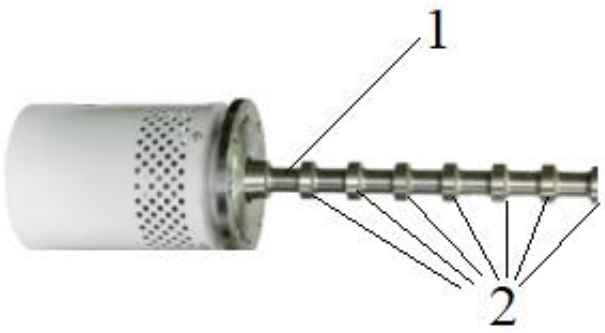


Рисунок 5.1 – Пьезоэлектрическая колебательная система увеличенной площади УЗТА-1/18-0: 1 – рабочий инструмент; 2 – излучающие поверхности

Пьезоэлектрическая колебательная система увеличенной площади УЗТА-1/18-0 обладает параметрами высокоинтенсивной кавитации, значительно ускоряет процессы экстрагирования, увлажнения, перемешивания, коагуляции и др.

Рабочий инструмент 1 (см. рисунок 5.1) выполнен из титанового стержня в виде последовательно сформированных полуволновых модулей и имеет несколько излучающих поверхностей 2.

Техническая характеристика пьезоэлектрической колебательной системы представлена в таблице 5.3.

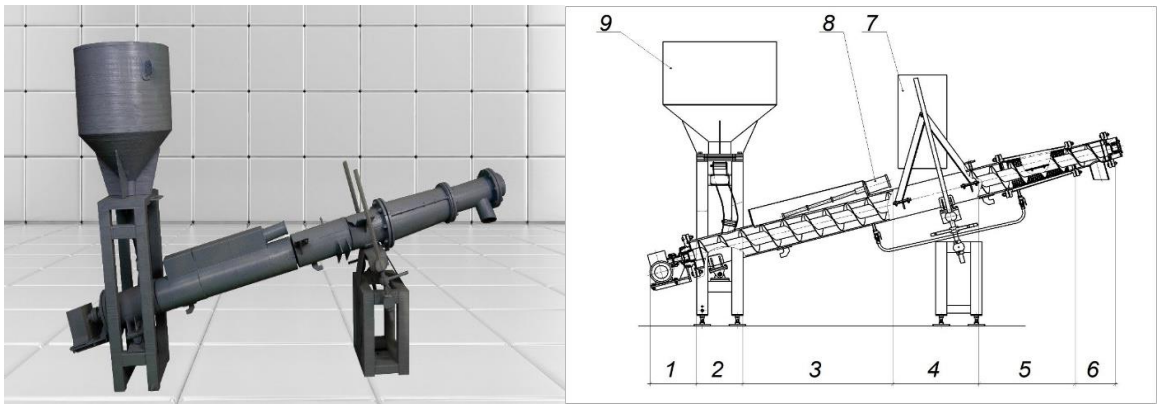
Преимущество предлагаемой установки состоит в том, что в ней небольшой слой обрабатываемой суспензии перемешивается витками шнека и непрерывно продвигается по длине рабочей зоны, где подвергается ультразвуковому воздействию с помощью 7 пьезокерамических элементов. В результате сокращается время обработки, что было подтверждено производственными испытаниями.

Таблица 5.3 – **Техническая характеристика пьезоэлектрической колебательной системы**

Показатель	Значение
Мощность, В·А, не более	2000
Частота ультразвуковых колебаний, кГц	18,0 ±1,35
Напряжение питания от сети переменного тока, В	220 ±22
Интенсивность излучения, Вт/см^2, не менее	10
Время непрерывной работы, ч, не менее	8
Габаритные размеры, мм	
электронного генератора	280×450×105
колебательной системы (диаметр × длина)	100×800
Диаметр рабочего инструмента, мм (max / min)	38/24
Длина излучателя, мм, не менее	350

Рисунок 5.2 – Производственная сборка установки непрерывного действия шнекового типа для ультразвуковой обработки сыпучей продукции растениеводства.

Таким образом, окончательный вариант установки (рисунок 5.3), представленный к производственным испытаниям, был усовершенствован (патент № 208531). Он отличается от конструкции лабораторной установки (патент № 130519).



а *б*

Рисунок 5.3 – Установка непрерывного действия шнекового типа.
для ультразвуковой обработки сыпучей 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.

Установки изготовлены на средства Гранта Фонда Сколково (№ 131306, 134452). Производственные испытания установки непрерывного действия шнекового типа для ультразвуковой обработки сыпучей продукции растениеводства проведены в ООО «Химмаш-Старт» (г. Пенза). На производственном участке, согласно условиям договора о совместной работе, был изготовлен опытно-промышленный образец. Испытаниям подвергали технологию и техническое средство для инактивации зерна сои, акт испытаний представлен в приложении *И*.

Проведена проверка шнековой ультразвуковой установки на соответствие параметрическим требованиям. Выявлено соответствие установленным требованиям опытно-промышленного образца.

Соответствие функциональным требованиям проверяли в двух рабочих режимах – на холостом ходу и под нагрузкой.

При проверке на холостом ходу частоту вращения вала шнека устанавливали 18 мин$^{-1}$ в течение непрерывной 8-часовой работы установки.

Под нагрузкой установку проверяли при полном рабочем режиме в следующей последовательности:

1. В бункер загружали 50 кг размолотого полножирного зерна сои.

2. Рабочую зону заполняли водой.

3. Во вращающийся шнековый механизм путем открытия шиберной заслонки подавали обрабатываемый материал.

4. Излишки воды до достижения пропорции 50:50 автоматически вытеснялись перепускным клапаном, установленным в корпусе шнека. Через этот же клапан осуществлялся отвод воды после предварительного отжима.

5. Основной отжим воды из суспензии обеспечивался за счет повышения давления в коническом шнековом пространстве до $2 \cdot 10^5$ Па. На выходе остаточная влажность обработанного зерна сои составляла 15 %, что требовало применения дополнительной сушки. Вполне допустим метод низкотемпературной аэрационной сушки до нормированной остаточной влажности 2–3 %.

Проверяли степень инактивации ингибитора трипсина и уреазы. Дисперсность суспензии 1,0–1,5 мм, установленная частота ультразвука 18 кГц, температура нагрева воды в суспензии до 40 °С.

Исследованиями установлено:

- следы минеральных загрязнений и зараженности отсутствуют;
- активность ингибитора трипсина после 3 мин обработки ультразвуком снижается с 50–60 до 3–5 мг/г, что подтверждает 6-кратное повышение эффективности инактивации;
- активность уреазы после ультразвуковой обработки снижается с 2,5 до 0,2 pH, что также свидетельствует о высокой эффективности процесса инактивации.

В таблице 5.4 представлены качественные показатели инактивации зерна сои.

Таблица 5.4 – **Качественные показатели инактивации зерна сои**

Показатель	Исходное состояние	После УЗ-воздействия	Эффективность, %
Активность ингибитора, мг/г	50	3	+94
Активность уреазы, ед. pH	2,5	0,2	+92
Содержание белка, %	38,86	38,03	–2,14

Согласно результатам производственных испытаний, опытно-промышленный образец установки непрерывного действия шнекового типа

для ультразвуковой обработки сыпучей продукции растениеводства полностью соответствует требованиям конструкторской документации и обеспечивает все этапы технологического воздействия.

5.2 Результаты производственных испытаний ультразвуковой установки для очистки нерафинированных растительных масел

На основании опытно-конструкторской документации (приложение К) производственным испытаниям подвергали ультразвуковую установку периодического действия для очистки нерафинированного растительного масла (приложение М).

Установка для очистки нерафинированных растительных масел периодического действия включает в себя:

- емкость объемом 0,094 $м^3$ с двумя пьезоэлектрическими колебательными системами;
- перемешивающее устройство;
- картридж с адсорбентом;
- механическую колебательную систему, обеспечивающую устранение седиментационной устойчивости осажденных загрязнений для их удаления;
- системы для слива очищенного нерафинированного масла и удаления загрязнений с фильтрационной поверхности.

Решение о соответствии конструкции требованиям, установленным техническим заданием, представлено в приложении *К*.

Конструктивные параметры установки для очистки нерафинированных растительных масел даны в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – **Конструктивные параметры установки для очистки нерафинированного растительного масла**

Параметр	Значение
Внутренний диаметр емкости, м	0,4
Частота вращения мешалки, $мин^{-1}$	20
Тип мешалки	лопастная
Диаметр мешалки, м	0,25
Коэффициент местного сопротивления	0,88
Высота заполнения емкости, м	0,63
Расчетная плотность растительного масла, $кг/м^3$	925

Техническая характеристика установки для очистки нерафинированного растительного масла представлена в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – **Техническая характеристика установки для очистки нерафинированного растительного масла**

Параметр	Значение
Объем емкости установки, $м^3$	0,094
Объем сборника загрязнений, л	5
Объем картриджа, л	6
Состав адсорбента, %	
Доломит	50
Опока	50
Амплитуда колебаний фильтрационной поверхности, мм	4
Частота вибрации фильтрационной поверхности, $с^{-1}$	15
Мощность электродвигателя мешалки, кВт	0,55
Частота вращения вала механической колебательной системы, $мин^{-1}$	920
Номинальный крутящий момент электродвигателя, Н·м	3,94
Частота вращения мешалки, $мин^{-1}$	20
Мотор-редуктор	ЗФ-6МЦ-17ES-65.61-322
Пьезоэлектрическая колебательная система	УЗТА-0,63/18-ОМ

Пьезоэлектрическая колебательная система УЗТА-0,63/18-ОМ (рисунок 5.3) обеспечивает высокую интенсификацию процессов в жидких и жидкодисперсных средах.

Рисунок 5.3 – Пьезоэлектрическая колебательная система УЗТА-0,63/18-ОМ

Техническая характеристика пьезоэлектрической колебательной системы представлена в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – **Техническая характеристика пьезоэлектрической колебательной системы**

Показатель	Значение
Мощность, В·А не более	630
Частота ультразвуковых колебаний, кГц	18,0 ±1,65
Напряжение питания от сети переменного тока, В	220 ±22
Интенсивность излучения, Вт/см^2, не менее	10
Время непрерывной работы, ч, не менее	8
Габаритные размеры, мм	
электронного генератора	300×280×110
колебательной системы (диаметр × длина)	80×150
Диаметр рабочего инструмента, мм (max / min)	30

С учетом данных теоретических и экспериментальных исследований окончательное конструктивное решение установки для ультразвуковой очистки нерафинированного растительного масла принято в виде, представленном на рисунке 5.4.

а *б* *в*

Рисунок 5.4 – Ультразвуковая фильтрационная установка для очистки масла:

а – общий вид промышленного образца; б – общий вид 3D; в – 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

Акт о рассмотрении и приятии к производству дан в приложении *3*.

Производственные испытания установки для ультразвуковой очистки нерафинированного растительного масла периодического действия проведены в ООО «Химмаш-Старт» (г. Пенза).

Испытаниям подвергали технологию и техническое средство для очистки нерафинированных растительных масел от первичных и вторичных продуктов окисления, акт испытаний представлен в приложении *К*.

Соответствие функциональным требованиям проверяли на холостом ходу и под нагрузкой.

При проверке на холостом ходу амплитуда колебаний фильтрационной мембраны составляла 4 мм в течение непрерывной работы установки.

Под нагрузкой установку проверяли при полном рабочем режиме в следующей последовательности:

- в корпус загружали 100 л нерафинированного растительного масла;
- очистку проводили в течение 30 мин.

Исследованиями установлено (таблица 5.8):

- содержание твердых дисперсных частиц после 30-минутной обработки уменьшается с 57,0 тыс. шт./100 см^3 до 1,2 тыс. шт./100см^3;
- кислотное число сокращается с 1,3 до 1,1 мг КОН/г, перекисное число – с 6,0 до 2,1 ммоль свободного кислорода/кг, цветное число – с 17,0 до 15,9 мг йода.
- все показатели соответствуют уровню продукта высшего качества.

Таблица 5.8 – **Эффективность очистки нерафинированных растительных масел**

Показатель	Исходное состояние	После УЗ-обработки	Эффективность, %
Кислотное число, мг КОН/г	1,3	1,1	+15,4
Перекисное число, ммоль свободного кислорода/кг	6,0	2,1	+65
Цветное число, мг йода	17,0	15,9	+6,4
Загрязненность, тыс. шт./100 см^3	57,0	1,2	+97,8

По результатам производственных испытаний опытно-промышленный образец установки для ультразвуковой обработки растительных масел полностью соответствует требованиям конструкторской документации и обеспечивает все этапы технологического воздействия.

Выводы по главе

1. Опытные образцы установок для непрерывной обработки зерна и зернобобовых культур, а также для очистки нерафинированных растительных масел прошли производственные испытания в ООО «Химмаш-Старт» (г. Пенза).

2. В ходе производственных испытаний изменена конструкция ультразвуковой установки для непрерывной обработки зерна сои. В ней была использована пьезоэлектрическая колебательная система увеличенной площади, что позволило рассредоточить обрабатываемый материал по длине рабочей зоны. В результате появилась возможность постоянного перемещения суспензии шнеком, улучшилась проницаемость обрабатываемого материала и устранены препятствия при проникновении пульсирующих микротечений.

3. По результатам производственных испытаний были получены положительные решения о соответствии предлагаемых технических решений требованиям конструкторской документации и технологического воздействия.

6 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

На основании технологических и конструктивных решений, представленных в работе, повышение эффективности предлагаемых технологий было обеспечено за счет применения специального оборудования, предусматривающего использование ультразвукового воздействия на обрабатываемую продукцию растениеводства. Технические характеристики разработанного, изготовленного и опробованного в производственных условиях оборудования представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – **Технические характеристики установок**

Показатель	Универсальная шнековая установка		Фильтрационная установка для обработки растительных масел
	для обработки зерна пшеницы	для обработки зерна сои	
Производительность установки	1,7*	1,2*	100**
Потребляемая мощность, кВт	2,6		1,8
Время обработки, мин	0,7	30,0	30

*т/ч; **л/ч

При определении технико-экономической эфективности руководствовались известными методиками расчета [291–293].

Цена проектируемых установок $Ц_{пу}$ (руб.) определялась суммарными затратами на материалы, агрегаты и узлы, входящие в состав конструкции, с учетом трудозатрат на ее сборку:

$$Ц_{пу} = М_з + С_з, \quad (6.1)$$

где $М_з$ – затраты на материалы, узлы и агрегаты, руб.;

$С_з$ – стоимость сборки установки, руб.

Затраты на материалы, узлы и агрегаты $М_з$ (руб.):

$$М_з = Ц_т + Ц_ш + Ц_п + Ц_э + Ц_и, \quad (6.2)$$

где $Ц_т$ – цена листа нержавеющей стали, руб.;

$Ц_ш$ – стоимость шнеков, руб.;

$Ц_п$ – стоимость подшипников, руб.;

$Ц_э$ – цена электродвигателя, руб.;

$Ц_и$ – стоимость ультразвуковых излучателей, руб.

Стоимость сборки установки $С_з$ (руб.) рассчитали по формуле:

$$С_з = Р_и + Р_э + А_о + З_п, \quad (6.3)$$

где $Р_и$ – расходы на инструмент, руб.;

$Р_э$ – расходы на электроэнергию, руб.;

$А_о$ – амортизационные отчисления на оборудование, руб.;

$З_п$ – заработная плата работникам, руб.

Эксплуатационные затраты $И_э$ (руб.):

$$И_э = З + А + Р + Э + П, \quad (6.4)$$

где З – затраты на заработную плату рабочих, руб.;

А – амортизационные отчисления, руб.;

Р – отчисления на ремонт и техническое обслуживание установки, руб.;

Э – затраты на электроэнергию, руб.;

П – прочие эксплуатационные затраты, руб.

Затраты на заработную плату рабочих, занятых при выполнении механизированного процесса обработки зерна и масла:

$$З = DtnLС_т, \quad (6.5)$$

где D – продолжительность работы машины в году, дней;

t – продолжительность работы за 1 смену при выполнении производственного процесса, ч;

n – количество смен в сутки;

L – количество рабочих, занятых при выполнении процесса, чел.;

$С_т$ – часовая тарифная ставка с дополнительными начислениями и отчислениями на социальные нужды (социальное страхование, медицинское страхование, отчисления в фонд занятости, пенсионный фонд) по данным предприятия, руб.; при обработке зерна пшеницы и сои $С_т$ = 120 руб., при очистке растительных масел $С_т$ = 110 руб.

Таким образом:

$$З_1 = 247 \cdot 8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 120 = 237120 \text{ руб.};$$

$$З_2 = 247 \cdot 8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 110 = 217360 \text{ руб.},$$

где $З_1$ – затраты на заработную плату рабочих, занятых при обработке растительного сырья;

$З_2$ – затраты на заработную плату рабочих, обслуживающих установку для очистки растительного масла.

Амортизационные отчисления А:

$$А = \frac{БН_а}{100}, \quad (6.6)$$

где Б – балансовая стоимость установки, руб.;

$Н_а$ – норма ежегодных амортизационных отчислений (10 % от балансовой стоимости).

Таким образом, амортизационные отчисления:

- при обработке растительного сырья:

$$А_1 = \frac{645000 \cdot 10}{100} = 64500 \text{ руб.};$$

- при очистке растительного масла:

$$А_2 = \frac{436500 \cdot 10}{100} = 43650 \text{ руб.}$$

Затраты на ремонт и техническое обслуживание установки:

$$Р = \frac{БН_р}{100}, \quad (6.7)$$

где $Н_р$ – норма ежегодных отчислений на ремонт и техническое обслуживание, % (по данным предприятия).

Для универсальной шнековой установки для обработки растительного сырья:

$$Р_1 = \frac{635000 \cdot 12}{100} = 76200.$$

Для фильтрационной установки для обработки растительных масел:

$$Р_2 = \frac{35000 \cdot 12}{100} = 4200.$$

Затраты на электроэнергию Э рассчитали по формуле:

$$Э = F_г Z_э, \quad (6.8)$$

где $F_г$ – годовое потребление электроэнергии, кВт·ч;

$Z_э$ – цена 1 кВт·ч электроэнергии, руб.

Годовой расход электроэнергии на технологические нужды F:

$$F = \frac{NtnDK_з K_о}{K_с КПД}, \quad (6.9)$$

где N – потребляемая мощность установленного оборудования, кВт;

t – продолжительность смены, ч;

n – количество смен работы оборудования в сутки;

D – количество дней работы оборудования в году;

$K_з$ – коэффициент загрузки оборудования, $K_З$ = 0,85;

$K_о$ – коэффициент одновременности работы оборудования, $К_о$ = 0,6...0,7;

$K_с$ – коэффициент, учитывающий потери сети, $K_с$ = 0,96;

КПД – коэффициент полезного действия электродвигателей, КПД = 0,85…0,90.

$$F_1 = \frac{2,6 \cdot 8 \cdot 1 \cdot 247 \cdot 0,85 \cdot 0,6}{0,96 \cdot 0,85} = 3705,0;$$

$$F_2 = \frac{1,8 \cdot 8 \cdot 1 \cdot 247 \cdot 0,85 \cdot 0,6}{0,96 \cdot 0,85} = 1790,75.$$

Тогда при обработке растительного сырья:

$$Э_1 = 3705 \cdot 4,60 = 17043 \text{ руб.}$$

При очистке растительного масла:

$$Э_2 = 1790,75 \cdot 4,60 = 8237,45 \text{ руб.}$$

Прочие эксплуатационные затраты планируют в размере 3–5 % от суммы эксплуатационных затрат.

Затраты на техническую воду $З_в$ при обработке зерна пшеницы и сои:

$$З_в = F_г Z_в, \quad (6.10)$$

где $F_г$ – потребление воды за год, м^3;

$Z_в$ – стоимость 1 м^3 воды, руб.

$$З_{в1} = 370,5 \cdot 22,4 = 8299,2 \text{ руб.}$$

Общая сумма годовых эксплуатационных затрат с учетом прочих затрат:

$$И_э = (З + А + Р + Э + З_в) \cdot 1,05; \quad (6.11)$$

$$И_{э1} = (237120 + 64500 + 76200 + 17043 + 8299,2) \cdot 1,05 = 423320,21 \text{ руб.};$$

$$И_{э2} = (217360 + 3500 + 4200 + 8237,45) \cdot 1,05 = 244962,3 \text{ руб.}$$

Удельные эксплуатационные затраты $И_{уд}$ (руб./т):

$$И_{уд} = \frac{И_э}{W}, \quad (6.12)$$

где W – годовая производительность машины, т.

$$W_1 = 1,7 \cdot 8 \cdot 247 = 3359,2 \text{ т};$$

$$W_2 = 1,2 \cdot 8 \cdot 247 = 2371,2 \text{ т};$$

$$W_3 = 100 \cdot 8 \cdot 247 = 276,640 \text{ т};$$

$$И_{уд1} = \frac{423320,21}{3359,2} = 126,01;$$

$$И_{уд_2} = \frac{423320,21}{2371,2} = 178,5;$$

$$И_{уд_3} = \frac{423320,21}{276,640} = 4885,49.$$

Годовой экономический эффект $Э_г$ (руб.) от внедрения установок:

$$Э_г = С_г – З_{пр}, \quad (6.13)$$

где $С_г$ – стоимость готовой продукции, руб.;

$З_{пр}$ – сумма годовых затрат на производство, руб.

Закупочная цена зерна пшеницы 15000 руб./т; сои – 35000 руб./т; подсолнечника – 30000 руб./т.

Таким образом:

$$З_{пр1} = И_{э1} + З_{с1} + З_{а1} = 423320,21 + 50388000 + 2000000 = 52811320,21 \text{ руб.};$$

$$З_{пр1.1} = И_{э1.1} + З_{с1.1} + З_{а1.1} = 423320,21 + 17572000 + 2000000 = 119995320,21 \text{ руб.};$$

$$З_{пр2} = И_{э2} + З_{с2} + З_{а2} = 244962,3 + 8299200 + 6000000 = 14544162,3 \text{ руб.},$$

где $И_э$ – сумма годовых эксплуатационных затрат, руб.;

$З_с$ – затраты на сырье, руб;

$З_а$ – затраты на аренду, руб.

$$Э_{г1} = 53747200 – 52811320,21 = 935879,79 \text{ руб.};$$

$$Э_{г1.1} = 121267120 – 119995320,21 = 1271799,79 \text{ руб.};$$

$$Э_{г2} = 15856146 – 14544162,3 = 1311983,7 \text{ руб.}$$

Результаты расчетов технико-экономических показателей предлагаемых установок представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – **Технико-экономические показатели предлагаемых установок**

Показатель	Универсальная шнековая установка		Фильтрационная установка для очистки растительных масел
	при обработке зерна пшеницы	при обработке зерна сои	
Стоимость материалов, узлов и агрегатов, руб.	635000		435000
Стоимость сборки установки, руб.	10000		1500
Эксплуатационные затраты, руб.	17043		8237,45
Затраты на заработную плату, руб.	237120		217360
Амортизационные отчисления, руб.	64500		43650
Затраты на ремонт и техническое обслуживание установки, руб.	76200		4200
Затраты на электроэнергию, руб.	17043		8237,45
Годовой расход электроэнергии на технологические нужды, кВт·ч	3705		1790,75
Годовое потребление воды на технологические нужды, $м^3$	370,5		–
Общая сумма годовых эксплуатационных затрат, руб.	423320,21		244962,3
Годовая производительность машины, т	3359,2	2371,2	276,640
Удельные эксплуатационные затраты, руб./т	126,01	178,5	4885,49
Стоимость конструкции, руб.	645000		436500

Годовой экономический эффект, руб.	935879,79	1271799,79	1311983,7
Срок окупаемости, лет	0,68	0,51	0,33

Выводы по главе

Таким образом, годовой эффект от реализации предложенных технических средств и технологий составит при производстве обойной муки 935,9 тыс. руб., при производстве кормов из зерна сои – 1271,8 тыс. руб., при очистке растительных масел – 1311, 9 тыс. руб.

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 необходимого уровня. При проведении анализа технической литературы установлено, что использование ультразвуковой обработки продукции растениеводства позволит интенсифицировать процессы экстракции, фильтрации, увлажнения

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). 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 ультразвуковая кавитация в растительных маслах ускоряет процесс

фильтрации в 1,5-2 раза или на 50 % и снижает перекисное число в 2 раза , цветное число на 30%, 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 20–25% по сравнению с термообработкой при этом повышается производительность оборудования для обработки зерна на 15–20%.

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 производстве 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 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 зерна 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 и предлагаемую установку (патент № 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.

Автор диссертационной работы выражает признательность Ю. А. Кодацкому, М. С. Тулиевой, Н. А. Семилету, Д. В. Макарову, А. Е. Сундукову, принявшим непосредственное участие в выполнении различных этапов научно-исследовательских работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Россельхознадзор / Новости : Результаты работы Россельхознадзора в сфере обеспечения качества и безопасности зерна и продуктов его переработки в 2024 году : сайт [Электронный ресурс]. – URL : https://fsvps.gov.ru/news/itogi-2024-jeksport-zerna-gosudarstvennyj-monitoring-kachestva-borba-s-nedostovernym-deklarirovaniem/ (дата обращения 16.02.2025).

2. Россельхознадзор / Новости : федеральная служба по ветеринарному и фитосанитарному надзору : сайт [Электронный ресурс]. – URL : https://64.fsvps.gov.ru/news/rosselhoznadzor-prokontroliroval-bolee-180-tysjach-tonn-zerna-i-produktov-ego-pererabotki-jeksportirovannyh-iz-saratovskoj-i-samarskoj-oblastej/ (дата обращения 16.02.2025).

3. *Алтухов, А. И.* Зерноперерабатывающая промышленность России : Проблемы и пути их решения / А. И. Алтухов // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 5. – С. 2–10.

4. *Егоров, Г. А.* Термодинамическое взаимодействие зерна с водой / Г. А. Егоров // Хлебопродукты. – 2004. – № 2. – С. 22–26.

5. *Зверев, С. В.* Применение водно-тепловой обработки в технологии переработки проса / С. В. Зверев, И. О. Дроздов, Г. Н. Панкратов // Хлебопродукты. – 2014. – № 8. – С. 62–63.

6. *Мухин, В.А.* Расчет пневматического транспортера пневмомеханической установки для очистки кормушек от остатков корма/Мухин В.А., Демин Е.Е., Павлов П.И., Назаров С.С., Жиздюк А.А.//Аграрный научный журнал. 2020. № 6. С. 116-121.

7. *Глобин, А.Н.* Теоретические исследования процесса смешивания кормов центробежным смесителем/Глобин А.Н., Глазков Д.Ю., Липкович И.Э., Егорова И.В., Курганский А.А.//АгроЭкоИнфо. 2024. № 5 (65).

8. *Новикова, В. А.* Энергосберегающая установка для микронизации кормового зерна / В. А. Новикова // Труды международной научно-технической

конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». – 2008. – Т. 3. – С. 40–41.

9. *Оробинский, В.И.* Совершенствование системы доработки колосового вороха/Оробинский В.И., Гиевский А.М., Гулевский В.А., Корнев А.С., Подорванов Д.А.//Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022. Т. 15. № 2 (73). С. 11-17.

10. Оптимизация процесса сушки зерновых культур в барабанной сушилке с тепловым насосом / А. Н. Остриков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2018. – № 1 (361). – С. 74–78.

11. *Росляков, Ю. Ф.* Устройство для обработки влажного зерна жидким консервантом / Ю. Ф. Росляков, В. В. Вербицкий // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2018. – № 11(1). – С. 71–74.

12. *Курочкин, А.А.* Теоретическое обоснование конструктивно-технологической схемы энергосберегающего экструдера Курочкин А.А., Полывяный Ю.В., Зимняков В.М., Маковский С.В., Чиркова Е.В.//Нива Поволжья. 2023. № 3 (67).

13. *Шахов, В. А.* Концепция инновационного развития промышленного производства комбинированных кормов / М. В. Чкалова, В. А. Шахов // Техника и технологии в животноводстве. – 2020. – № 2 (38). – С. 44–54.

14. *Шевцов, А.А.* Стратегия управления технологией извлечения белоксодержащих продуктов из семян масличных культур/Шевцов А.А., Сердюкова Н.А., Ткач В.В.// В книге: Новое в технологии и технике функциональных продуктов питания на основе медико-биологических воззрений. сборник научных статей и докладов XI Международной научно-технической конференции. Воронеж, 2024. С. 20-25.

15. *Erickson, D. R.* Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization / D. R. Erickson. – Brussels : AOAC Press, 1995. – 592 p.

16. *Johnson, L. A.* Soybeans : Chemistry, Production, Processing, and Utilization / L. A. Johnson. – Brussels : AOCS Press, 2008. – 842 p.

17. *Будников, Д. А.* Постановка задачи теплопроводности при СВЧ-нагреве зерна для обеззараживания / Д. А. Будников, А. Н. Васильев, А. А. Васильев // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2014. – № 1 (13). – С. 56–62.

18. *Юсупова, Г. Г.* Влияние энергии СВЧ-поля на микробиологическую безопасность в технологиях очистки и подготовки зерна к помолу / Г. Г. Юсупова, Е. Р. Балова // Доклады ТСХА. – М., 2015. – С. 73–77.

19. *Шаршунов, В. А.* Послеуборочная обработка и хранение зерна и семян : учебное пособие : в 2 ч. / В. А. Шаршунов, Е. Н. Урбанчик. – Ч. 1. Хранение зерна и семян. – Минск : Мисанта, 2014. – 684 с.

20. Радиационные агробиотехнологии : исследования микробиологической безопасности и качества облучённой продукции / Г. В. Козьмин [и др.] // Труды регионального конкурса проектов фундаментальных научных исследований : сборник. – Калуга, 2015. – С. 216–225.

21. Innovative Technologies for the Mitigation of Mycotoxins in Animal Feed and Ingredients : a review of recent patents / Yan Zhu [et al.] // Animal Feed Science & Technology. – 2016. – 216. – P. 19–29.

22. Пат. № CN 208354004. Vacuum refrigeration granary of guaranteeing quality / Lu Guoqing ; заявитель, патентообладатель Lu Guoqing : № CN 201820591593 U ; заявл. 24.04.2018 ; опубл.11.01.2019. – Электронная копия доступна на сайте Федерального института промышленной собственности // ФИПС : [сайт]. – URL : https://ru.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20190111&DB=&locale=ru_RU&CC=CN&NR=208354004U&KC=U&ND=5 (дата обращения: 7.04.2021).

23. *Бербер, В. А.* Теоретические исследования эксплуатационных параметров тонкослойных центрифуг при очистке жидкости / В. А. Бербер // Труды НИТИ. – Саратов, 1987. – Вып. 1. – С. 120–140.

24. *Варивода, А. А.* Особенности адсорбционной очистки рапсовых масел / А. А. Варивода // Сборник научных трудов Всероссийского научно-исследовательского института овцеводства и козоводства. – Ставрополь, 2015. – Т. 1. – № 8. – С. 34–37.

25. *Земсков, В. И.* Центрифуга для очистки растительных масел на базе сепаратора СЦ-3 / В. И. Земсков, Г. М. Харченко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 4 (126). – С. 114–120.

26. Изучение процесса очистки растительного масла с применением розовой глины / П. Б. Разговоров [и др.] // Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология. – 2016. – Т. 59. – № 5. – С. 59–64.

27. *Харченко, Г. М.* Эффективность очистки растительных масел в условиях сельскохозяйственных предприятий / Г. М. Харченко, В. И. Земсков // Аграрная наука – основа успешного развития АПК и сохранения экосистем : материалы Международной научно-практической конференции. – Волгоград, 2012. – С. 234–237.

28. *О'Брайен, Р.* Жиры и масла : производство, состав и свойства, применение / Р. О'Брайен ; пер. с англ. В. Д. Широкова и др. – 2-е изд. – СПб. : Профессия, 2007. – 751 с.

29. *Erickson, D. R.* Fat Degradation Reactions / D. R. Erickson, G. R. List // Bailej's Industrial Oil and Fat Products / Applewbite, T. H. Ld. – Ythed. – Vol. 3. – New York : John Wiley f. Sous, 1985. – P. 275–277.

30. Прогрессивные способы переработки плодов и овощей с помощью ультразвука / Г. Н. Архипова [и др.] // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2007. – № 2. – С. 90–91.

31. *Ботвинникова, В. В.* Формирование потребительских свойств кисломолочных напитков на основе эффектов ультразвука / В. В. Ботвинникова, О. Н. Красуля // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Пищевые и биотехнологии. – 2015. – Т. 3. – № 4. – С. 30–40.

32. *Даниловцева, И. В.* Оптимизация технологических процессов гидролиза-экстрагирования при получении пектина из плодово-ягодных выжимок /

М. В. Даниловцева, И. В. Полякова // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2007. – № 5. – С. 32–33.

33. *Демчук, И. С.* Ультразвуковая интенсификация технологических процессов / И. С. Демчук. – М. : Машгиз, 1960. – 90 с.

34. *Донскова, Л. А.* К вопросу об использовании ультразвука в пищевой промышленности / Л. А Донскова, М. М. Черемных // Научные труды Вольного экономического общества России [Электронный ресурс]. – 2012. – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-ob-ispolzovanii-ultrazvuka-v-pischevoy-promyshlennosti (дата обращения: 05.04.2021).

35. *Комоликов, А. С.* Влияние ультразвука на процесс замеса и расстойки теста / А. С. Комоликов, Д. К. Ахмедова // Явления переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств : материалы II Международной научно-практической конференции. – Воронеж, 2016. – С. 79–84.

36. *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.

37. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В. Н. Хмелев [и др.] ; Алтайский гос. техн. ун-т. – Бийск, 2010. – 203 с.

38. Applications of Ultrasound in Analysis, Processing and Quality Control of Food : a review / T. S. Awad [et al.] // Food Research International. – 2012. – P. 410–427. – URL : https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.05.004 (дата обращения 07.04.2021).

39. Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing / H.Feng [et al.] (eds.) // 65/ Food Engineering Series, Springer Science + Business Media, LLC 2011. – DOI : 10.1007/978-1-4419-7472-3_3.

40. Effect of high power ultrasound waves on properties of meat : a review / S. D. Jayasooriya [et al.] // International Journal of Food Properties. – 2004. – 2. – P. 301–319. – DOI :10.1081/JFP-120030039.

41. *Акопян, Б. В.* Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами. Ультразвук в медицине, ветеринарии и экспериментальной биологии : учебное пособие / Б. В. Акопян, Ю. А. Ершов ; под ред. С. И. Щукина. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 224 с.

42. *Герасимов, Д. В.* Теоретические основы применения ультразвука для обработки пищевых систем с целью регулирования содержания биологически активных компонентов / Д. В. Герасимов, Е. П. Сучкова // Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. Процессы и аппараты пищевых производств. – 2014. – № 3. – С. 53–60.

43. *Константинов, В. А.* Вопросы физической природы кавитации и эрозии / В. В. Константинов // Известия АН СССР, ОТН. – 1947. – № 6. – С. 657–667.

44. *Остроумов, Г. А.* О механизме кавитационного разрушения / Г. А. Остроумов // Акустический журнал. – 1963. – Т. 9. – Вып. 2. – С. 198–204.

45. *Семерчан, А. А.* К вопросу о теории разрушающего действия кавитации / А. А. Семерчан, Л. Ф. Верещагин // Инженерно-физический журнал. – 1960. – Т. 73. – № 3. – С. 87–90.

46. *Фрид, А. М.* К вопросу о физической сущности кавитационного разрушения материалов / А. М. Фрид // Известия вузов. Авиационная техника. – 1963. – № 1. – С. 126–130.

47. *Флинн, Г.* Физика акустической кавитации в жидкости / Г. Флинн // Физическая акустика / под. ред. У. Мэзона. – Т. 3. – М. : Мир. 1967. – 452 с.

48. *Френкель, Я. И.* Об электрических явлениях, связанных с кавитацией, обусловленной ультразвуковыми явлениями в жидкости / Я. И. Френкель // Журнал физической химии. – 1940. – Т. 14. – Вып. 3. – С. 305–308.

49. *Kornfeld, M.* On the Destructive Action of Cavitations / M. Kornfeld, L. Suvorov // Journal of Applied Physics. – 1944. – Vol. 15. – No. 3. – P. 495–497.

50. *Parson, C. A.* Investigations into the Causes of Corrosion or Erosion of Propellers / C. A. Parson, S. S Cook // Engineering. – 2019. – Vol. 107. – 501. – P. 515–519.

51. *Haller, P.* Untersuchung von Korrosion durch Kavitation. Schweizerische Bauzeitung (Switzerland) / P. Haller. – 1933. – Bd. 101. – n. 21–22. – S. 264–266.

52. Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2025 годы [Электронный ресурс]. – URL : https://docs.cntd.ru/document/902361843.

53. Российский статистический ежегодник. 2024: Стат.сб./Росстат. – Р76 М., 2024 – 630 с

54. Россия в цифрах. 2021 : краткий статистический сборник / Росстат, 2021. – 275 с.

55. Пат. на пол. мод. 208531 Российская Федерация, МПК В 02 В 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.

56. *Фомин, А. А.* Анализ переработки сельскохозяйственной продукции в России и законодательное обеспечение развития отрасли / А. А. Фомин // Московский экономический журнал. – 2017. – № 3. – С. 46–56.

57. Обоснование направления совершенствования технологии обработки зерна на основе «экструзии – экспандирования» / В. А. Шаршунов [и др.] // Известия Академии аграрных наук Республики Беларусь. – 2000. – № 3. – С. 93–98.

58. *Филатов, В. В.* Тепловая обработка зерна сои при инфракрасном энергоприводе / В. В. Филатов, В. В. Кирдяшкин, Р. Р. Азизов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – № 5. – С. 34.

59. Маркетинговое исследование : Рынок муки пшеничной за 2015–2019 гг. [Электронный ресурс] // ОГАУ «Инновационно-консультационный центр АПК». – Белгород, 2020. – 27 с. – URL : http://ikc.belapk.ru/upload/iblock/b11/b11b6984177d3093fe1d8577c0761393.pdf (дата обращения: 5.04. 2021).

60. *Панкратов, Г. Н.* Научные основы совершенствования технологии мукомольного производства : дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.01 ; защищена 20.12.01 ; утв. 5.04.02 / Панкратов Георгий Несторович. – М., 2001. – 365 с.

61. *Егоров, Г. А.* Технология муки. Технология крупы / Г. А. Егоров. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : КолосС, 2005. – 296 с.

62. *Бутковский, В. А.* Современная техника и технология производства муки / В. А. Бутковский, Л. С. Галкина, Г. Е. Птушкина. – М. : ДеЛи Принт, 2006. – 319 с.

63. *Казаков, Е. Д.* Биохимия зерна и хлебопродуктов / Е. Д. Казаков, Г.П. Карпиленко. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб. : ГИОРД, 2005. – 512 с.

64. *Казаков, Е. Д.* Биохимия зерна и продуктов его переработки / Е. Д. Казаков, В. Л. Кретович. − М. : Агропромиздат, 1989. – 368 с.

65. *Лебедев, С. И.* Физиология растений / С. И. Лебедев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1988. – 544 с.

66. *Овчинников, Ю. А.* Биоорганическая химия / Ю. А. Овчинников. – М. : Просвещение, 1987. – 815 с.

67. *Охрименко, О. В.* Основы биохимии сельскохозяйственной продукции : учебное пособие / О. В. Охрименко. – СПб. : Лань, 2016. – 448 с.

68. Технология переработки продукции растениеводства / под ред. Н. М. Личко. – М. : Колос. – 2000. – 552 с.

69. ГОСТ 9353-2016. Пшеница. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2016. – 15 с.

70. *Панкратов, Г. Н.* Анализ эффективности и моделирование технологических процессов мукомольного производства / Г. Н. Панкратов // Хлебопродукты. – 2015. – № 1. – С. 46–47.

71. Оценка качества зерна : справочник / сост. И. И. Василенко, В. И. Комаров. – М. : Агропромиздат, 1987. – 208 с.

72. *Козьмина, Н. П.* Теоретические основы прогрессивных технологий (Биотехнология). Зерноведение (с основами биохимии растений) / Н. П. Козьмина, В. А. Гунькин, Г. М. Сусляк. – М. : Колос, 2006. – 464 с.

73. *Хосни, Р. К.* Зерно и зернопродукты / К. Р. Хосни ; пер. с англ. под. общ. ред. Н. П. Черняева. – СПб. : Профессия, 2006. – 336 с.

74. ТР ТС 015/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности зерна». – 2011. – 38 с.

75. *Гагкаева, Т. Ю.* Фузариоз зерновых культур / Т. Ю. Гагкаева, О. П. Гаврилова // Защита и карантин растений. – 2009. – № 12. – С. 13–15.

76. *Юлдашева, Ш. Ж.* Влияние амбарных вредителей на качество зерна пшеницы [Электронный ресурс] / Ш. Ж. Юлдашева // Наука и образование сегодня. – 2019. – № 2 (37). URL : https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-ambarnyh-vrediteley-na-kachestvo-zerna-pshenitsy (дата обращения: 26.04.2021).

77. Диагностика картофельной болезни хлеба, вызываемой бактериями видов Bacillus subtilis и Bacillus mesentericus [Электронный ресурс] / М. А. Юдина [и др.] // Вестник Ульяновской ГСХА. – 2011. – № 3 (15). – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-kartofelnoy-bolezni-hleba-vyzyvaemoy-bakteriyami-vidov-bacillus-subtilis-i-bacillus-mesentericus (дата обращения: 26.04.2021).

78. *Жученко, А. А.* Ресурсный потенциал производства зерна в России (теория и практика) / А. А. Жученко. – М. : Агрорус, 2004. – 1109 с.

79. *Ганиев, М. М.* Вредители и болезни зерна и зернопродуктов при хранении / М. М. Ганиев, В. Д. Недорезков, Х. Г. Шарипов. – М. : КолосС, 2009. – 208 с.

80. *Юсупова, Г. Г.* Методология комплексной системы обеззараживания зерна и продуктов его переработки : автореф. дис. … д-ра биолог. наук : 03.00.16 / Юсупова Галина Георгиевна. – Красноярск, 2004. – 36 с.

81. ГОСТ 13586.6-93. Зерно. Метод определения зараженности вредителями. – М. : Стандартинформ, 2009. – 8 с.

82. СанПиН 2.3.2.1280-03. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов [Электронный ресурс]. – URL : base.garant.ru.

83. Innovative Technologies for the Mitigation of Mycotoxins in Animal Feed and Ingredients : a review of recent patents / Yan Zhu [et al.] // Animal Feed Science & Technology. – 2016. – 216. – P. 19–29.

84. Comparative study of in vitro prooxidative properties and genotoxicity induced by aflatoxin B1 and its laccase-mediated detoxification products / H. Zeinvand-Lorestani [et al.] // Chemosphere. – 2015. – Sep. – 135. – P. 1–6. – Doi : 10.1016/j.chemosphere.2015.03.036.

85. Пат. 2222171 Российская Федерация, МПК A 01 F 25/00, A 23 B 9/26, C 12 P 1/02. Способ подготовки зерна перед закладкой на хранение / Ермоленко С. А., Надыкта В. Д., Квасенков О. И. ; заявитель и патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт биологической защиты растений. – № 2002124565/13 ; заявл. 16.09.2002 ; опубл. 27.01.2004. – 4 с.

86. Пат. 2632977 Российская Федерация, C 1 МПК A 01 N 25/00, A 23 B 9/16. Состав для хранения зерна, пищевых продуктов, семян злаковых, бобовых и комбикормов / Никифорова М. П. ; заявитель и патентообладатель Никифорова М. П. – № 2016145957 ; заявл. 23.11.2016 ; опубл. 11.10.2017. – 7 с.

87. *Росляков, Ю. Ф.* Целесообразность использования пропионовой кислоты для консервирования влажного зерна / Ю. Ф. Росляков, Т. Н. Прудникова // Известия Вузов. Пищевая технология. – № 5. – 1993. – С. 17–19.

88. Пат. 2539731 Российская Федерация, C1 МПК B 02 B 5/00, B 02 B 5/02, C 12 C 1/02. Способ обеззараживания зернового сырья / Тесленко Г. С., Агудаличева Н. А., Акопян Г. В. и [др.] ; заявитель и патентообладатель Саруханова Л. Е. – № 2013131878 ; заявл. 11.07.2013 ; опубл. 27.01.2015. – 7 с.

89. Пат. 2565261 Российская Федерация, C1 МПК A 23 K 1/16. Способ деконтаминации сельскохозяйственных кормов, загрязненных микотоксинами / Горлов И. Ф., Осадченко И. М., Мосолов А. А. и [др.] ; заявитель и патентообладатель ГНУ «Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции Российской академии

сельскохозяйственных наук». – № 2014121936/13 ; заявл. 29.05.2014 ; опубл. 20.10.2015. – 5 с.

90. Пат. 179642 Российская Федерация, U1 МПК A 01 C 1/00. Устройство обеззараживания зерна для зерно- и семяочистительного агрегата / Васильев А. А., Будников Д. А., Васильев А. Н. ; заявитель и ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ». – № 2015150524 ; заявл. 25.11.2015 ; опубл. 21.05.2018. – 4 с.

91. Пат. 151892 Российская Федерация, U1 МПК A 01 C 1/00. Устройство для обеззараживания зерна / Шатов А. А., Катусов Д. Н. ; заявитель и патентообладатель Саратовский государственный аграрный ун-т им. Н. И. Вавилова. – № 2014144351/13 ; заявл. 06.11.2014 ; опубл. 20.04.2015. – 10 с.

92. *Евдокимов, А. П.* Применение коротковолнового ультрафиолетового излучения для бактерицидной обработки зерна / А. П. Евдокимов, Т. А. Кузнецова // Современное научное знание в условиях системных изменений : материалы Первой национальной научно-практической конференции / Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, Тарский филиал. – Омск, 2016. – С. 202–205.

93. *Николаенков, Т. С.* Использование ультрафиолетового излучения в технологии переработки пшеницы / Т. С. Николаенков, П. М. Турсунходжаев, М. А. Касымджанов // Безопасность пищевых продуктов и товаров народного потребления : материалы Международной научно-практической конференции.– Алматы, 2008. – С. 213–216.

94. *Кузнецова, Т. А.* Изменение биологических свойств зерна ячменя в результате воздействия ультрафиолетового излучения / Т. А. Кузнецова // Наука и молодежь : новые идеи и решения : материалы VIII Международной научно-практической конференции молодых исследователей, посвященной 70-летию Волгоградского государственного аграрного университета (Волгоград, апрель 2014 г.). – Волгоград, 2014. – Ч. I. – С. 160–163.

95. *Доценко, С. М.* Повышение эффективности подготовки соевого зерна к скармливанию сельскохозяйственным животным / С. М. Доценко, В. В. Самуйло. – Благовещенск : ДальГАУ, 1996. – 125 с.

96. Перспективы использования радиационных технологий в агропромышленном комплексе Российской Федерации / Р. М. Алексахин [и др.] // Вестник российской академии естественных наук. – 2014. – № 1. – С. 78–85.

97. Применение ионизирующих и неионизирующих излучений в агробиотехнологиях / Г. В. Козьмин [и др.] ; под ред. Г. В. Козьмина. – Обнинск : ВНИИСХРАЭ, 2013. – 191 с.

98. Пат. 2279918 Российская Федерация. С2 МПК B 02 B 1/08, A 21 D 8/02, A 23 L 1/31, B 01 J 19/10. Устройство для гидратации биополимеров / Шестаков С. Д. ; заявитель и патентообладатель ООО «Астор-С». – № 2004130184/13 ; заявл.13.10. 2004 ; опубл. 20.07.2006. – 16 с.

99. Оборудование для обеззараживания зерна [Электронный ресурс] // ООО НПП Точприбор : сайт. – М., 2010. – URL : https://npp-tp.ru/products/texnologicheskoe-oborudovanie/pishhevaya-promyishlennost-6/oborudovanie-dlya-obezzarazhivaniya/ (дата обращения: 05.04.2021).

100. *Авдеева, В. Н.* Влияние обработки озоном на физиологические параметры пшеницы [Электронный ресурс] / В. Н. Авдеева, Ю. А. Безгина, С. И. Любая // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. – URL : http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8696 (дата обращения: 24.05.2019).

101. Пат. 2550479 Российская Федерация, С1 МПК A 01 C 1/00, A 01 C 1/06, A 0 1N 25/02. Способ комбинированного обеззараживания зерна и семян с использованием электромагнитного поля сверхвысокой частоты / Фисинин В И., Лачуга Ю. Ф., Пахомов В. И., Пахомов А. И., Буханцов К. Н. ; заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение Северо-Кавказский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства Российской академии с.-х. наук. – № 2014100549/13 ; заявл. 09.01.2014 ; опубл. 10.05.2015. – 28 с.

102. *Марадудин, М. С.* Курсовое проектирование по расчету технологического оборудования мукомольных заводов : учебное пособие / М. С. Марадудин, А. М. Марадудин, Н. Л. Моргунова ; Сарат. гос. агр. ун-т. – Саратов, 2012. – 126 с.

103. *Галицкий, Р. Р.* Оборудование зерноперерабатывающих предприятий / Р. Р. Галицкий. – М. : Агропромиздат, 1990. – 272 с.

104. ГОСТ Р 52189-2003. Мука пшеничная. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2003. – 11 с.

105. *Андреева, В. Е.* Структурная идентификация и моделирование тепло- и влагообменных процессов при отволаживании зерна / В. Е. Андреева // Пищевая и перерабатывающая промышленность. – 2006. – № 2. – С. 129–135.

106. Гигроскопические свойства зерна различных культур / А. С. Гинзбург [и др.]. – М., 1967. – 194 с.

107. Влага в зерне / А. С. Гинзбург [и др.]. – М. : Колос, 1969. – 237 с.

108. *Гончарова, З. Д.* Исследование влияния гидротермической обработки зерна на изменение его структурно-механических свойств / З. Д. Гончарова // Мукомольная промышленность. – 1964. – № 5. – С. 19–21.

109. *Егоров, Г. А.* Интенсификация гидротермической обработки зерна / Г. А. Егоров, А. В. Кочеткова, О. Н. Сушенкова // Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность. – 1986. – № 5. – С. 46–47.

110. *Кулак, В. Г.* Технология производства муки / В. Г. Кулак, Б. М. Максимчук. – М. : Агропромиздат, 1991. – 224 с.

111. *Айзикович, Л. Е.* Физико-химические основы технологии производства муки / Л. Е. Айзикович. – М. : Колос, 1975. – 197 с.

112. Биохимия растительного сырья / В. Г. Щербаков [и др.]. – М. : Колос, 1999. – 376 с.

113. *Лыков, А. В.* Явление переноса в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. – М. – Л. : ГИТЛ, 1954. – 97 с.

114. *Клеев, И. А.* Значение температуры при хранении зерна / И. А. Клеев. – М. : Заготиздат, 1977. – 25 с.

115. *Бузоверов, С. Ю.* Исследование процесса увлажнения зерна перед помолом на спиральном шнеке / С. Ю. Бузоверов, В. И. Лобанов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 3 (125). – С. 135–139.

116. Кормление сельскохозяйственных животных : учебное пособие / Н. И. Владимиров [и др.]. – Барнаул : Изд-во АГАУ, 2008. – 211 с.

117. *Яковлев, Г. П.* Ботаника / Г. П. Яковлев, В. А. Челомбитько, В. И. Дорофеев. – М. : СпецЛит, 2008. – 690 с.

118. Методические рекомендации 2.3.1.2432-08. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации [Электронный ресурс]. – URL : https://docviewer.yandex.ru/view/1361544687/ (дата обращения 26.04.2021).

119. *Пащенко, Л. П.* Соя: состав, свойства, рациональное применение в АПК / Л. П. Пащенко. – Воронеж, 2007. – 199 с.

120. *Шакиров, Ф. К.* Организация производства на предприятиях АПК : учебное пособие для вузов / Ф. К. Шакиров. – М. : КолосС, 2004. – 224 с.

121. *Балакай, Г. Т.* Соя : экология, агротехника, переработка / Сер. «Подворье» / Г. Т. Балакай, О. С. Безуглова. – Ростов н/Д : Феникс, 2003. –160 с.

122. *Петибская, В. С.* Соя: химический состав и использование / В. С. Петибская ; под ред. В. М. Лукомца.– Майкоп : Полиграф-ЮГ, 2012. – 432 с.

123. *Щербаков, В. Г.* Технология получения растительных масел / В. Г. Щербаков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Колос, 1992. – 207 с.

124. *Бегеулов, М. Ш.* Основы переработки семян сои / М. Ш. Бегеулов. – М. : ДеЛи Принт, 2006. – 181 с.

125. *Залата, А. Н.* Повышение питательной ценности сои путем снижения активности ингибиторов протеаз / А. Н. Залата // Актуальные вопросы се-

лекции, технологии и переработки масличных культур : материалы 4-й Международной конференции молодых ученых и специалистов. – Краснодар, 2007. – С. 108–109.

126. *Krogdahl, A.* Soybean Proteinase Inhibitors and Human Proteolytic Enzymes. Selective Inactivation of Inhibitors by Treatment with Human Gastric Juice / A. Krogdahl, H. Holm // J. Nutr. – 1981. – 111. – P. 2045–2051.

127. *Гараева, С. Н.* Аминокислоты в живом организме / С. Н. Гараева, Г. В. Редкозубова, Г. В. Постолати. – Кишинев : Академия наук Молдовы, 2009. – 552 с.

128. Совершенствование технологии переработки сои с использованием ультразвука / Ф. Я. Рудик [и др.] // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28. – № 2. – С. 266–286.

129. *Ge, Y. C.* The Effect of Trypsin Inhibitor on the Pancreas and Small Intestine of Mice/ Y. C. Ge, R. G. H. Morgan // Brit. J. Nutr. – 1993. – 70. – No. 1. – P. 333–345.

130. Биохимия : учебник / под ред. Е. С. Северина. – 2-е изд., испр. – М. : ГЭОТАР-МЕД, 2004. – 784 с.

131. ГОСТ 10854-88. Семена масличные. Методы определения сорной, масличной и особо учитываемой примеси. – М. : Стандартинформ, 2010. – 9 с.

132. ГОСТ 27988-88. Семена масличные. Методы определения цвета и запаха. – М. : Стандартинформ, 2010. – 3 с.

133. ГОСТ 10856-96. Семена масличные. Метод определения влажности. – М. : Стандартинформ, 2010. – 6 с.

134. ГОСТ 10853-88. Семена масличные. Метод определения зараженности вредителями. – М. : Стандартинформ, 2010. – 4 с.

135. ГОСТ 17109-88. Соя. Требования при заготовках и поставках. – М. : Стандартинформ, 2015. – 4 с.

136. ГОСТ 13979.2-94. Жмыхи, шроты и горчичный порошок. Метод определения массовой доли жира и экстрактивных веществ. – М. : Стандартинформ, 2015. – 6 с.

137. ГОСТ 13979.3-68. Жмыхи и шроты. Метод определения суммарной массовой доли растворимых протеинов. – М. : Стандартинформ, 2002. – 4 с.

138. ГОСТ 13979.9-69. Жмыхи и шроты. Методика выполнения измерений активности уреазы. – М. : Стандартинформ, 2002. – 5 с.

139. Пат. 205746 Российская Федерация, С1 МПК А 23 L 1/211. Способ инактивации антипитательных веществ соевых бобов / Киселева Ю. В., Красильников В. Н., Кузьмина Н. В., Соболева М. Е. ; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский торгово-экономический ин-т. – № 93048818/13 ; заявл. 21.10.1993 ; опубл. 10.04.1996. – 5 с.

140. Пат. 2038797 Российская Федерация, С1 МПК А 23 К 1/00, А 01 F 25/00, А 23 N 12/00. Способ обработки необезжиренных бобов сои / Шарков Г. А., Лоенко В. В., Верхатуров С. В. ; заявители и патентообладатели Г. А. Шарков, В. В. Лоенко, С. В. Верхатуров. – № 5012955/15 ; заявл. 09.12.1991 ; опубл. 09.07.1995. – 5 с.

141. Пат. 2025081 Российская Федерация, С1 МПК А 23 L 1/20. Способ производства продукта из сои / Иваницкий С. Б., Иваницкий И. С., Щербаков В. Г., Прохоров В. Н. ; заявители и патентообладатели Краснодарский политехнический ин-т, Научно-технический кооперативный центр «Политехник». – № 5020125/13 ; заявл. 09.07.1991 ; опубл. 30.12.1994. – 8 с.

142. *Бабухадия, К. Р.* Влияние скармливания обработанного разными методами зерна сои на продуктивность кур несушек : дис. … канд. с.-х. наук : 06.02.02 / Бабухадия Кетеван Рубедовна. – Благовещенск, 2005. – 115 с.

143. Современные технологии переработки сои в России / Л. В. Гапанова [и др.] // Главный агроном. – 2006. – № 4. – С. 85–86.

144. *Комолых, О. М.* Новый способ устранения «бобового привкуса» при переработке семян сои на пищевые цели / О. М. Комолых, Р. В. Комолых, В. О. Комолых // Научные основы повышения эффективности с.-х. производства на Дальнем Востоке России : материалы IV Казьминских чтений. – Хабаровск, 2006. – С. 127–129.

145. *Стребков, В. Б.* Разработка нового способа обработки соевых бобов на основе инфракрасного энергоподвода : дис. … канд. техн. наук : 05.18.01 / Стребков Владимир Борисович. – М., 2008. – 128 с.

146. *Новикова, В. А.* Микронизация кормового зерна как способ подготовки его к скармливанию / В. А. Новикова // Вестник КрасГАУ. – 2008. – № 2. – С. 275–278.

147. Пат. 2150851 Российская Федерация, C1 МПК A 23 L 1/201, A 23 L 1/20. Способ обработки соевого зерна / Доценко С. М., Скрипко О. В. ; заявитель и патентообладатель Дальневосточный государственный аграрный ун-т. – № 98119624/13 ; заявл. 30.10.1998 ; опубл. 20.06.2000. – 3 с.

148. Пат. 2210254 Российская Федерация, C1 МПК A 23 L 1/20, A 23 J 3/14, A 23 J 3/16, A 23 L 1/212. Способ получения соево-овощного консервированного продукта / Присяжная С. Ф., Глебова Е. С., Личман О. М. ; заявитель и патентообладатель Дальневосточный государственный аграрный ун-т. – № 2001135919 ; заявл. 27.12.2001 ; опубл. 20.08.2003. – 3 с.

149. Пат. 2287296 Российская Федерация, C2 МПК A 23 L 1/20. Способ получения термообработанной соевой крупки / Доценко С. М., Гиль О. Б. ; заявитель и патентообладатель ГНУ Всероссийский научно-исследовательский институт сои. – № 2004131519/13 ; заявл. 29.10.2004 ; опубл. 20.11.2006. – 5 с.

150. Пат. 2728473 Российская Федерация, C1 МПК A 23 N 17/00 . Способ приготовления комбикорма и устройство для его осуществления / Кислова Е. Ф., Ушаков Ю. А., Шахов В. А., Абдюкаева А. Ф., Асманкин Е. М., Абдюкаев Р. Р. ; заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный аграрный университет. – № 2019136229 ; заявл. 11.11.2019 ; опубл. 29.07.2020, Бюл. № 22. – 11 с.

151. *Филатов, В. В.* Совершенствование процесса термообработки зерна при инфракрасном энергоподводе : дис. … канд. техн. наук : 05.18.12, 05.02.13 / Филатов Владимир Владимирович. – М., 2005. – 312 с.

152. *Филатов, В. В.* Тепловая обработка зерна сои при инфракрасном энергоприводе / В. В. Филатов, В. В. Кирдяшкин, Р. Р. Азизов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – № 5. – С. 34–36.

153. Классификация способов инактивации антипитательных веществ / В. Ю. Фролов [и др.] // International scientific and practical conference world science. – 2016. – № 4 (8). – С. 39–43.

154. Зверев, С. В. Инактивация антипитательных веществ в сое при высокотемпературной микронизации / С. В. Зверев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – № 4. – С. 30–31.

155. Пат. 2044034 Российская Федерация, С1 МПК С11В 1/02. Способ переработки соевых семян с получением масла и жмыха или шрота / Ключкин В. В., Лисицын А. Н., Краснобородько В. И., Заремба-Рацевич Г. В., Федоров Г.Ф. ; заявитель и патентообладатель Всероссийский научнно-исследовательский институт жиров. – № 94004266/13 ; заявл. 09.02.1994 ; опубл. 20.09.1995. – 9 с.

156. *Афанасьев, В. А.* Руководство по технологии комбикормовой продукции с основами кормления животных [Электронный ресурс] / В. А. Афанасьев. – Воронеж, 2007. – 389 с. – URL : https://animal-ration.ru/wp-content/uploads/2019/03/Afanasev-V.-Rukovodstvo-po-tehnologii-kombikormovoj-produkcii-s-osnovami-kormlenija-zhivotnyh-2007.pdf (дата обращения: 7.04.2021).

157. Пат. 2178658 Российская Федерация, С1 МПК A 23 L 1/20, A 23 J 1/14. Способ получения соевого продукта типа сыра-тофу / Константинова О. В., Малиновская В. С., Никуленкова Т. Ф. ; заявитель и патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт жиров. – № 2000118965/13 ; заявл. 17.07.200 4 ; опубл. 27.01.2002. – 9 с.

158. *Трухачев, В. И.* Перспективные технологии подготовки сои к скармливанию [Электронный ресурс] / В. И. Трухачев, А. П. Марынич // Успехи современного естествознания. – 2003. – № 7. – С. 83–85. – URL : http://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=14653 (дата обращения : 06.08.2019).

159. Пат. 2104650 Российская Федерация, C1 МПК A 23 C 11/10, 23 L 1/20. Способ производства соевого молока / Марынич А. П., Кокурин И. С., Злыднев Н. З. ; заявитель и патентообладатель Ставропольская государственная сельскохозяйственная академия. – № 96117067/13 ; заявл. 20.08.1996 ; опубл. 20.02.1998. – 5 с.

160. Машина для замачивания и мойки сои : [сайт]. – URL : https://www.yslfood.com/ru/product/-/soaking_washing_machine.html (дата обращения: 07.04. 2021).

161. *Мустафаев, С. К.* Технология отрасли (приемка, обработка и хранение масличных семян) [Электронный ресурс] : учебник для вузов / С. К. Мустафаев, Л. А. Мхитарьянц, Е. П. Корнена. – СПб. : ГИОРД, 2012. – 248 с. – ISBN 978-5-98879-141-6. – URL : http://www.studmedlib.ru/book/ISBN9785988791416.html (дата обращения : 07.04. 2021).

162. ГОСТ ИСО 5507-97. Семена масличных культур. Номенклатура. – М. : Издательство стандартов, 2004. – 12 с.

163. ГОСТ 22391-2015. Подсолнечник. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2019. – 10 с.

164. ГОСТ 1129-2013. Масло подсолнечное. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2019. – 20 с.

165. ТР ТС 021/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции». – 2011. – 164 с.

166. ТР ТС 024/2011. Технический регламент на масложировую продукцию. – 2011. – 52 с.

167. *Садовичий, Г. В.* Современное масложировое производство и перспективы его развития / Г. В. Садовичий // Масложировая промышленность. – 2000. – № 1. – С. 50–51.

168. *Харченко, Г. М.* Проблемы очистки растительных масел в сельскохозяйственных предприятиях / Г. М. Харченко, В. И. Земсков // Ползуновский вестник. – 2012. – № 1. – С. 308–314.

169. Технология переработки продукции растениеводства : учебник [Электронный ресурс] / В. И. Манжесов [и др.]. – СПб. : ГИОРД, 2016. – 816 с. – ISBN 978-5-98879-185-0. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL : https://e.lanbook.com/book/91632 (дата обращения : 13.04.2021).

170. *Погосян, А. М.* К вопросу повышения качества очистки растительных масел от твёрдых примесей / А. М. Погосян // Вавиловские чтения – 2007 : матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 120-й годовщине со дня рожд. акад. Н. И. Вавилова / ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова» ; под ред. Н. И. Кузнецова. – Саратов, 2007. – Ч. 3. – С. 154–156.

171. Комплекс фильтрации растительных масел М8-КФМ : [сайт]. – URL : https://маслопрессзавод.рф/work/комплекс-фильтрации-растительных-ма-2/ (дата обращения : 07.04. 2021).

172. Фильтрация растительных масел холодного отжима: презентация компании Amafilter [Электронный ресурс]. – 2006. – 34 с. – URL : http://www.irimex.kz/files/catalog/files/r_1169_18.pdf (дата обращения : 08.04. 2021).

173. *Бергман, Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – М., 1956. – 726 с.

174. *Ольшанский, Н. А.* Применение ультразвука в сварочной технике / Н. А. Ольшанский // Тезисы докладов научного совещания по применению ультразвука в сварке. – М., 1959. – С. 32–41.

175. *Коган, М. Г.* Очистка деталей от жировых загрязнений, полировальных и притирочных паст, защитных эмалей и наклеечных смол с воздействием ультразвука / М. Г. Коган // Доклады на III Всесоюзном совещании по электрическим и ультразвуковым методам обработки. – Л. : Машгиз, 1958. – С. 32–41.

176. Интенсификация посола баранины низкими частотами ультразвука / А. В. Молчанов [и др.] // Овцы, козы, шерстяное дело. – 2018. – № 3. – С. 33–35.

177. *Горбунова, Н. А.* Альтернативные технологии – ультразвук в мясной промышленности (по материалам зарубежной литературы) / Н. А. Горбунова // Все о мясе. – 2016. – № 2. – С. 37–41.

178. Plasma Sterilizer with Ultrasonic Cavitation / V. V. Krasnyj [et al.] // Problems of Atomic Science and Technology. – 2007. – Vol. 1. – Series : Plasma Physics (13). – P. 188–190.

179. Inactivation of Microorganisms / S. M. Alzamora [et al.] // Feng H., Barbosa-Canovas G., Weiss J. (eds). Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing. Food Engineering Series. Springer, New York, 2011. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3_12.

180. *Chen, Z.* Microbial Inactivation in Foods by Ultrasound / Z. Chen // Food Microbiol Saf Hyg 2, 2017: e102. doi:10.4172/2476-2059.1000e102.

181. *Голямин, И. П.* Ультразвук : маленькая энциклопедия / И. П. Голямин. – М. : Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

182. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности [Электронный ресурс] / В. Н. Хмелев [и др.] ; Алтайский гос. техн. ун-т. – Бийск, 2010. – 203 с. – URL : https://books.google.ru/books?id=CjM-RwlqKiQC&pg=PA168&lpg=PA168&dq=pdf

183. *Сидоров, М. А.* О действии ультразвука на некоторые патогенные анаэробные и аэробные микроорганизмы : автореф. дис. … канд. вет. наук / Сидоров М. А. – М., 1964. – 24 с.

184. *Симонян, З. Г.* Влияние ультразвуковых волн на патогенные свойства стафилококков и их чувствительность к антибиотикам / З. Г. Симонян, Ц. В. Кавтарадзе // Тр. НИкожно-венерол. института МЗГССР. –1970. – Т. 13–14. – С. 381–388.

185. *Исаенко, Е. Ю.* Применение ультразвука для дезинтеграции микробных клеток / Е. Ю. Исаенко // Annals of Mechnicov Institute. – 2008. – № 1. – С. 5–9.

186. Applications of Ultrasound in Analysis, Processing and Quality Control of Food / T. S. Awada [et al.] // Food Research International. – 2012. – 48. – P. 410–427.

187. Applications of Ultrasound in Food Technology / Z. J. Dolatowski, J. Stadnik, D. Stasiak // Acta Sci. Pol., Technol. Aliment. – 2007. – 6 (3). – P. 89–99.

188. *Перельман, М. И.* Бактерицидное действие ультразвука / М. И. Перельман, В. С. Моисеев // Проблемы техники в медицине. – Таганрог, 1980. – С. 38–41.

189. *Антушева, Т. И.* Некоторые особенности влияния ультразвука на микроорганизмы [Электронный ресурс] / Т. И. Антушева // Живые и биокосные системы. – 2013. – № 4. – URL : http://www.jbks.ru/archive/issue- 4/article-11.

190. *Шапхаев, Э. Г.* Основы биотехнологии. Дезинтеграция микробных клеток / Э. Г Шапхаев, В. Ж. Цыренов, Е. И. Чебунина. – Улан-Уде, 2005. – С. 53–65.

191. *Колер, О. К.* Ультразвуковая очистка / О. К. Колер, Г. С. Кратыш, Г. Д. Лубяницкий. – СПб. : Машиностроение, 1977. – 184 с.

192. *Башкиров, В. И.* Определение производительности ультразвуковой очистки / В. И. Башкиров. – М., 1975. – С. 14–17.

193. Повышение срока годности мясо-костных бульонов электрофизическими методами обработки / А. В. Самышин [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 4. – С. 90–92.

194. *Агранат, Б. А.* Основы физики и техники ультразвука / Б. А. Агранат. – М. : Книга по Требованию, 2012. – 352 с. – ISBN 978-5-458-25309-3.

195. *Александров, В. Г.* Анатомия растений / В. Г. Александров. – М. : Высшая школа, 1966. – 431 с.

196. *Алов, И. А.* Основы функциональной морфологии клеток / И. А. Алов, А. И. Браудер, М. Е. Асниз. – М. : Медицина, 1968. – 415 с.

197. *Выродов, И. П.* Физико-химическая природа набухания зерна / И. П. Выродов // Известия Вузов. Пищевая технология. – 2001. – № 1. – С. 9–11.

198. *Аксельруд, Г. А.* Экстрагирование (система твердое тело-жидкость) / Г. А. Аксельруд, В. М. Лысянский. – Л. : Химия, 1974. – 255 с.

199. *Леопольд, А. К.* Рост и развитие растений / А. К. Леопольд ; пер. с англ. А. А. Бундель [и др.] ; под ред. и с предисл. проф. И. И. Гунара. – М. : Мир, 1968. – 494 с.

200. *Шевцов, А. А.* Зерносушение : учебное пособие [Электронный ресурс] / А. А. Шевцов, А. В. Дранников, С. В. Куцов. – Воронеж : ВГУИТ, 2011. – 80 с. – ISBN 978-5-89448-867-7. // Лань : электронно-библиотечная система. – URL : https://e.lanbook.com/book/5824 (дата обращения : 12.04.2021).

201. *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.

202. Очистка и регенерация нерафинированных растительных масел / Ф. Я. Рудик [и др.] // Известия ТСХА. – 2019. – Вып. 1. – С. 113–126.

203. Совершенствование технологии переработки сои с использованием ультразвука / Ф. Я. Рудик [и др.] // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28. – № 2. – С. 266–286.

204. *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.

205. *Кардашев, Г. А.* Физические методы интенсификации методов химической технологии / Г. А. Кардашев. – М. : Химия, 1990. – 208 с.

206. *Архангельский, М. Е.* Изменение коэффициента диффузии гетерогенной системы под действием ультразвука / М. Е. Архангельский // Акустический журнал. – 1962. – Т. 8. – С. 49–55.

207. *Гинстлинг, А. М.* Ультразвук в процессах химической технологии / А. М. Гинстлинг, А. А. Барам. – Л. : Госхимиздат, 1960. – 96 с.

208. *Кардашев, Г. А.* Тепломассообменные акустические процессы и аппараты / Г. А. Кардашев, П. Е. Михайлов. – М. : Машиностроение, 1973. – 223 с.

209. Физическая химия : учебное пособие [Электронный ресурс] / Н. В. Белоусова [и др.]. – Красноярск, 2019. – 308 с. – ISBN 978-5-7638-4052-0 // Лань : электронно-библиотечная система. – URL : https://e.lanbook.com/book/157661 (дата обращения : 12.04.2021).

210. *Скворцов, С. П.* Методы контроля параметров ультразвуковой кавитации [Электронный ресурс] / С. П. Скворцов // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2015. – № 2. – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/metody-kontrolya-parametrov-ultrazvukovoy-kavitatsii (дата обращения : 13.04.2021).

211. *Эльпинер, И. Е.* Биофизика ультразвука / И. Е. Эльпинер. – М. : Наука, 1973. – 384 с.

212. *Фомин, В. А.* Исследование процесса ультразвуковой очистки деталей / В. А. Фомин, А. Ю. Попов, А. А. Кульков. – М., 2009. – 19 с.

213. *Хорбенко, И. Г.* Звук, ультразвук, инфразвук / И. Г. Хорбенко. – М. : Знание, 1986. – 192 с.

214. *Смотраева, И. В.* Применение ультразвука при переработке растительного сырья [Электронный ресурс] / И. В. Смотраева, П. Е. Баланов, Н. А. Третьяков // Механизация и электрификация. – 2012. – № 559. – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-ultrazvuka-pri-pererabotke-rastitelnogo-syrya/viewer (дата обращения : 05.04.2021).

215. *Метелица, Д. И.* Инактивация и стабилизация ферментов в поле ультразвуковой кавитации [Электронный ресурс] / Д. И. Метелица, А. Н. Ерёмин, М. В. Потапович // Труды БГУ. – Минск, 2013. – Т. 8. Ч. 1. – С. 20–24. – URL : http://elib.bsu.by/bitstream/123456789/103523/1/2013-8-1-20-44.pdf (дата обращения : 08.04.2021).

216. *Кононова, А. А.* Уравнения математической физики : учебное пособие [Электронный ресурс] / А. А. Кононова, А. Л. Белкова. – СПб. : БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, 2019. – 74 с. // Лань : электронно-библиотечная система. – URL : https://e.lanbook.com/book/157063 (дата обращения: 04.05.2021).

217. *Кельцев, Н. В.* Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев. – М. : Химия, 1984. – 592 с.

218. *Кавецкий, К. Д.* Процессы и аппараты пищевых производств / К. Д. Кавецкий, Б. В. Васильев. – М. : Колос, 1997. – 551 с.

219. *Бранауер, С.* Адсорбция газов и паров : пер. с англ. / С. Бранауер. – М., 1948. – 563 с.

220. Бур, Я. де. Динамический характер адсорбции / Я. де Бур ; пер. с англ. канд. хим. наук А. А. Лопаткина [и др.] ; под ред. канд. хим. наук В. М. Грязнова. – М. : Изд-во иностр. лит., 1962. – 290 с.

221. Адсорбция и пористость / под ред. М. М. Дубинина, В. В. Серпинского. – М., 1976. – 357 с.

222. Машины и аппараты пищевых производств / С. Т. Антипов [и др.] ; под ред. В. А. Панфилова. – М. : Высшая школа, 2001. – 703 с.

223. *Глинка, Н. Л.* Общая химия / Н. Л. Глинка. – 24-е изд. – Л. : Химия, 1985. – 702 с.

224. *Грег, С.* Адсорбция, удельная поверхность, пористость / С. Грег, К. Синг. – М. : Мир, 1984. – 310 с.

225. *Алексеев, В. Н.* Количественный анализ / В. Н. Алексеев ; под ред. д-ра хим. наук П. К. Агасяна. – 4-е изд., перераб. – М. : Химия, 1972. – 504 с.

226. *Возная, Н. Ф.* Химия воды и микробиология : учебное пособие для вузов / Н. Ф. Возная. – М. : Высшая школа, 1979. – 340 с.

227. Закономерность распределения акустических колебаний в среде растительного масла при его очистке / Ф. Я. Рудик [и др.] // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2013. – № 8. – С. 75–77.

228. Пат. 2473674 Российская Федерация, С1 МПК С 11 В 3/00, С 11 В 3/10. Способ очистки фритюрного жира / Рудик Ф. Я., Богатырев С. А., Симакова И. В., Скрябина Л. Ю., Тулиева М. С., Богачев Б. В. ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – № 2011131328/13 ; заявл. 26.07.2011 ; опубл. 27.01.2013, Бюл. № 3. – 7 с.

229. Пат. 2677031 Российская Федерация, С1 МПК С 11 В 1/06. Способ производства растительных масел / Рудик Ф. Я., Моргунова Н. Л., Севостьянова И. О. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – № 2017146289 ; заявл. 27.02.2017 ; опубл.15.01.2019, Бюл. № 2. – 6 с.

230. *Варсонафьев, В. Д.* Вибрационная техника в химической промышленности / В. Д. Варсонафьев, Э. Э. Кольман-Иванов. – М. : Химия, 1985. – 240 с.

231. *Городецкий, И. Я.* Вибрационные массообменные аппараты / И. Я. Городецкий. – М. : Химия, 1980. – 192 с.

232. *Быковский, И. И.* Основы теории вибрационной техники / И. И. Быковкий. – М. : Машиностроение, 1968. – 362 с.

233. *Пановко, Я. Г.* Введение в теорию механических колебаний : 2-е изд. / Я. Г. Пановко. – М. : Наука, 1980. – 321 с.

234. *Вольмир, А. С.* Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – М. : Наука, 1984. – 984 с.

235. *Алфутов, Н. А.* Основы расчета на устойчивость упругих систем / Н. А. Алфутов. – М. : Машиностроение, 1978. – 312 с.

236. *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.

237. *Бидерман, В. Л.* Теория механических колебаний : учебник для вузов / В. Л. Бидерман. – М. : Высшая школа, 1980. – 408 с.

238. Процессы и аппараты пищевой технологии : учебное пособие [Электронный ресурс] / С. А. Бредихин [и др.] ; под ред. С. А. Бредихина. – СПб. : Лань, 2014. – 544 с. – ISBN 978-5-8114-1635-6 // Лань : электронно-библиотечная система. – URL : https://e.lanbook.com/book/50164 (дата обращения : 13.04.2021).

239. *Агапов, А. П.* Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости пространственных тонкостенных подкрепленных конструкций : учебное пособие / А. П. Агапов. – М., 2000. – 152 с.

240. *Биргер, И. А.* Расчет на прочность деталей машин : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М. : Машиностроение, 1979. – 702 с.

241. ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – М. : Стандартинформ, 2007. – 6 с.

242. ГОСТ 10847-74. Зерно. Методы определения зольности. – М. : Стандартинформ, 2009. – 5 с.

243. ГОСТ 13586.5-93. Зерно. Метод определения влажности. – М. : Стандартинформ, 2009. – 9 с.

244. ГОСТ Р 54478-2011. Зерно. Методы определения количества и качества клейковины в пшенице. – М. : Стандартинформ, 2012. – 24 с.

245. ГОСТ 22162-76. Зерно. Метод определения микротвердости. – М. : Стандартинформ, 1980. – 4 с.

246. ГОСТ 10846-91. Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка. – М. : Стандартинформ, 2009. – 7 с.

247. ГОСТ Р 51278-99 (ИСО 7698-90). Зерновые, бобовые и продукты их переработки. Определение количества бактерий, дрожжевых и плесневых грибов. – М. : Стандартинформ, 2002. – 8 с.

248. ГОСТ 34165-2017. Зерновые, зернобобовые и продукты их переработки. Методы определения загрязненности насекомыми-вредителями. – М. : Стандартинформ, 2017. – 12 с.

249. ГОСТ Р 52110-2003. Масла растительные. Методы определения кислотного числа. – М. : Стандартинформ, 2007. – 8 с.

250. ГОСТ 5481-89. Масла растительные. Методы определения нежирных примесей и отстоя. – М. : Стандартинформ, 2019. – 12 с.

251. ГОСТ 5477-2015. Масла растительные. Методы определения цветности. – М. : Стандартинформ, 2019. – 6 с.

252. МУ 3184-84. Методические указания по обнаружению, идентификации и определению содержания Т-2 токсина в пищевых продуктах и продовольственном сырье. – М., 1984. – 12 с.

253. ГОСТ 28001-88. Зерно фуражное, продукты его переработки, комбикорма. Методы определения микотоксинов: Т-2 токсина, зеараленона (Ф-2) и охратоксина А. – URL : https://allgosts.ru/65/120/gost_28001-88.

254. Пат. 2621020 Российская Федерация, C1 МПК B 02 B 1/08. Способ оценки степени загрязненности поверхности зерна / Рудик Ф. Я., Богатырев С. А., Морозов А. А., Скрябина Л. Ю., Рихель С. Г. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова». – № 2016109146 ; заявл. 2016.03.14 ; опубл. 30.05.2017. – 6 с.

255. *Ермаков, А. И.* Методы биохимического исследования растений / А. И. Ермаков, А. В. Арасимович, Н. П. Ярош. – Л. : Агропромиздат, 1987. – 430 с.

256. Пат. 2249205 Российская Федерация, C2 МПК G 01 N 33/03. Способ количественного определения токоферолов в растительных маслах / Великов А. А., Сизова Н. В. ; заявитель и патентообладатель ИХН СО РАН. – № 2003116887/13 ; заявл. 05.06.2003 ; опубл. 27.03.2005. – 5 с.

257. ГОСТ 30417-2018. Масла растительные. Методы определения массовых долей витаминов А и Е. – М. : Стандартинформ, 2018. – 12 с.

258. Пат. 2221646 Российская Федерация, C2 МПК B 02 B 1/04. Способ гидротермической обработки зерна перед помолом / Соловьева Ж. П., Чеботарев О. Н. ; заявитель и патентообладатель Кубанский государственный технологический университет. – № 2000133141/13 ; заявл. 28.12.2000 ; опубл. 27.12.2002. – 5 с.

259. Пат. 42768 Российская Федерация, U1 МПК B 02 B 1/08. Устройство для кондиционирования зерна / Кофейникова Е. В., Черепанов В. Г. ; заявители и патентообладатели Е. В. Кофейникова, В. Г. Черепанов. – № 2004106930/22 ; заявл. 09.03.2004 ; опубл. 20.12.2004. – 18 с.

260. Пат. 2220001 Российская Федерация, C2 МПК B 02 B 1/04, B 02 B 1/08. Способ подготовки зерна к помолу / Бурау В. А. ; заявитель и патентообладатель ОАО «Рыбинский комбинат хлебопродуктов». – № 2002104146/13 ; заявл. 14.02.2001 ; опубл. 27.12.2003. – 6 с.

261. *Наумов, И. А.* Совершенствование кондиционирования и измельчения пшеницы и ржи / И. А. Наумов. – М. : Колос, 1975. – 312 с.

262. Пат. 2405629 Российская Федерация, С1 МПК В 02 В 1/04, В 02 В 1/08. Способ обработки зерна при его подготовке к помолу / Рудик Ф. Я., Русин В. И., Ребров В. Г., Савельев И. Ф. ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова». – № 2009114059/13 ; заявл. 13.04.2009 ; опубл. 10.12.2010. – 6 с.

263. *Рудик, Ф. Я.* Методика определения загрязнений зерна исследованием состояния микроплощадей / Ф. Я. Рудик, Н. Л. Моргунова, И. Ф. Савельев // Технология и продукты здорового питания : материалы VII Международной практической конференции / под ред. Ф. Я. Рудика. – Саратов : Буква, 2013. – С. 107–109.

264. *Егоров, Г.А.* Технологические свойства зерна / Г. А. Егоров. – М. : Агропромиздат, 1985. – 334 с.

265. *Берестнев, Е. В* Рекомендации по организации и ведению технологического процесса на мукомольных предприятиях / Е. В. Берестнев, В. Е. Петриченко, В. В. Петриченко. – 2-е изд., доп. – М. : ТД ДеЛи, 2020. – 368 с.

266. Improvement of Grain Processing via Ultrasonic Treatment / F. Ya. Rudik [et al.] // Conference on Innovations in Agricultural and Rural development IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science 341 (2019) 012117 IOP Publishing. – URL : https://www.researchgate.net/publication/337288785_Improvement_of_grain_processing_via_ultrasonic_treatment.

267. Пат. 2707130 Российская Федерация, С1 МПК А 0 1F 25/00. Способ профилактической обработки зерна / Моргунова Н. Л., Рудик Ф. Я., Красникова Е. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова». – № 2019108524 ; заявл. 25.03.2019. ; опубл. 22.11.2019. – 7 с.

268. *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). – URL :

https://www.researchgate.net/publication/338433664_Decontamination_of_grain_by_ultrasound.

269. *Haihua, Zh.* The Effect of Ultrasound on the Functional Properties of Wheat Gluten / Zh. Haihua, P. Irakoze, Claver, Ke-Xue Zhu and Huiming Zho // Molecules 2011, 16, 4231-4240 ; doi :10.3390/molecules16054231: – URL : https://www.researchgate.net/publication/267789451_The_Effect_of_Ultrasound_on_the_Functional_Properties_of_Wheat_Gluten.

270. Технология и средство механизации для обработки зерна / Ф. Я. Рудик [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2020. – № 1. – С. 137–147.

271. Technology for Reducing Urease Activity in Soybeans / F.Ya. Rudik [et al.] // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020. P. 62005.

272. Technologies and Technical Means of Soybean Processing / F. Ya. Rudik [et al.] // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science, Volume 640, International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials 26–29 February 2020, Voronezh, Russian Federation Citation N. L. Morgunova et al 2021 IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci. 640 022059.

273. ГОСТ 27149-95. Жмых соевый кормовой. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2002. – 8 с.

274. ГОСТ Р 53799-2010. Шрот соевый кормовой тостированный. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2020. – 8 с.

275. *Руис, Н.* Активность уреазы в соевом шроте. Новый взгляд / Н. Руис // Комбикорма. – 2013. – № 10. – С. 59–61.

276. Патент № 130519 Российская Федерация, U1 МПК B 02 B 1/04. Устройство для обработки зерна / Рудик Ф. Я., Моргунова Н. Л., Кодацкий Ю. А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова». – № 2013112532/13 ; заявл. 20.03.2013 ; опубл. 27.07.2013. – 11 с.

277. МУ 3184-84. Методические указания по обнаружению, идентификации и определению содержания Т-2 токсина в пищевых продуктах и продовольственном сырье. – М. : Министерство Здравоохранения СССР, 1984. – 10 с.

278. Свидетельство № 29-08 от 04.03.2008. ФР.1.31.2008.04629. Методика выполнения измерений массовой доли афлатоксинов B1, B2, G1 и G2 в пищевых продуктах методом высокоэффективной жидкостной хроматографии.

279. ГОСТ Р 52839-2007. Корма. Методы определения содержания сырой клетчатки с применением промежуточной фильтрации. – М. : Стандартинформ, 2011. – 10 с.

280. ГОСТ 26593–85. Масла растительные. Метод измерения перекисного числа. – М. : Стандартинформ, 2001. – 7 с.

281. *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.

282. *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.

283. Ультразвуковая обработка зерна при подготовке к помолу / Ф. Я. Рудик [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2016. – № 2. – С. 53–56.

284. *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.

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

286. Технология и технические средства для переработки сои / Ф. Я. Рудик [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 3. – С. 91–95.

287. Обоснование технических параметров ультразвуковой установки для повышения эффективности посола мяса // Е. С. Красникова [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 7. – С. 75–77.

288. Physical and Chemical Effects of Ultrasonic Cavitation on the Grain of Meat When Lamb Salting / E. S. Krasnikova [et al.] // Journal of Physics : Conference Series. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. – P. 22001.0.

289. The Use of Ultrasound for Development of Baker's Yeast Activation Technology / E. S. Krasnikova [et al.] // Journal of Physics : Conference Series. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. – P. 22002.0.

290. *Жабборова, Д. Р.* Влияние гидротермической обработки на биохимические свойства зерна пшеницы [Электронный ресурс] / Д. Р. Жабборова, К. Х. Мажидов, Н. Ф. Хужақулова // Universum : технические науки. – 2020. – № 7–2 (76). – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-gidrotermicheskoy-obrabotki-na-biohimicheskie-svoystva-zerna-pshenitsy.

291. *Райзберг, Б. А.* Курс экономики : учебник / Б. А. Райзберг. – 3-е изд., доп. – М. : ИНФРА-М, 2001. – 716 с.

292. *Васильев, Г. А.* Технико-экономические расчеты новой техники / Г. А. Васильев. – М. : Машиностроение, 1977. – 276 с.

293. *Волков, О. И.* Экономика предприятия / О. И. Волков, В. К. Скляренко. – М. : ИНФРА-М, 1978. – 325 с.

294. *Краюхин, Г. А.* Экономическая эффективность изобретений и рационализаторских предложений / Г. А. Краюхин. – Л. : Лениздат, 1983. – 129 с.

295. *Драгайцев, В. И.* Методика экономической оценки технологий и машин в сельском хозяйстве / В. И. Драгайцев // АПК : экономика, управление. – 2010. – № 11. – С. 100–106).

296. Intensification of Lamb Salting Process with Low Frequency Ultrasound / E. S. Krasnikova [et al.] // IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science 845 (2021) 012075 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/845/1/012075.

297. Development of Technology for Cooked Smoked Lamb Products Using Ultrasonic Treatment / E. S. Krasnikova [et al.] // IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science 845 (2021) 012085 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/845/1/012085.

298. *Будишевский, В. А.* Расчет и проектирование транспортных средств непрерывного действия / В. А. Будишевский. – Донецк : Норд-Пресс, 2005. – 689 с.

299. Физико-механические, физико-химические свойства сырья и готовых продуктов пищевой промышленности : справочные материалы. – Новочеркаск : ЮРГТУ, 2012. – 28 с.

300. Ромакин, Н. Е. Машины непрерывного транспорта / Н. Е. Ромакин. – М. : Академия, 2008. – 432 с.

301. *Остриков, А. Н.* Расчет и конструирование машин и аппаратов пищевых производств / А. Н. Остриков. – СПб. : ГИОРД, 2003. – 352 с.

302. *Дьячков, В. К.* Машины непрерывного транспорта / В. К. Дьячков. – М. : Машгиз, 1961. – 352 с.

303. *Кодацкий, Ю. А.* Повышение эффективности технологии переработки семян сои с использованием ультразвука : автореферат дис. ... канд. с.-х. наук : 05.18.01 / Кодацкий Юрий Анатольевич. – Кинель, 2013. – 17 с.

304. *Семилет, Н. А.* Повышение эффективности подготовки зерна к помолу влажной обработкой с ультразвуковой интенсификацией процесса : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Семилет Никита Александрович. – Саратов, 2017. – 20 с.

305. *Тулиева, М. С.* Совершенствование процесса фильтрования подсолнечного масла на основе применения виброакустического воздействия : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 / Тулиева Мадина Суенчкалиевна. – Саратов, 2017. – 18 с.

306. *Ландау, Л. Д.* Механика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Гостехтеориздат, 1954. – 788 с.

307. *Кишиневский, М. Х.* Экспериментальное исследование закона затухания турбулентных пульсаций у твердой стенки / М. Х. Кишиневский, Т. С. Корниенко, В. А. Парменов // ТОХТ. – 1970. – Т. 4. – № 4. – 495 с.

308. ГОСТ 2.114-95. Единая система конструкторской документации. Основные положения. – М. : Стандартинформ, 2011. – 8 с.

309. ГОСТ 2.102-68. Единая система конструкторской документации. Основные положения. – М. : Стандартинформ, 2011. – 7 с.

310. ГОСТ 2.001-2013. Единая система конструкторской документации. Основные положения. – М. : Стандартинформ, 2013. – 5 с.

311. ГОСТ Р 54783-2011. Испытания сельскохозяйственной техники. Основные положения. – М. : Стандартинформ, 2011. – 4 с.

312. ГОСТ 26574-2017. Мука пшеничная хлебопекарная. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2018. – 5 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

VIII САРАТОВСКИЙ САЛОН ИЗОБРЕТЕНИЙ, ИННОВАЦИЙ И ИНВЕСТИЦИЙ

ДИПЛОМ

III степени

Бронзовая медаль

присуждается за проект

Совершенствование технологии очистки и отволаживания зерна пшеницы

Авторы проекта

Рудик Ф.Я., Моргунова Н.Л., Савельев И.Ф.
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова»

Министр промышленности и энергетики Саратовской области С.М. ЛИСОВСКИЙ

Ректор Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова Н.И. КУЗНЕЦОВ

Окончание прил. А

ЗОЛОТАЯ ОСЕНЬ 2022

XXIV ВСЕРОССИЙСКАЯ АГРОПРОМЫШЛЕННАЯ ВЫСТАВКА

ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ

БРОНЗОВОЙ МЕДАЛЬЮ

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова»,

г. Саратов

За разработку технологии ультразвуковой обработки зерновых и зернобобовых кормов

МИНИСТР СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Д.Н. ПАТРУШЕВ

Приложение Б

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 130519

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА

Патентообладатель(ли): ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова" (RU)***

Автор(ы): ***см. на обороте***

Заявка № **2013112532**

Приоритет полезной модели **20 марта 2013 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации ***27 июля 2013 г.***

Срок действия патента истекает **20 марта 2023 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

Приложение В

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2707130

Способ профилактической обработки зерна

Патентообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова" (RU)***

Авторы: ***Моргунова Наталья Львовна (RU), Рудик Феликс Яковлевич (RU), Красникова Екатерина Сергеевна (RU)***

Заявка № **2019108524**
Приоритет изобретения **25 марта 2019 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **22 ноября 2019 г.**
Срок действия исключительного права на изобретение истекает **25 марта 2039 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Приложение Г

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2677031

Способ производства растительных масел

Патентообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова" (RU)***

Авторы: ***Рудик Феликс Яковлевич (RU), Моргунова Наталья Львовна (RU), Севостьянова Инна Олеговна (RU)***

Заявка № **2017146289**
Приоритет изобретения **27 декабря 2017 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **15 января 2019 г.**
Срок действия исключительного права на изобретение истекает **27 декабря 2037 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Приложение Д

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 208531

Устройство для обработки зерна, пивного солода, семян масличных культур

Патентообладатели: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова" (RU), общество с ограниченной ответственностью "Химмаш-Старт" (RU)***

Авторы: ***Макаров Денис Вячеславович (RU), Сундуков Евгений Александрович (RU), Рудик Феликс Яковлевич (RU), Моргунова Наталья Львовна (RU)***

Заявка № **2021109239**
Приоритет полезной модели **05 апреля 2021 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **23 декабря 2021 г.**
Срок действия исключительного права на полезную модель истекает **05 апреля 2031 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат [illegible]
Владелец **Иванов Григорий Петрович**
Действителен с [illegible] по 15.01.2026

Г.П. Иванов

Приложение Е

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 218182

УСТАНОВКА ДЛЯ ОЧИСТКИ ПИЩЕВЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ

Патентообладатели: ***Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования "Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова" (RU), Общество с ограниченной ответственностью "Химмаш - Старт" (RU)***

Авторы: ***Моргунова Наталья Львовна (RU), Рудик Феликс Яковлевич (RU), Макаров Денис Вячеславович (RU), Сундуков Евгений Александрович (RU), Богатырев Сергей Аркадьевич (RU), Киселева Ирина Сергеевна (RU)***

Заявка № **2022133111**

Приоритет полезной модели **15 декабря 2022 г.**

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **15 мая 2023 г.**

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает **15 декабря 2032 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат [illegible]4edbd24345d5c7
Владелец Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с [illegible] по 26.05.2025

Ю.С. Зубов

Приложение Ж

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 223297

Многофункциональное шнековое устройство для обработки зерновых и зернобобовых культур

Патентообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова" (RU)***

Авторы: ***Рудик Феликс Яковлевич (RU), Моргунова Наталья Львовна (RU), Макаров Денис Вячеславович (RU), Сундуков Евгений Александрович (RU), Богатырев Сергей Аркадьевич (RU), Марадудин Алексей Максимович (RU)***

Заявка № **2023134013**
Приоритет полезной модели **20 декабря 2023 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **13 февраля 2024 г.**
Срок действия исключительного права на полезную модель истекает **20 декабря 2033 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0fe3853164baf96f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

Приложение 3

ФБГНУ «Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации»

Утверждаю:
Зам. директора по науке
ФБГНУ «ВолжНИИГиМ»
_____ В. А. Шадских
«5» 09 2013 г.

Акт внедрения результатов законченных научных исследований

Комиссия в составе научных сотрудников ФБГНУ «ВолжНИИГиМ» и представителей ФГБОУ «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова»:

- Пешковой В. О. — зав. отделом комплексной мелиорации и экологии,
- Рассказовой О. В. — ученого секретаря,
- Моргуновой Н. Л. — к. т. н., доцента,
- Кодацкого Ю. А. — аспиранта

согласно плану проведения научно-исследовательских мероприятий, «Повышение эффективности переработки зерна сои за счет использования ультразвука» осуществлена низкотемпературная обработка партии зерна сои с целью проверки повышения его пищевой ценности путем подавления ингибиторов, связывающих пищеварительные ферменты и препятствующих усвоению белка.

На основании проведенных испытаний комиссия считает, что:

- количество активного ингибитора в обработанном зерне снижается на величину порядка 80%, благодаря чему кардинальным образом облегчается процесс усвоения содержащегося в сырье белка;
- белок соевого зерна сохраняет высокую питательную ценность и способность к естественному растворению, что повышает степень его переваримости и общую эффективность;

Окончание прил. 3

- максимальная экстракция ингибиторов в соответствии с предложенным технологическим режимом достигается в течение 20 минут обработки;

- простота и достаточная расчетная производительность свидетельствует о перспективности предлагаемой технологии и оборудования и возможности их использования на предприятиях пищевой промышленности.

Результаты испытаний и характеристика внедряемой установки

Показатель	**Значение**	**Показатель**	**Значение**
Повышение кормовой ценности, %	60	Снижение активности уреазы, %	90
Производительность, кг/ч	150	Частота вращения мешалки, $мин^{-1}$	10
Потребление электроэнергии, кВт/ч	4,25	Частота УЗ излучения, Гц	18
Расход воды, $м^3/ч$	0,63	Количество излучателей УЗ, шт.	2
Вместимость установки, $м^3$	0,21	Мощность излучателя УЗ, кВт	1,6
Длительность условного рабочего цикла, ч	0,33	Габаритные размеры установки, мм	520х520х 1000

Председатель комиссии

Члены комиссии

Пешкова В. О.

Рассказова О. В.

Моргунова Н. Л.

Кодацкий Ю. А.

Приложение И

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
по развитию ООО "Химмаш-Старт"

К.Н. Лысенко

"15" января 2021 г.

А К Т

рассмотрения и приемки опытно-конструкторской документации ультразвуковой установки для обработки зерновых и зернобобовых культур

На основании договора о научно-техническом сотрудничестве ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ и ООО «Химмаш-Старт», г. Пенза «Разработка конструкторской документации и изготовление опытно-промышленных образцов установок для обработки зерновых, зернобобовых культур и очистки нерафинированных растительных масел от продуктов окисления при производстве и хранении» по совместным инновационным разработкам комиссии в составе:

Представители разработчиков от ФГБО ВО Саратовский ГАУ:

1. Рудик Феликс Яковлевич, д.т.н., профессор кафедры «Технологии продуктов питания»;

2. Моргунова Наталья Львовна, к.с.х.н., доцент кафедры «Технологии продуктов питания»;

3. Макаров Денис Вячеславович, магистрант кафедры Технологии продуктов питания».

Представители ОАО НПП «Химмаш-Старт», г. Пенза:

1. Жмуркин Сергей Михайлович, начальник конструкторско-технологического комплекса – главный конструктор;

2. Теплов Вадим Викторович, руководитель конструкторской группы №1;

3. Епишин Игорь Георгиевич, к.т.н., главный научный сотрудник.

Окончание прил. И

Комиссия рассмотрела комплект конструкторской документации на ультразвуковую установку для обработки зерновых и зернобобовых культур, рассмотрев поставленные цели на проектирование:

– установка должна быть непрерывного действия, с автоматической загрузкой и выгрузкой обрабатываемого материала;

– установка должна проектироваться на основе шнекового подающего механизма суспензии из зерна (50 %) и воды (50%);

– шнековый механизм с винтовым шнеком должны обеспечивать продвижения суспензии в зоне озвучивания и отжима;

– длина транспортирующей части шнека в зоне обработки суспензии ультразвуковыми излучателями должна обеспечивать одноминутное нахождение суспензии в зоне обработки. Время прохождения суспензии должно обеспечиваться шагом винта шнека и регулируемой частотой вращения шнека;

– ультразвуковые возбудители должны устанавливать на трубе шнекового механизма в начале и в конце емкости озвучивания под встречными углами с условием максимального охвата ультразвуковыми колебательными движениями перемещаемого объема суспензии;

– в установке должны быть предусмотрены устройства для поддержания температурного режима (+40°С), автоматической подпитки воды, сжатия суспензии для выжимки излишков воды и выгрузки обработанного зерна;

решила, что принятые конструктивные решения в рассмотренном полном комплекте конструкторской документации полностью соответствуют предпроектному техническому заданию и считает целесообразным приступить к изготовлению опытно-конструкторского образца ультразвуковой установки для обработки зерновых и зернобобовых культур.

Подписи сторон:

от ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ	от ООО «Химмаш-Старт»
Рудик Ф.Я.	Жмуркин С.М.
Моргунова Н.Л.	Теплов В.В.
Макаров Д.В.	Епишин И.Г.

Приложение К

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
по развитию ООО "Химмаш-Старт"

К.Н. Лысенко

"15" января 2021 г.

А К Т

рассмотрения и приемки опытно-конструкторской документации ультразвуковой установки для очистки и регенерации нерафинированных растительных масел от продуктов окисления при производстве и хранении

На основании договора о научно-техническом сотрудничестве ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ и ООО «Химмаш-Старт», г. Пенза «Разработка конструкторской документации и изготовление опытно-промышленных образцов установок для обработки зерновых, зернобобовых культур и очистки нерафинированных растительных масел от продуктов окисления при производстве и хранении» по совместным инновационным разработкам комиссии в составе:

Представители разработчиков от ФГБО ВО Саратовский ГАУ:

1. Рудик Феликс Яковлевич, д.т.н., профессор кафедры «Технологии продуктов питания»;

2. Моргунова Наталья Львовна, к.с.х.н., доцент кафедры «Технологии продуктов питания»;

3. Сундуков Евгений Александрович, магистрант кафедры Технологии продуктов питания».

Представители ООО «Химмаш-Старт», г. Пенза:

1. Жмуркин Сергей Михайлович, начальник конструкторско-технологического комплекса – главный конструктор;

2. Теплов Вадим Викторович, руководитель конструкторской группы №1;

3. Епишин Игорь Георгиевич, к.т.н., главный научный сотрудник.

Окончание прил. К

Комиссия рассмотрела комплект конструкторской документации на ультразвуковую установку для очистки и регенерации нерафинированных растительных масел от продуктов окисления при производстве и хранении, рассмотрев поставленные цели на проектирование:

– установка должна быть непрерывного действия с автоматической загрузкой и выгрузкой обрабатываемого материала;

– емкость установки должна быть цилиндрического типа для устранения возможности образования «мертвых зон», разовая заполняемость емкости 100 литров масла;

– картридж с заполняемым минеральным сорбентом должен составлять 10 % емкости установки;

– необходимо предусмотреть схему картриджа для замены сорбента и обеспечить высокую герметичность привалочной плоскости;

– верхняя поверхность картриджа должна быть выполнена под углом 8—10° для обеспечения направленного скатывания продуктов фильтрации в емкость сборника загрязнений;

– обрабатываемое масло должно перемешиваться в окружном направлении, частота перемешивания незначительная – порядка 10 мин$^{-1}$;

– ультразвуковые возбудители устанавливаются в верхней и нижней части емкости под встречными углами во взаимно противоположенном направлении с условием максимального охвата ультразвуковыми колебательными движениями́ очищаемого масла;

– слив очищенного масла должен осуществляться краном, установленным в донной части емкости;

решила, что принятые конструктивные решения в рассмотренном полном комплекте конструкторской документации полностью соответствуют предпроектному техническому заданию и считает целесообразным приступить к изготовлению опытно-конструкторского образца ультразвуковой установки для очистки и регенерации нерафинированных растительных масел от продуктов окисления при производстве и хранении.

Подписи сторон:

от ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ	от ООО «Химмаш-Старт»
Рудик Ф.Я.	Жмуркин С.М.
Моргунова Н.Л.	Теплов В.В.
Сундуков Е.А	Епишин И.Г.

Приложение Л

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
по развитию ООО «Химмаш-Старт»

К.Н. Лысенко

«02» февраля 2022 г.

А К Т
производственных испытаний установки для ультразвуковой обработки зерновых и зернобобовых культур

Комиссия в составе представителей разработчиков ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ:

1. Рудика Феликса Яковлевича, д.т.н., профессора кафедры «Технологии продуктов питания»;

2. Моргуновой Натальи Львовны, к.с.х.н., доцента кафедры «Технологии продуктов питания»;

3. Макарова Дениса Вячеславовича, аспиранта кафедры «Технологии продуктов питания»

и представителей ООО «Химмаш-Старт» г. Пенза:

1. Жмуркина Сергея Михайловича, начальника конструкторско-технологического комплекса;

2. Теплова Вадима Викторовича, руководителя конструкторской группы № 1;

3. Епишина Игоря Георгиевича, к.т.н., главного научного сотрудника,

действуя на основании договора о сотрудничестве «Разработка конструкторской документации и изготовление опытно-промышленных образцов установок для обработки зерновых, зернобобовых культур и очистки нерафинированных растительных масел от продуктов окисления при производстве и хранении» и акта от 15.01.2021 о приемке опытно-конструкторской документации ультразвуковой установки для обработки зерновых и зернобобовых культур провела испытания изготовленной на производственных площадях ООО «Химмаш-Старт» установки для инактивации зерна сои на предмет ее соответствия установленным требованиям.

Проверка и испытания осуществлялись:

– на соответствие конструкторской документации;

– на соответствие установленным параметрическим и функциональным требованиям.

1 Проверка на соответствие конструкторской документации

Конструкция шнековой установки, состоящей из шнекового механизма, расположенного на едином валу, состоит из (рисунки 1, 2):

– приводной станции I, состоящей из мотор-редуктора марки МПЧ-80М-80-18,8, передаточной муфты и системы уплотнения, позиция А, рисунок 1, обеспечивающей защиту подшипников качения от протекания и попадания жидкости со следующих рабочих зон;

– обрабатываемый материал из бункера 1 по трубопроводу загружается в зону II, где осуществляется образование водно-зерновой суспензии, продвижение которой осуществляется винтовым механизмом шнека 2;

– основная ультразвуковая обработка материала осуществляется по времени его продвижения в зоне III с проемом в верхней поверхности для ультразвуковой колебательной системы УЗТЛ в металлическом корпусе с принудительной системой охлаждения 3. Время продвижения обрабатываемой суспензии обеспечивается регулируемой частотой вращения шнека;

Продолжение прил. Л

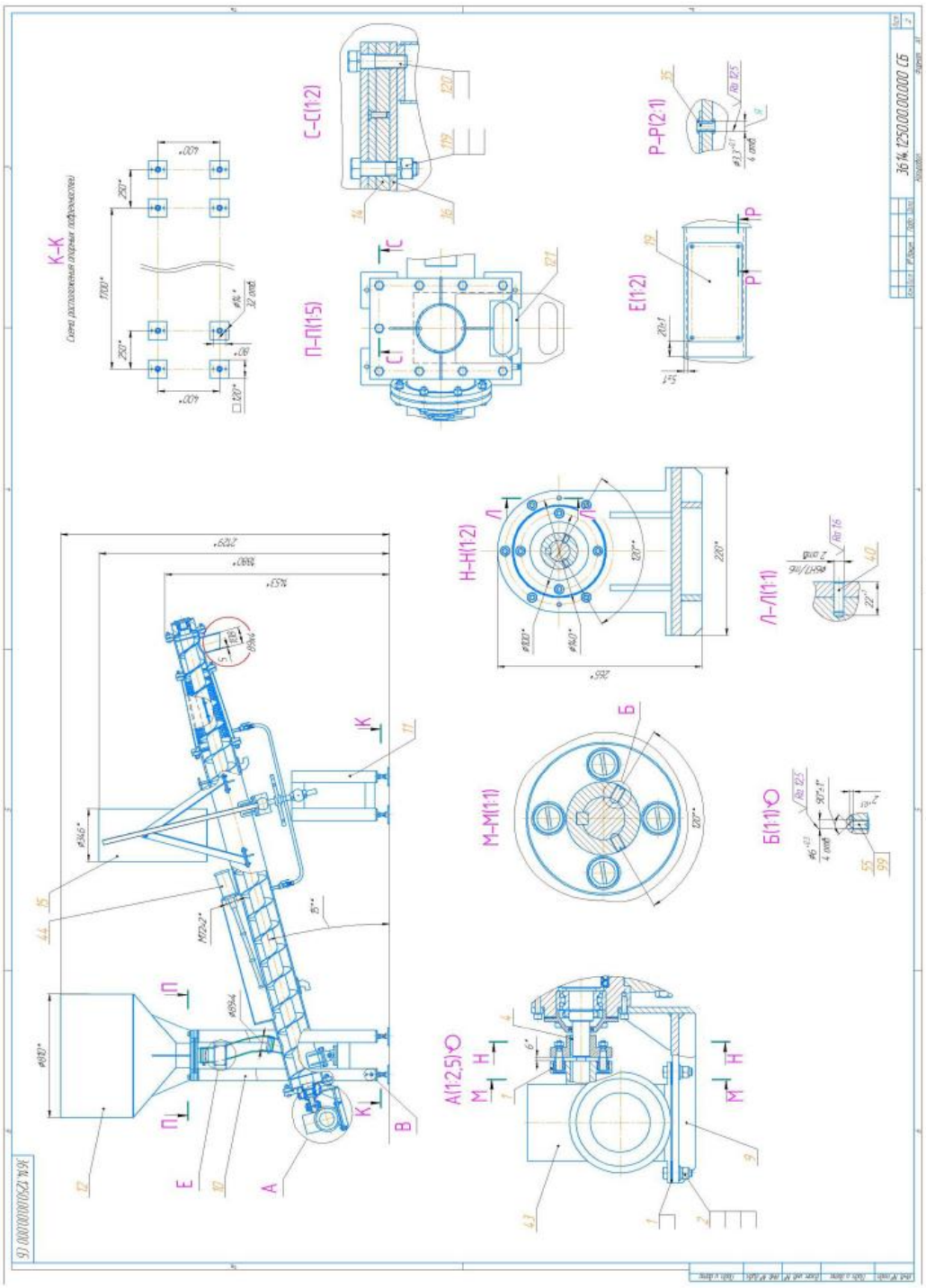


Рисунок 1 Установка для ультразвуковой обработки продукции растениеводства

Продолжение прил. Л

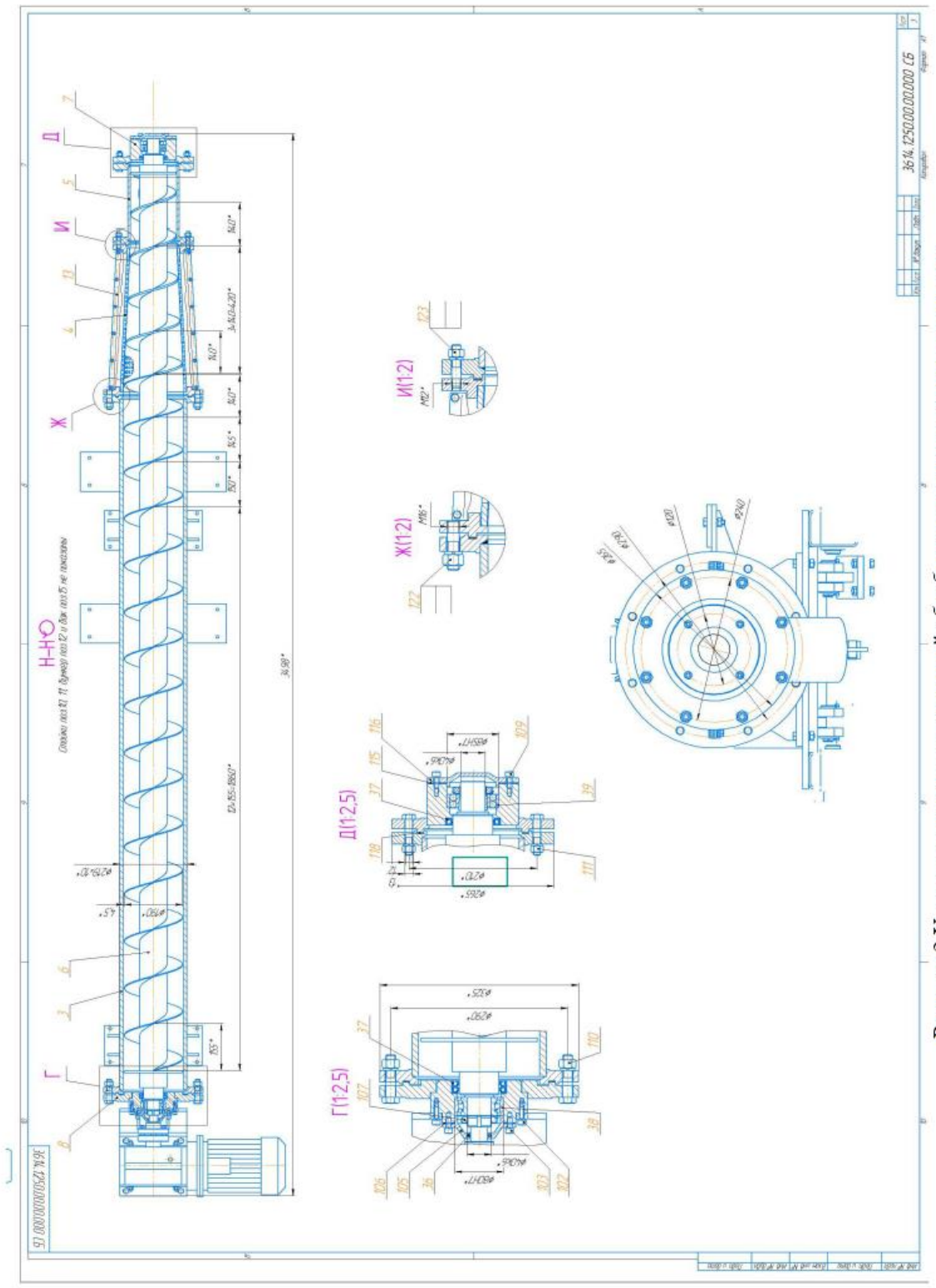


Рисунок 2 Установка для ультразвуковой обработки продукции растениеводства

– подпитка жидкости в рабочей зоне осуществляется из емкости поплавкового типа 4;

– излишки воды, поступающие по мере продвижения обрабатываемого материала в зону IV сливаются за счет наклона шнекового механизма 5, за счет чего протекает стадия предварительного отжима;

– окончательный отжим обрабатываемого материала от излишков воды осуществляется в камере отжима V за счет изменения градиента давления на входе и выходе из конической камеры и сдавливания обрабатываемого материала. Высвобожденная вода поступает снова в рабочую зону, тем самым осуществляется экономия потребляемой воды;

– в зоне VI установки осуществляется выход отжатой до 82,8% влажности готовой продукции.

Решение о соответствии:

Опытно-промышленный образец установки для ультразвуковой обработки зерновых и зернобобовых культур полностью соответствует требованиям, установленным конструкторской документацией и обеспечивает все этапы технологического воздействия по технологической документации.

2 Проверка на соответствие параметрическим требованиям

Соответствие установленным требованиям опытно-промышленного образца:

– влагосодержание суспензии при обработке – 50 %;

– производительность по обработке суспензии Q=1700 кг/ч;

– температура суспензии 40—60°С;

– продолжительность обработки суспензии 40—50 с;

– угол наклона шнека 20—40°;

– максимальная частота вращения вала n_{max} = 18 мин$^{-1}$;

– наличие частотного преобразователя под обработку различных продуктов растениеводства – имеется.

Характеристика винта шнека:

– диаметр винта шнека в зонах загрузки, рабочей и предварительного обезвоживания суспензии D_0 = 0,203 м;

– диаметр винта в зоне отжима (прессового механизма) убывающий от 0,203 м до 0,156 м;

– средний диаметр витка в зоне отжима – D_1=0,18 м;

– диаметр витка в зоне выгрузки D_2=0,156 м;

– толщина витка винта Δ=0,003 м;

– число витков винта шнека в зоне загрузки $Z_{зз}$=2;

– число витков винта шнека в рабочей зоне $Z_{рз}$=5;

– число витков винта шнека в зоне предварительного обезвоживания $Z_{зпо}$=6;

– число витков винта шнека в зоне отжима $Z_о$=3;

– число витков винта шнека в зоне выгрузки продукта $Z_{вп}$=1,5;

– шаг винта шнека S=0,155 м;

– расчётное давление в зоне отжима $P_о$=2·10^5 Па.

Решение о соответствии:

Установка для ультразвуковой обработки зерна и зернобобовых культур изготовлена по расчетным конструктивным параметрическим показателям и полностью соответствует производственному назначению.

3 Проверка на соответствие функциональным требованиям

Соответствие функциональным требованиям устанавливалась в двух рабочих режимах – на холостом ходу и под нагрузкой.

При проверке на холостом ходу частота вращения вала шнека устанавливалась равной 18 мин$^{-1}$ в течении непрерывной восьмичасовой работы установки. В ходе испытаний установлено:

– мотор редуктор МПЧ-80М-80-18,8 с упругой муфтой обеспечивают плавность хода в режимах пуска и установившейся работы шнекового механизма;

– посторонние шумы в узлах трения не обнаружены;

– уплотнения в режиме испытания с водой, заполненной до требуемого уровня, обеспечивают герметичность, подтекания не обнаружены, система подпитки уровня воды работает исправно.

При проверке под нагрузкой установка проверялась на полном рабочем режиме со следующей последовательностью:

– бункер 1 загружался 50 кг размолотой полножирной сои;

– рабочая зона заполнялась водой с ее подпиткой из емкости 4, температура воды 40 °С;

– во вращающийся шнековый механизм открытием шиберной заслонки осуществлялась подача обрабатываемой сои;

– излишки воды до достижения пропорции 50×50 автоматически вытеснялись перепускным клапаном 6, установленным в корпусе шнека, через этот же клапан осуществлялся отвод воды, образованной в зоне предварительного отжима;

– основной отжим воды из суспензии осуществлялся в устройстве V установки за счет повышения давления в коническом шнековом пространстве до $2 \cdot 10^5$ Па. На выходе остаточная влажность обработанной сои составляла 15%, данное обстоятельство требует применения дополнительной сушки. Вполне допустим метод низкотемпературной аэрационной сушки до нормированной остаточной влажности 2—3 %.

Решение о соответствии:

Опытно-промышленная установка для ультразвуковой обработки зерна сои при инактивации ингибитора трипсина и уреазы и подготовки зерна пшеницы к простому помолу по своим функциональным признакам полностью соответствует требованиям, установленным техническим заданием на конструирование и изготовление

Степень инактивации ингибитора трипсина и уреазы проверялась у сои, измельченной до среднего размера, при установленной частоте ультразвука 20 кГц и температурой нагрева воды в суспензии до 40°С. Показатели инактивации при ультразвуковом воздействии исследовались в сертифицированной учебно-научно-испытательной лаборатории по определению качества пищевой и сельскохозяйственной продукции при ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ.

Исследованиями установлено:

– следы от минеральных загрязнений и следов зараженности отсутствуют;

– активность ингибитора трипсина после 30 минут обработки ультразвуком снижается с 50—60 мг/г до 3—5 мг/г, что подтверждает шестикратное повышение эффективности инактивации при незначительном времени обработки;

– активность уреазы в исходном состоянии зерна сои снижается с 2,5 pH до 0,2 pH после ультразвуковой обработки, что также свидетельствует о высокой эффективности процесса инактивации.

На этом основании основными режимными параметрами обработки зерна приняты параметры, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Режимные параметры обработки сои

№п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Величина параметра
1	Температура воды	°С	30
2	Продолжительность обработки	мин	30
3	Частота ультразвуковых колебаний	кГц	18
4	Интенсивность ультразвукового поля	Вт/см^2	не менее 1
5	Концентрация раствора	%	3
6	Степень помола	—	10

Окончание прил. Л

Чистота обработки зерна сои проверялась на наличие следов от минеральной загрязненности и зараженности вредителями и степенью увлажненности при подготовке к помолу.

Подписи сторон:

от ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ

Рудик Ф.Я.

Моргунова Н.Л.

Макаров Д.В.

от ООО «Химмаш-Старт»

Жмуркин С.М.

Теплов В.В.

Епишин И.Г.

Приложение М

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
по развитию ООО «Химмаш-Старт»

К.Н. Лысенко

«02» февраля 2022 г.

А К Т
производственных испытаний установки для ультразвуковой обработки растительных масел

Комиссия в составе представителей разработчиков ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ:

1. Рудика Феликса Яковлевича, д.т.н., профессора кафедры «Технологии продуктов питания»;

2. Моргуновой Натальи Львовны, к.с.х.н., доцента кафедры «Технологии продуктов питания»;

3. Сундукова Евгения Александровича, аспиранта кафедры «Технологии продуктов питания»

и представителей ООО «Химмаш-Старт», г. Пенза:

1. Жмуркина Сергея Михайловича, начальника конструкторско-технологического комплекса;

2. Теплова Вадима Викторовича, руководителя конструкторской группы № 1;

3. Епишина Игоря Георгиевича, к.т.н., главного научного сотрудника,

действуя на основании договора о сотрудничестве «Разработка конструкторской документации и изготовление опытно-промышленных образцов установок для обработки зерновых, зернобобовых культур и очистки нерафинированных растительных масел от продуктов окисления при производстве и хранении» и акта от 15.01.2021 о приемке опытно-конструкторской документации ультразвуковой установки для обработки зерновых и зернобобовых культур провела испытания изготовленной на производственных площадях ООО «Химмаш-Старт» установки на предмет ее соответствия установленным требованиям.

Проверка и испытания осуществлялись:

– на соответствие конструкторской документации;

– на соответствие установленным параметрическим и функциональным требованиям.

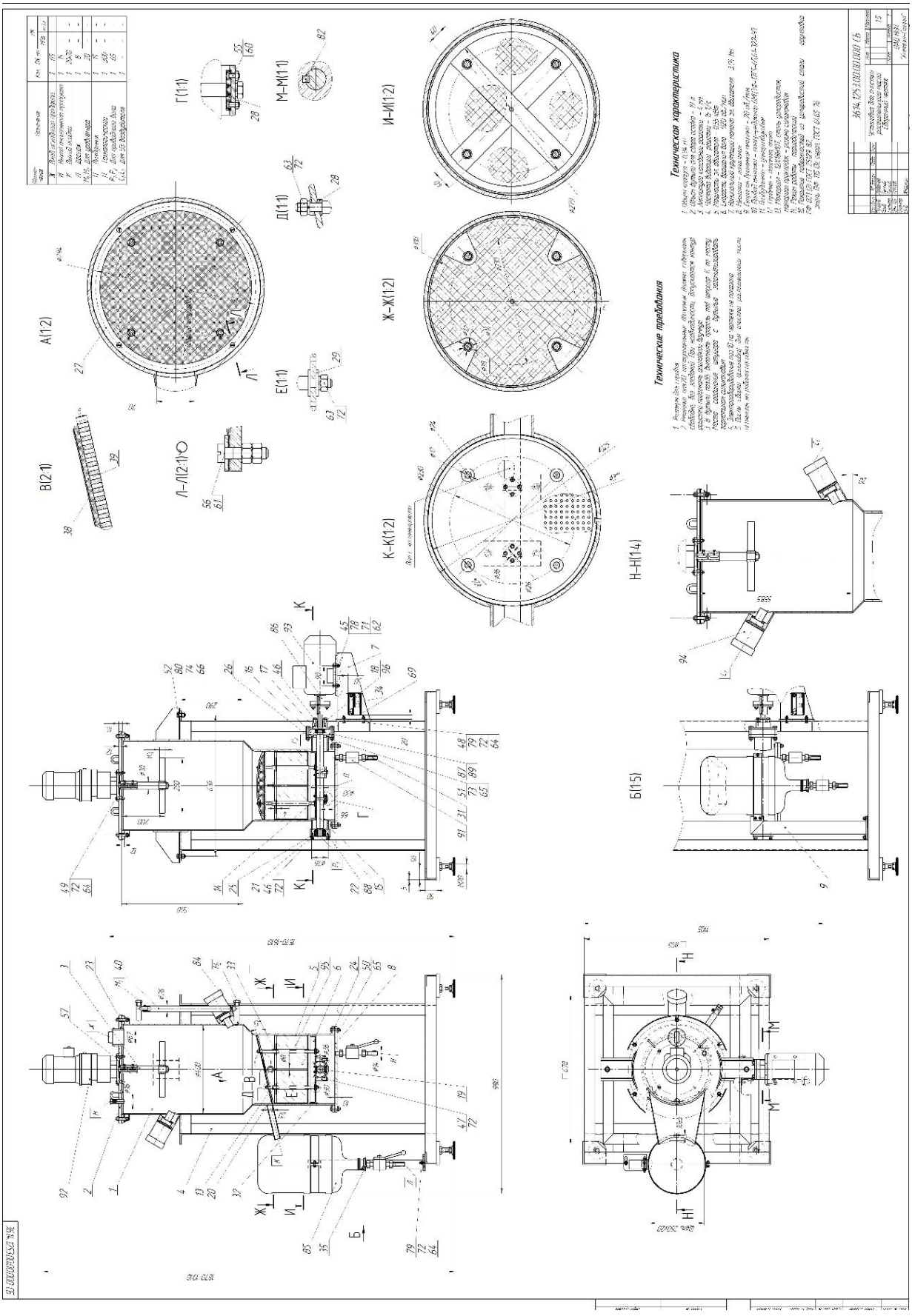
1 Проверка на соответствие конструкторской документации

Конструкция фильтрационной установки, состоящей из емкости, внизу которой расположен наклонный фильтрующий элемент (рисунок 1).

Масло через пробку заливается в корпус установки, во время фильтрации в масле создаются направленные микротечения с помощью ультразвуковых излучателей, расположенных в противоположенных направлениях для устранения застойных зон. В корпусе установки расположена лопастная мешалка, приводимая во вращение мотором-редуктором 6МЦЗФ-17ES-65.61-322. Картридж в установке съемный, что позволяет производить его замену.

При фильтрации масла осадок под действием колебательных движений фильтрационной поверхности всплывает над ней и акустическими микротечениями направленно переносит их сходит с фильтрационной мембраны, расположенной под углом 13°, в отстойник. Очищенное масло, прошедшее через картридж , с кристаллическим адсорбентом выводится через кран внизу установки. Асинхронный электродвигатель АИР71В6 (0,55 кВт, 920 мин$^{-1}$) позволяет производить вибрационные встряхивания поверхности картриджа для ускорения схождения осадка.

Продолжение прил. М



Продолжение прил. М

Решение о соответствии:

Опытно-промышленный образец установки для ультразвуковой обработки растительных масел полностью соответствует требованиям, установленным конструкторской документацией и обеспечивает все этапы технологического воздействия по технологической документации.

2 Проверка на соответствие параметрическим требованиям

Соответствие установленным требованиям опытно-промышленного образца:

– объем корпуса – 0,094 $м^3$;

– объем сборника осадка – 5 л;

– амплитуда колебаний фильтрационной мембраны – 4 мм;

– частота вибрации фильтрационной мембраны – 15 $с^{-1}$;

– мощность электродвигателя для вращения мешалки – 0,55 кВт;

– частота вращения вала – 920 $мин^{-1}$;

– номинальный крутящий момент электродвигателя – 3,94 Н·м;

– частота вращения мешалки – 20 $мин^{-1}$;

– привод мешалки: мотор-редуктор 6МЦЗФ-17ES-65.61-322-УЗ;

– возбудители ультразвуковые, 18 кГц.

Решение о соответствии:

Установка для ультразвуковой обработки растительного масла изготовлена по расчетным конструктивным параметрическим показателям и полностью соответствует производственному назначению.

3 Проверка на соответствие функциональным требованиям

Соответствие функциональным требованиям проверялось в двух рабочих режимах – на холостом ходу и под нагрузкой.

При проверке на холостом ходу амплитуда колебаний фильтрационной мембраны соответствовала 4 мм в течение непрерывной работы установки. В ходе испытаний установлено:

– мотор редуктор 6МЦЗФ-17ES-65.61-322-УЗ обеспечивает плавность хода в режимах пуска и установившейся работы лопастной мешалки;

– асинхронный электродвигатель АИР71В6 (0,55 кВт, 920 $мин^{-1}$) позволяет производить вибрационные встряхивания картриджа;

– посторонние шумы в узлах трения не обнаружены;

– уплотнения в режиме испытания с маслом, заполненным до требуемого уровня, обеспечивают герметичность, подтекания не обнаружены, ротаметр работает исправно.

При проверке под нагрузкой установка проверялась на полном рабочем режиме со следующей последовательностью:

– корпус 1 загружался 100 литрами нерафинированного растительного масла;

– процесс очистки масла проводили 30 минут.

Решение о соответствии:

Опытно-промышленная установка для ультразвуковой обработки растительного масла по своим функциональным признакам полностью соответствует требованиям, установленным техническим заданием на конструирование и изготовление.

4 Проверка соответствия качественным показателям масла

Качественным показателем масла является его очистки от продуктов окисления, от твердых примесей и загрязнений, укрупненных за счет коагуляции, под воздействием ультразвуковых колебательных движений и осажденных на фильтрационной поверхности.

Окончание прил. М

Исследованиями установлено:

Степень качества очистки коллоиднодисперсной взвеси твердых дисперсных частиц, достигающая к 30 минутам 1,2 тыс. шт. / 100 $см^3$ при начальной 57 тыс. шт. / 100 $см^3$. После обработки они достигают: кислотное число 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. Все показатели соответствуют уровню продукта высшего качества.

На этом основании основными режимными параметрами обработки растительного масла приняты параметры, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Режимные параметры обработки растительного масла

№п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Величина параметра
1	Температура масла	°С	30
2	Продолжительность обработки	мин	30
3	Частота ультразвуковых колебаний	кГц	18
4	Интенсивность ультразвукового поля	$Вт/см^2$	не менее 1

Подписи сторон:

От ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ	от ООО «Химмаш-Старт»
Рудик Ф.Я.	Жмуркин С.М.
Моргунова Н.Л.	Теплов В.В.
Сундуков Е.А.	Епишин И.Г.

Приложение Н

УТВЕРЖДАЮ:
Директор ООО «Мельница»
_____А.А. Жибенко
«27» _____2022 г.

Акт внедрения
технологии и установки для ультразвуковой обработки зерновых и зернобобовых культур

Комиссия в составе:

1. Моргуновой Натальи Львовны, к.с.х.н., доцента кафедры «Технологии продуктов питания»;

2. Макарова Дениса Вячеславовича, аспиранта кафедры «Технологии продуктов питания»;

3. Чеботаревой Алии Фаритовны, заведующей лабораторией ООО «Мельница»

4. Симонова Сергея Александровича, технолога ООО «Мельница»

В соответствии с договором о проведении производственных испытаний технологии и ультразвуковой установки для подготовки зерна пшеницы к простому помолу при производстве обойной муки установила:

1. Универсальная ультразвуковая шнековая установка непрерывного действия полностью соответствует своему производственному предназначению – подготовке зерна к помолу;

2. Загрязнения на оболочке зерна отсутствуют, влажность зерна составляет 14,5…17 %, что полностью соответствует нормативным показателям;

3. Технико-экономическая целесообразность использования установки для ультразвуковой обработки зерна при подготовке к помолу обусловливается высоким качеством производимых работ, отсутствием

Окончание прил. Н

необходимости отволаживания зерна в емкостях течение длительного периода времени до 48 часов, что снижает потребности в производственных площадях и энергозатратах;

4. Затраты на операцию подготовки зерна к помолу снижают общие производственные затраты на 12…15 %.

Применение данной технологии способствует эффективной подготовке зерна к помолу, очистке от минеральных примесей и обеззараживанию зерна. При производстве кормов из сои установка позволяет эффективно инактивировать ингибиторы трипсина и уреазу до нормируемых показателей.

27 января 2022 г.

Подписи:

Моргунова Н.Л. Чеботарева А.Ф.

Макаров Д.В. Симонов С.А

Приложение О

УТВЕРЖДАЮ:
Генеральный директор
ООО «Анастасьинское»
_____ П.А. Ковылин
«_8_» _02_ 2022 г.

Акт внедрения
технологии и установки для ультразвуковой обработки зерновых и зернобобовых культур

Комиссия в составе:

1. Моргуновой Натальи Львовны, к.с.х.н., доцента кафедры «Технологии продуктов питания»;
2. Макарова Дениса Вячеславовича, аспиранта кафедры «Технология продуктов питания»;
3. Ковылина Анатолия Петровича, главного инженера ООО «Анастасьинское»;

подтверждает, что установка для ультразвуковой обработки зерна используется в работе ООО «Анастасьинское» при подготовке зерна к помолу, изготовленная по чертежам авторов разработки, работает в кормовом цехе хозяйства с января 2021 года.

Применение данной технологии и установки способствует эффективной подготовке зерна к помолу, очистки от минеральных примесей и обеззараживанию.

Февраля 2022 г.

Подписи:

Ковылин А.П.

Моргунова Н.Л.

Макаров Д.В.

Приложение П

УТВЕРЖДАЮ:
Генеральный директор
ООО «Анастасьинское»
_____П.А. Ковылин
«08» 02 2022 г.

Акт внедрения
технологии и установки для ультразвуковой обработки растительного масла

Комиссия в составе:

1. Рудик Феликса Яковлевича, д.т.н., профессора кафедры «Технологии продуктов питания»;

2. Моргуновой Натальи Львовны, к.с.х.н., доцента кафедры «Технологии продуктов питания»;

3. Ковылина Анатолия Петровича, главного инженера ООО «Анастасьинское»;

подтверждает, что установка для ультразвуковой фильтрации растительного масла используется в работе ООО «Анастасьинское» после отжима масла способом холодного прессования. Применение данной технологии способствует эффективной очистки масла от твердых примесей и загрязнений, укрупненных за счет коагуляции, под воздействием ультразвуковых колебательных движений и осажденных на фильтрационной поверхности.

Подписи

Ковылин А.П.

Рудик Ф.Я.

Моргунова Н.Л.

Приложение Р

УТВЕРЖДАЮ:

Управляющий ООО АГРОФИРМА "БИОКОР-С"

_____ П.Г. Алёнин

«__5__» _сентября_ 2023 г.

Акт о внедрении

технологий и установок для ультразвуковой обработки растительного сырья

Комиссия в составе:

1. Рудик Феликса Яковлевича, д.т.н., профессора кафедры «Технологии продуктов питания» ФГБОУ ВО Вавиловский университет;

2. Моргуновой Натальи Львовны, к.с.х.н., доцента кафедры «Технологии продуктов питания» ФГБОУ ВО Вавиловский университет;

3. Алёнина Павла Григорьевича, д.с.х.н., профессора, управляющего ООО АГРОФИРМА "БИОКОР-С"

4. Куницина Николая Витальевича, зоотехника ООО АГРОФИРМА "БИОКОР-С"

подтверждает, что результаты научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по совершенствованию технологий и технических средств обработки продукции растениеводства с ультразвуковой интенсификацией процесса, выполненной в Саратовском государственном университете генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова были внедрены в ООО АГРОФИРМА "БИОКОР-С" Мокшанского района Пензенской области путем использования в течение двух недель с 9 по 22 сентября 2023 года.

Внедрение результатов исследования дало возможность проводить качественно фильтрацию растительного масла и продлевать срок его хранения, ускорять процесс мойки и увлажнения зерна пшеницы при помоле в муку, инактивировать антипитательные вещества в сое.

Подписи:

Рудик Ф.Я.

Моргунова Н.Л.

Куницин Н.В.

Приложение С

ПРИСВОЕНИЕ ШИФРОВ ОБРАЗЦАМ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Таблица 1 – **Шифры образцов (время УЗ-обработки – температура воды)**

Время УЗ-обработки, с	Температура воды, °С			
	20	25	30	40
20	1	2	3	4
40	1.1	1.2	1.3	1.4
60	2.1	2.2	2.3	2.4
80	3.1	3.2	3.3	3.4

Таблица 2 – **Шифры образцов (время УЗ-обработки – частота ультразвука)**

Время УЗ-обработки, с	Частота ультразвука, Гц			
	18,0	18,15	18,3	18,5
20	4.1	4.2	4.3	4.4
40	5.1	5.2	5.3	5.4
60	6.1	6.2	6.3	6.4
80	7.1	7.2	7.3	7.4

Таблица 2 – **Шифры образцов (температура воды – частота ультразвука)**

Температура воды, °С	Частота ультразвука, Гц			
	18,0	18,15	18,3	18,5
20	8.1	8.2	8.3	8.4
25	9.1	9.2	9.3	9.4
30	10.1	10.2	10.3	10.4
40	11.1	11.2	11.3	11.4

Продолжение прил. С

Результаты физико-химических исследований зерна пшеницы, подготовленного к простому помолу на обоечной машине без ГТО

№ п/п	Шифр образца	Суммарная площадь поверхностей загрязнений, мм²	Зола, %	Микротвердость эндосперма, кг/мм²	Влажность, %	Содержание белка, %	Клейковина, %
1	1	0,116108	1,70	13,8	13,0	12,3	26,1
2	2	0,107940	1,62	13,7	14,5	12,3	26,2
3	3	0,080198	1,50	13,5	16,2	12,4	26,3
4	4	0,763167	1,32	13,3	17,0	12,6	26,5
5	1.1	0,032531	1,61	13,4	14,1	13,0	27,1
6	1.2	0,024814	1,50	12,9	15,7	13,0	27,2
7	1.3	0,001952	1,27	12,5	17,8	13,4	27,7
8	1.4	0,001134	1,12	12,4	18,7	13,4	27,7
9	2.1	0,001293	1,56	12,6	15,3	13,1	27,3
10	2.2	0,004362	1,48	12,3	16,8	13,1	27,3
11	2.3	0,000521	1,23	12,0	18,9	13,4	27,7
12	2.4	0,000432	1,10	11,8	20,1	13,4	27,7
13	3.1	0,000116	1,50	12,1	16,4	13,3	27,5
14	3.2	0,004783	1,42	12,0	17,9	13,4	27,7
15	3.3	0,000152	1,19	11,8	20,2	13,4	27,7
16	3.4	0,000154	1,05	11,8	21,3	13,4	27,7
17	4.1	0,080198	1,50	13,5	16,2	12,4	26,3
18	4.2	0,065521	1,59	13,7	16,0	12,3	26,2
19	4.3	0,105607	1,62	14,0	15,7	12,3	26,1
20	4.4	0,126309	1,73	14,2	15,1	12,3	26,1
21	5.1	0,004361	1,27	12,5	17,8	13,4	27,7
22	5.2	0,015382	1,36	12,8	17,5	13,3	27,5
23	5.3	0,022846	1,43	13,1	17,0	13,2	27,4
24	5.4	0,042754	1,52	13,3	16,2	13,1	27,3
25	6.1	0,000249	1,23	12,0	18,9	13,4	27,7
26	6.2	0,000675	1,30	12,2	18,6	13,4	27,7
27	6.3	0,000541	1,37	12,6	18,1	13,3	27,5
28	6.4	0,002463	1,47	12,9	17,3	13,1	27,3
29	7.1	0,000265	1,19	11,8	20,2	13,4	27,7
30	7.2	0,001341	1,23	12,3	20,0	13,4	27,7
31	7.3	0,001329	1,30	12,5	19,4	13,4	27,7
32	7.4	0,001212	1,35	12,7	18,2	13,3	27,5
33	8.1	0,075607	1,63	13,6	13,5	12,7	26,7
34	8.2	0,065521	1,72	13,8	13,3	12,6	26,5
35	8.3	0,105607	1,75	14,0	13,0	12,5	26,4
36	8.4	0,126309	1,80	14,3	12,7	12,3	26,2

Окончание прил. С

№ п/п	Шифр образца	Суммарная площадь поверхностей загрязнений, мм^2	Зола, %	Микротвердость эндосперма, кг/мм^2	Влажность, %	Содержание белка, %	Клейковина, %
37	9.1	0,014846	1,41	13,3	14,9	12,8	26,8
38	9.2	0,015382	1,50	13,5	14,5	12,7	26,7
39	9.3	0,022846	1,56	13,7	14,1	12,6	26,6
40	9.4	0,042754	1,69	14,0	13,6	12,5	26,4
41	10.1	0,001299	1,25	13,0	17,5	13,3	27,5
42	10.2	0,000675	1,34	13,3	16,5	13,1	27,3
43	10.3	0,000541	1,37	13,6	16,3	13,0	27,2
44	10.4	0,002463	1,45	13,8	15,7	12,9	27,0
45	11.1	0,000276	1,15	12,9	17,9	13,3	27,6
46	11.2	0,000645	1,24	13,1	17,0	13,3	27,5
47	11.3	0,001465	1,30	13,3	16,5	13,2	27,4
48	11.4	0,001212	1,36	13,6	16,0	13,0	27,2

Приложение Т

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ

Таблица 1 – **Изменение зольности (%) в зависимости от времени УЗ-обработки и частоты ультразвука (температура процесса 30 °С)**

Время УЗ-обработки, с	Частота ультразвука, кГц			
	18,0	18,15	18,3	18,5
20	1,50	1,59	1,62	1,73
40	1,27	1,36	1,43	1,52
60	1,23	1,30	1,37	1,47
80	1,19	1,23	1,30	1,35

Таблица 2 – **Изменение зольности (%) в зависимости от температуры процесса и частоты ультразвука (время УЗ-обработки 30 с)**

Температура процесса, °С	Частота ультразвука, кГц			
	18,0	18,15	18,3	18,5
20	1,63	1,72	1,75	1,80
25	1,41	1,50	1,56	1,69
30	1,25	1,34	1,37	1,45
40	1,15	1,24	1,30	1,36

Таблица 3 – **Изменение микротвердости эндосперма (кг/мм^2) в зависимости от времени УЗ-обработки и температуры процесса (частота ультразвука 18,0 кГц)**

Время УЗ-обработки, с	Температура процесса, °С			
	20	25	30	40
20	13,8	13,7	13,5	13,3
40	13,4	12,9	12,5	12,4
60	12,6	12,3	12,0	11,8
80	12,1	12,0	11,8	11,8

Таблица 4 – **Изменение микротвёрдости эндосперма (кг/мм^2) в зависимости от времени УЗ-обработки и частоты ультразвука (температура процесса 30 °С)**

Время УЗ-обработки, с	Частота ультразвука, кГц			
	18,0	18,15	18,3	18,5
20	13,5	13,7	14,0	14,2
40	12,5	12,8	13,1	13,3
60	12,0	12,2	12,6	12,9
80	11,8	12,3	12,5	12,7

Продолжение прил. Т

Таблица 5 – **Изменение микротвердости эндосперма (кг/мм^2) в зависимости от температуры процесса и частоты ультразвука (время УЗ-обработки 30 с)**

Температура процесса, °С	Частота ультразвука, кГц			
	18,0	18,15	18,3	18,5
20	13,7	13,8	14,0	14,3
25	13,4	13,5	13,7	14,0
30	13,0	13,3	13,6	13,8
40	13,1	13,2	13,5	13,6

Таблица 6 – **Изменение влажности зерна (%) в зависимости от времени УЗ-обработки и температуры процесса (частота ультразвука 18,0 кГц)**

Время УЗ-обработки, с	Температура процесса, °С			
	20	25	30	40
20	13,0	14,5	16,2	17,0
40	14,1	15,7	17,8	18,7
60	15,3	16,8	18,9	20,1
80	16,4	17,9	20,2	21,3

Таблица 7 – **Изменение влажности зерна (%) в зависимости от времени УЗ-обработки и частоты ультразвука (температура процесса 30 °С)**

Время УЗ-обработки, с	Частота ультразвука, кГц			
	18,0	18,15	18,3	18,5
20	16,2	16,0	15,7	15,1
40	17,8	17,5	17,0	16,2
60	18,9	18,6	18,1	17,3
80	20,2	20,0	19,4	18,2

Таблица 8 – **Изменение влажности зерна (%) в зависимости от температуры процесса и частоты ультразвука (время УЗ-обработки 30 с)**

Температура процесса, °С	Частота ультразвука, кГц			
	18,0	18,15	18,3	18,5
20	13,5	13,3	13,0	12,7
25	14,9	14,5	14,1	13,6
30	17,5	16,5	16,3	15,7
40	17,9	17,0	16,5	16,0

Приложение У

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗЕРНА СОИ

Таблица 1 – **Химический анализ сои сорта Злато**

Содержание, %	Необработанное зерно			Обработка					
				тепловая			ультразвуковая		
	1-е измерение	2-е измерение	среднее значение	1-е измерение	2-е измерение	среднее значение	1-е измерение	2-е измерение	среднее значение
Белок	38,94	38,78	38,86	37,48	37,36	37,42	38,08	37,98	38,03
Жир	21,80	21,76	21,78	23,55	23,47	23,51	21,12	21,08	21,10
Клетчатка	6,835	6,825	6,83	6,71	6,69	6,70	6,59	6,55	6,57
Зола	5,06	5,04	5,05	5,25	5,23	5,24	5,10	5,08	5,09
БЭВ	23,74	23,66	23,70	25,99	25,87	25,93	26,99	26,97	26,98

Таблица 2 – **Химический анализ сои сорта Бара**

Содержание, %	Необработанное зерно			Обработка					
				тепловая			ультразвуковая		
	1-е измерение	2-е измерение	среднее значение	1-е измерение	2-е измерение	среднее значение	1-е измерение	2-е измерение	среднее значение
Белок	34,13	34,03	34,08	32,40	32,34	32,37	34,00	33,94	33,97
Жир	20,33	20,27	20,30	21,19	21,84	21,87	20,25	20,17	20,21
Клетчатка	7,10	7,06	7,08	6,92	6,88	6,90	7,034	7,006	7,02
Зола	7,104	7,096	7,10	7,10	7,06	7,08	7,033	7,007	7,02
БЭВ	29,34	29,22	29,28	27,80	27,76	27,78	27,86	27,82	27,84

Таблица 3 – **Химический анализ сои сорта Соер 4**

Содержание, %	Необработанное зерно			Обработка					
				тепловая			ультразвуковая		
	1-е измерение	2-е измерение	среднее значение	1-е измерение	2-е измерение	среднее значение	1-е измерение	2-е измерение	среднее значение
Белок	30,51	30,45	30,48	28,51	28,47	28,49	30,20	30,04	30,12
Жир	19,92	19,88	19,90	21,14	21,06	21,10	19,44	19,38	19,41
Клетчатка	7,11	7,09	7,10	6,96	6,94	6,95	6,97	6,95	6,96
Зола	8,234	8,226	8,230	7,55	7,51	7,53	8,05	8,03	8,04
БЭВ	32,92	32,88	32,90	31,36	31,30	31,33	33,72	33,56	33,64

Продолжение прил. У

Таблица 4 – **Химический анализ сои сорта Соер 5**

Содержание, %	Необработанное зерно			Обработка					
				тепловая			ультразвуковая		
	1-е измерение	2-е измерение	среднее значение	1-е измерение	2-е измерение	среднее значение	1-е измерение	2-е измерение	среднее значение
Белок	37,04	36,96	37,00	35,45	35,35	35,40	36,92	36,86	36,89
Жир	20,12	20,10	20,11	21,91	21,85	21,88	19,87	19,79	19,83
Клетчатка	7,04	7,02	7,03	6,80	6,76	6,78	7,00	6,98	6,99
Зола	5,24	5,22	5,23	5,79	5,79	5,77	5,124	5,116	5,12
БЭВ	26,56	26,44	26,50	26,56	26,33	26,36	28,66	28,56	28,61

Таблица 5 – **Активность уреазы сои сорта Злато**

Показатель		1-е измерение	2-е измерение	Среднее значение
Дисперсность измельчения	необр.	2,44	2,22	2,33
	2,5	2,13	2,05	2,09
	2,0	2,13	1,73	1,93
	1,5	1,58	1,50	1,54
	1,0	1,72	1,20	1,46
Концентрация раствора, %	3	1,60	1,40	1,50
	6	0,94	0,82	0,88
	9	0,47	0,39	0,43
	12	0,21	0,15	0,18
Количество раствора, мл	40	1,96	1,88	1,92
	80	1,42	1,02	1,22
	120	0,36	0,30	0,33
	160	0,13	0,11	0,12

Таблица 6 – **Активность уреазы сои сорта Бара**

Показатель		1-е измерение	2-е измерение	Среднее значение
Дисперсность измельчения	необр.	2,47	2,05	2,26
	2,5	2,49	1,77	2,13
	2,0	2,31	1,89	2,10
	1,5	2,31	1,67	1,99
	1,0	2,10	1,80	1,95
Концентрация раствора, %	3	2,33	1,71	1,97
	6	1,34	1,28	1,31
	9	0,52	0,50	0,51
	12	0,23	0,21	0,22
Количество раствора, мл	40	2,03	1,93	1,98
	80	1,43	1,27	1,35
	120	0,33	0,25	0,29
	160	0,17	0,15	0,16

Продолжение прил. У

Таблица 7 – **Активность уреазы сои сорта Соер 4**

Показатель		1-е измерение	2-е измерение	Среднее значение
Дисперсность измельчения	необр.	2,31	2,11	2,21
	2,5	2,21	1,79	2,00
	2,0	2,07	1,89	1,98
	1,5	2,03	1,63	1,83
	1,0	1,87	1,65	1,76
Концентрация раствора, %	3	1,98	1,60	1,79
	6	1,16	0,90	1,03
	9	0,41	0,35	0,38
	12	0,21	0,19	0,20
Количество раствора, мл	40	2,06	1,88	2,02
	80	1,48	1,10	1,29
	120	0,27	0,21	0,24
	160	0,22	0,22	0,22

Таблица 8 – **Активность уреазы сои сорта Соер 5**

Показатель		1-е измерение	2-е измерение	Среднее значение
Дисперсность измельчения	необр.	2,51	2,11	2,31
	2,5	2,36	1,72	2,04
	2,0	2,38	1,66	2,02
	1,5	1,79	1,70	1,73
	1,0	1,74	1,54	1,64
Концентрация раствора, %	3	1,92	1,44	1,68
	6	0,93	0,77	0,85
	9	0,45	0,33	0,39
	12	0,16	0,12	0,14
Количество раствора, мл	40	2,29	1,81	2,05
	80	1,26	1,08	1,17
	120	0,23	0,19	0,21
	160	0,20	0,16	0,18

Продолжение прил. У

Таблица 9 – **Изменение активности ингибитора сои сорта Злато в зависимости от времени обработки и частоты ультразвука**

Показатель		1-е измерение	2-е измерение	Среднее значение
Обработка без ультразвука				
Время обработки, ч	необр.	21,13	21,07	21,1
	1	9,71	9,69	9,7
	4	5,004	4,996	5,0
	6	3,102	3,098	3,1
	8	2,71	2,69	2,7
Обработка ультразвуком частотой 18 кГц				
Время обработки, мин	10	17,12	17,08	17,1
	20	12,02	11,98	12,0
	30	3,803	3,797	3,8
	40	2,004	1,996	2,0
	50	1,503	1,497	1,5
Обработка ультразвуком частотой 20 кГц				
Время обработки, мин	10	14,33	14,27	14,3
	20	4,01	3,99	4,0
	30	2,301	2,999	2,3
	40	1,901	1,899	1,9
	50	1,402	1,398	1,4

Таблица 10 – **Изменение активности ингибитора сои сорта Бара в зависимости от времени обработки и частоты ультразвука**

Показатель		1-е измерение	2-е измерение	Среднее значение
Обработка без ультразвука				
Время обработки, ч	необр.	51,321	51,079	51,2
	1	16,329	16,271	16,3
	4	13,32	13,28	13,3
	6	4,61	4,59	4,6
	8	3,005	2,995	3,0
Обработка ультразвуком частотой 18 кГц				
Время обработки, мин	10	37,481	37,319	37,4
	20	26,855	26,745	26,8
	30	7,712	7,688	7,7
	40	6,111	6,089	6, 1
	50	5,106	5,094	5,1
Обработка ультразвуком частотой 20 кГц				
Время обработки, мин	10	30,25	30,15	30,2
	20	10,262	10,218	10,24
	30	4,007	3,993	4,0
	40	4,008	3,992	4,0
	50	3,503	3,497	3,5

Продолжение прил. У

Таблица 11 – **Изменение активности ингибитора сои сорта Соер 4 в зависимости от времени обработки и частоты ультразвука**

Показатель		1-е измерение	2-е измерение	Среднее значение
Обработка без ультразвука				
Время обработки, ч	необр.	45,637	45,563	45,6
	1	16,441	16,359	16,4
	4	13,233	13,167	13,2
	6	7,206	7,194	7,2
	8	6,815	6,785	6,8
Обработка ультразвуком частотой 18 кГц				
Время обработки, мин	10	36,038	35,962	36,0
	20	20,137	20,063	20,1
	30	5,011	4, 989	5,0
	40	4,109	4,091	4,1
	50	3,207	3,193	3,2
Обработка ультразвуком частотой 20 кГц				
Время обработки, мин	10	27,815	27,785	27,8
	20	8,213	8,187	8,2
	30	4,608	4,592	4,6
	40	3,604	3,596	3,6
	50	3,608	3,592	3,6

Таблица 12 – **Изменение активности ингибитора сои сорта Соер 5 в зависимости от времени обработки и частоты ультразвука**

Показатель		1-е измерение	2-е измерение	Среднее значение
Обработка без ультразвука				
Время обработки, ч	необр.	61,358	61,242	61,3
	1	34,972	34,828	34,9
	4	13,421	13,379	13,4
	6	9,825	9,775	9,8
	8	9,121	9,079	9,1
Обработка ультразвуком частотой 18 кГц				
Время обработки, мин	10	47,259	47,141	47,2
	20	37,891	37,709	37,8
	30	7,412	7,388	7,4
	40	6,104	6,096	6,1
	50	5,506	5,494	5,5
Обработка ультразвуком частотой 20 кГц				
Время обработки, мин	10	36,876	36,724	36,8
	20	11,625	11,575	11,6
	30	5,506	5,494	3,6
	40	4,911	4,889	3,4
	50	3,604	3,596	3,4

Продолжение прил. У

Таблица 13 – **Активность фермента в зависимости от крупности измельчения**

Количество фрагментов	Активность фермента, pH			
	Злато	Бара	Соер 4	Соер 5
0	2,33	2,26	2,21	2,31
1	2,09	2,13	2,00	2,04
2	1,93	2,10	1,98	2,02
10	1,54	1,99	1,83	1,73
20	1,46	1,95	1,76	1,64

Таблица 14 – **Активность фермента в зависимости от концентрации окислителя в рабочем растворе**

Концентрация окислителя, %	Активность фермента, pH			
	Злато	Бара	Соер 4	Соер 5
0	2,33	2,26	2,21	2,31
3	1,50	1,97	1,80	1,69
6	0,88	1,31	1,03	0,85
9	0,43	0,51	0,38	0,39
12	0,18	0,22	0,20	0,14

Таблица 15 – **Активность фермента в зависимости от количества рабочего раствора**

Количество раствора, мл	Активность фермента, pH			
	Злато	Бара	Соер 4	Соер 5
0	2,33	2,26	2,21	2,31
40	1,92	1,98	2,02	2,05
80	1,22	1,35	1,29	1,17
120	0,33	0,29	0,24	0,21
160	0,12	0,16	0,22	0,18

Таблица 16 – **Активность ингибитора в зависимости от времени обработки (без ультразвука)**

Время обработки, ч	Активность ингибитора, мг/г			
	Злато	Бара	Соер 4	Соер 5
0	21,10	51,20	45,60	61,30
1	9,70	16,30	16,40	34,90
4	5,00	13,30	13,20	13,40
6	3,10	4,60	7,20	9,80
8	2,70	3,00	6,80	9,10

Окончание прил. У

Таблица 17 – Активность ингибитора в зависимости от времени обработки (частота ультразвука 18 кГц)

Время обработки, мин	Активность ингибитора, мг/г			
	Злато	Бара	Соер 4	Соер 5
10	17,1	37,4	36,0	47,2
20	12,0	26,8	20,1	33,8
30	3,8	7,7	5,0	7,4
40	2,0	6,1	4,1	6,1
50	1,5	5,1	3,2	5,5

Таблица 18 – Активность ингибитора в зависимости от времени обработки (частота ультразвука 20 кГц)

Время обработки, мин	Активность ингибитора, мг/г			
	Злато	Бара	Соер 4	Соер 5
10	14,3	30,2	27,8	36,8
20	4,0	10,24	8,2	11,6
30	2,3	4,0	4,6	3,6
40	1,9	4,0	3,6	3,4
50	1,4	3,5	3,6	3,4

Приложение Ф

Результаты определения распределения величин влажности зерна пшеницы

Продолжение приложения Ф

Таблица Ф. 1 - Сводная ведомость величин влажности зерна пшеницы, обработанной ультразвуком

№ п/п	Влажность,%	№ п/п	Влажность,%	№ п/п	Влажность,%	№ п/п	Влажность,%
1	14,33	9	15,56	17	15,96	25	16,62
2	14,6	10	15,69	18	15,99	26	16,63
3	14,61	11	15,7	19	16,09	27	16,64
4	14,78	12	15,75	20	16,12	28	16,78
5	14,84	13	15,82	21	16,22	29	17,04
6	15,28	14	15,9	22	16,28	30	17,04
7	15,31	15	15,95	23	16,33	31	17,5
8	15,53	16	15,95	24	16,55	32	17,57

Таблица Ф.2 - Статистический ряд

№	Граница интервала		Середина интервала	Опытная частота mi	Опытная вероятность	Накопленная опытная вероятность
1	14,06	14,6	14,33	1	0,031	0,031
2	14,6	15,14	14,87	4	0,125	0,156
3	15,14	15,68	15,41	4	0,125	0,281
4	15,68	16,22	15,95	11	0,344	0,625
5	16,22	16,76	16,49	7	0,219	0,844
6	16,76	17,3	17,03	3	0,094	0,938
7	17,3	17,84	17,57	2	0,063	1,001

Продолжение приложения Ф

Таблица Ф. 3 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

Граница интервала			14,06 … 14,6	14,6 … 15,14	15,14 … 15,68	15,68 … 16,22	16,22 … 16,76	16,76 … 17,3	17,3 … 17,84
Середина интервала			14,33	14,87	15,41	15,95	16,49	17,03	17,57
Опытная частота, mi			1	4	4	11	7	3	2
Дифференциальный закон распределения	Опытная вероятность		0,031	0,125	0,125	0,344	0,219	0,094	0,063
	Теоретическая вероятность	НЗР	0,021	0,091	0,203	0,28	0,238	0,126	0,042
		ЗРВ	0,016	0,077	0,21	0,265	0,25	0,132	0,06
Интегральный закон распределения	Накопленная опытная вероятность		0,031	0,156	0,281	0,625	0,844	0,938	1,001
	Функция распределения	НЗР	0,03	0,12	0,32	0,59	0,82	0,95	0,99
		ЗРВ	0,01	0,03	0,23	0,49	0,86	0,97	1
Теоретическая частота m_{Ti}		НЗР	2	3	6	9	7	4	1
		ЗРВ	0	1	6	8	12	4	1

Определим значение теоретических частот для ЗНР.

Для ЗНР:

mт1 = 32 * [F(14,6) - F(14,06)] = 2
mт2 = 32 * [F(15,14) - F(14,6)] = 3
mт3 = 32 * [F(15,68) - F(15,14)] = 6
mт4 = 32 * [F(16,22) - F(15,68)] = 9
mт5 = 32 * [F(16,76) - F(16,22)] = 7
mт6 = 32 * [F(17,3) - F(16,76)] = 4
mт7 = 32 * [F(17,84) - F(17,3)] = 1

Определим χ^2 для ЗНР

$$\chi^2 = (1-2)^2/2+(4-3)^2/3 +(4-6)^2/6+(11-9)^2/9 +(7-7)^2/7 + (3-4)^2/ 4+(2-1)^2/1 = 3,19$$

По таблице приложения определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2. Определим номер строки для выхода в таблицу

№стр = n_y – к; к = 3; n_y = 7,

№стр = 7 – 3 = 4.

Тогда: для ЗНР – Р% = 52,7%;

Определение доверительных границ рассеивания значений величин влажности.

Доверительные границы рассеивания среднего значения определяются по формуле:

$$\overline{\varphi}_{\beta}^{H} = \overline{\varphi} - t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\overline{\varphi}_{\beta}^{\text{В}} = \overline{\varphi} + t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$\overline{\varphi}_{\beta}^{H}$= 16,04 - 1,98 · 0,773/$\sqrt{32}$ = 15,761 %;

$\overline{\varphi}_{\beta}^{\text{В}}$= 16,04 + 1,98 · 0,773/ $\sqrt{32}$ = 16,319 %.

С вероятностью β = 0,95 можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя находится в пределах от 15,761 до 16,319.

Определение статистической ошибки

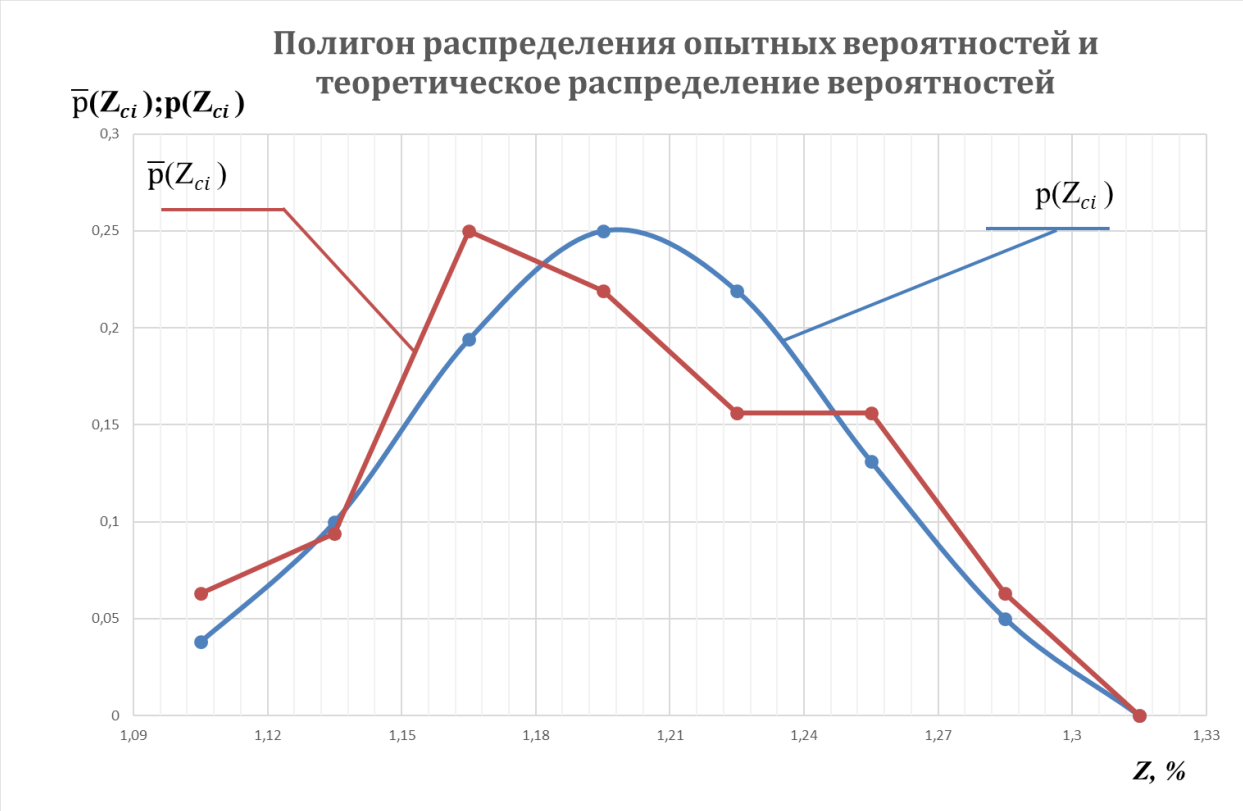
$$\varepsilon = \frac{\varphi_{\beta 0} - \overline{\varphi}}{\overline{\varphi} - \varphi_{\text{см}}} \cdot 100\%$$

ε_{α} = (16,319 - 16,04) / (16,04 - 14,06) · 100 = 14,1 %.

Точность расчётов вполне достаточна, так как по ГОСТу $\varepsilon_{\alpha} \leq 20\%$.

Продолжение приложения Ф

Результаты определения распределения величин зольности зерна пшеницы



Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.4 - Сводная ведомость величин зольности зерна пшеницы, обработанной ультразвуком

№ п/п	Зольность,%	№ п/п	Зольность,%	№ п/п	Зольность,%	№ п/п	Зольность,%
1	1,1	9	1,17	17	1,2	25	1,23
2	1,11	10	1,17	18	1,2	26	1,24
3	1,12	11	1,17	19	1,2	27	1,24
4	1,14	12	1,17	20	1,2	28	1,24
5	1,14	13	1,17	21	1,21	29	1,25
6	1,16	14	1,18	22	1,21	30	1,26
7	1,16	15	1,19	23	1,21	31	1,27
8	1,17	16	1,19	24	1,22	32	1,29

Таблица Ф.5 - Статистический ряд

№	Граница интервала		Середина интервала	Опытная частота mi	Опытная вероятность	Накопленная опытная вероятность
1	1,09	1,12	1,105	2	0,063	0,063
2	1,12	1,15	1,135	3	0,094	0,157
3	1,15	1,18	1,165	8	0,25	0,407
4	1,18	1,21	1,195	7	0,219	0,626
5	1,21	1,24	1,225	5	0,156	0,782
6	1,24	1,27	1,255	5	0,156	0,938
7	1,27	1,3	1,285	2	0,063	1,001

Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.6 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

Граница интервала			1,09 … 1,12	1,12 … 1,15	1,15 … 1,18	1,18 … 1,21	1,21 … 1,24	1,24 … 1,27	1,27 … 1,3
Середина интервала			1,105	1,135	1,165	1,195	1,225	1,255	1,285
Опытная частота, mi			2	3	8	7	5	5	2
Дифференциальный закон распределения	Опытная вероятность		0,063	0,094	0,25	0,219	0,156	0,156	0,063
	Теоретическая вероятность	НЗР	0,038	0,1	0,194	0,25	0,219	0,131	0,05
		ЗРВ	0,033	0,109	0,213	0,241	0,195	0,128	0,051
Интегральный закон распределения	Накопленная опытная вероятность		0,063	0,157	0,407	0,626	0,782	0,938	1,001
	Функция распределения	НЗР	0,05	0,15	0,34	0,58	0,8	0,93	0,98
		ЗРВ	0,02	0,1	0,27	0,63	0,84	0,95	1
Теоретическая частота m_{Ti}		НЗР	2	3	6	8	7	4	2
		ЗРВ	1	3	5	12	7	4	2

Определим значение теоретических частот для ЗНР.

mт1 = 32 * [F(1,12) - F(1,09)] = 2

mт2 = 32 * [F(1,15) - F(1,12)] = 3

mт3 = 32 * [F(1,18) - F(1,15)] = 6

mт4 = 32 * [F(1,21) - F(1,18)] = 8

mт5 = 32 * [F(1,24) - F(1,21)] = 7

mт6 = 32 * [F(1,27) - F(1,24)] = 4

mт7 = 32 * [F(1,3) - F(1,27)] = 2

Продолжение приложения Ф

$\chi^2 = (2\text{-}1)^2/1 + (3\text{-}3)^2/3 + (8\text{-}5)^2/5 + (7\text{-}12)^2/12 + (5\text{-}7)^2/7 + (5\text{-}4)^2/4 + (2\text{-}2)^2/2 = 5{,}7$

По таблице приложения определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2. Определим номер строки для выхода в таблицу

№стр = n_y – к; к = 3; n_y = 7,

№стр = 7 – 3 = 4.

Тогда: для ЗНР – Р% = 80,7%;

Определение доверительных границ рассеивания значений величин зольности.

Доверительные границы рассеивания среднего значения определяются по формуле:

где:

$$\overline{Z}_\beta^H = \overline{Z} - t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\overline{Z}_\beta^{\text{В}} = \overline{Z} + t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$\overline{Z}_\beta^H$ = 1,2 - 1,98 · 0,048/$\sqrt{32}$ = 1,1827 %;

$\overline{Z}_\beta^{\text{В}}$ = 1,2 + 1,98 · 0,048/ $\sqrt{32}$ = 1,2173 %.

С вероятностью β = 0,95 можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя находится в пределах от 1,1827 до 1,2173.

Определение статистической ошибки

$$\varepsilon = \frac{Z_{\beta 0} - \overline{Z}}{\overline{Z} - Z_{\text{см}}} \cdot 100\%$$

ε_α = (1,2173 - 1,2) / (1,2 - 1,09) · 100 = 15,7 %.

Точность расчётов вполне достаточна, так как по ГОСТу $\varepsilon_\alpha \leq 20\%$.

Продолжение приложения Ф

Результаты определения распределения величин перекисного числа растительного масла

Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.7 - Сводная ведомость величин перекисного числа подсолнечного растительного масла

№ п/п	перекислое число, ммоль/кг	№ п/п	перекислое число, ммоль/кг	№ п/п	перекислое число, ммоль/кг	№ п/п	перекислое число, ммоль/кг
1	7,29	9	7,79	17	8,11	25	8,57
2	7,34	10	7,91	18	8,11	26	8,58
3	7,4	11	7,92	19	8,13	27	8,6
4	7,44	12	7,93	20	8,28	28	8,69
5	7,7	13	7,96	21	8,34	29	8,75
6	7,71	14	7,97	22	8,53	30	8,88
7	7,75	15	8	23	8,54	31	8,93
8	7,75	16	8,02	24	8,56	32	9

Таблица Ф.8 - Статистический ряд

№	Граница интервала		Середина интервала	Опытная частота mi	Опытная вероятность	Накопленная опытная вероятность
1	7,15	7,44	7,295	3	0,094	0,094
2	7,44	7,73	7,585	3	0,094	0,188
3	7,73	8,02	7,875	9	0,281	0,469
4	8,02	8,31	8,165	5	0,156	0,625
5	8,31	8,6	8,455	6	0,188	0,813
6	8,6	8,89	8,745	4	0,125	0,938
7	8,89	9,18	9,035	2	0,063	1,001

Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.9 Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

Граница интервала			7,15 … 7,44	7,44 … 7,73	7,73 … 8,02	8,02 … 8,31	8,31 … 8,6	8,6 … 8,89	8,89 … 9,18
Середина интервала			7,295	7,585	7,875	8,165	8,455	8,745	9,035
Опытная частота, mi			3	3	9	5	6	4	2
Дифференциальный закон распределения	Опытная вероятность		0,094	0,094	0,281	0,156	0,188	0,125	0,063
	Теоретическая вероятность	НЗР	0,054	0,121	0,205	0,242	0,193	0,109	0,042
		ЗРВ	0,043	0,129	0,221	0,228	0,188	0,101	0,059
Интегральный закон распределения	Накопленная опытная вероятность		0,094	0,188	0,469	0,625	0,813	0,938	1,001
	Функция распределения	НЗР	0,07	0,2	0,4	0,64	0,83	0,94	0,99
		ЗРВ	0,03	0,11	0,28	0,63	0,9	0,97	1
Теоретическая частота m_{Ti}		НЗР	3	4	6	8	6	4	2
		ЗРВ	1	3	5	11	9	2	1

Определим значение теоретических частот для ЗНР и ЗРВ.

mт1 = 32 * [F(7,44) - F(7,15)] = 3

mт2 = 32 * [F(7,73) - F(7,44)] = 4

mт3 = 32 * [F(8,02) - F(7,73)] = 6

mт4 = 32 * [F(8,31) - F(8,02)] = 8

mт5 = 32 * [F(8,6) - F(8,31)] = 6

mт6 = 32 * [F(8,89) - F(8,6)] = 4

mт7 = 32 * [F(9,18) - F(8,89)] = 2

Определим χ^2 для ЗНР

$\chi^2 = (3-3)^2/3+(3-4)^2/4 +(9-6)^2/6+(5-8)^2/8 +(6-6)^2/6 + (4-4)^2/ 4+(2-2)^2/2 = 2,88$

По таблице приложения определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2. Определим номер строки для выхода в таблицу

$$№стр = n_y - к;\ к = 3;\ n_y = 7, \quad (21)$$

$$№стр = 7 - 3 = 4.$$

Тогда: для ЗНР – Р% = 57,8%;

Определение доверительных границ рассеивания значений величин перекисного числа.

Доверительные границы рассеивания среднего значения определяются по формуле:

$$\overline{\chi}_{\beta}^{H} = \overline{\chi} - t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\overline{\chi}_{\beta}^{\text{В}} = \overline{\chi} + t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$\overline{\chi}_{\beta}^{H}$ = 8,14 - 1,98 · 0,48/$\sqrt{32}$ = 7,9669 ммоль/кг;

$\overline{\chi}_{\beta}^{\text{В}}$ = 8,14 + 1,98 · 0,48/ $\sqrt{32}$ = 8,3131 ммоль/кг.

С вероятностью β = 0,95 можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя находится в пределах от 7,9669 до 8.3131 ммоль/кг.

Определение статистической ошибки

$$\varepsilon = \frac{\chi_{\beta 0} - \overline{\chi}}{\overline{\chi} - \chi_{\text{см}}} \cdot 100\%$$

ε_{α} = (8,3131 - 8,14) / (8,14 - 7,15) · 100 = 17,5 %.

Точность расчётов вполне достаточна, так как по ГОСТу $\varepsilon_{\alpha} \leq 20\%$.

Продолжение приложения Ф

Результаты определения распределения величин цветного числа растительного масла

Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.10 - Сводная ведомость цветного числа подсолнечного растительного масла

№ п/п	цветное число, ед.мг.йода	№ п/п	цветное число, ед.мг.йода	№ п/п	цветное число, ед.мг.йода	№ п/п	цветное число, ед.мг.йода
1	7,86	9	17,49	17	22,86	25	27,18
2	9,05	10	18,2	18	23,14	26	27,6
3	10,6	11	18,83	19	24,17	27	29,25
4	12,43	12	19,5	20	25,04	28	29,34
5	13,71	13	20,43	21	25,14	29	29,79
6	14,36	14	21,11	22	25,22	30	30,06
7	15,67	15	21,74	23	26,17	31	30,7
8	15,91	16	22,56	24	26,36	32	32,52

Таблица Ф.11 - Статистический ряд

№	Граница интервала		Середина интервала	Опытная частота mi	Опытная вероятность	Накопленная опытная вероятность
1	5,81	9,92	7,865	2	0,063	0,063
2	9,92	14,03	11,975	3	0,094	0,157
3	14,03	18,14	16,085	4	0,125	0,282
4	18,14	22,25	20,195	6	0,188	0,47
5	22,25	26,36	24,305	8	0,25	0,72
6	26,36	30,47	28,415	7	0,219	0,939
7	30,47	34,58	32,525	2	0,063	1,002

Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.12 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

Граница интервала			5,81 … 9,92	9,92 … 14,03	14,03 … 18,14	18,14 … 22,25	22,25 … 26,36	26,36 … 30,47	30,47 … 34,58
Середина интервала			7,865	11,975	16,085	20,195	24,305	28,415	32,525
Опытная частота, mi			2	3	4	6	8	7	2
Дифференциальный закон распределения	Опытная вероятность		0,063	0,094	0,125	0,188	0,25	0,219	0,063
	Теоретическая вероятность	НЗР	0,025	0,087	0,173	0,241	0,229	0,148	0,068
		ЗРВ	0,022	0,086	0,162	0,235	0,219	0,158	0,088
Интегральный закон распределения	Накопленная опытная вероятность		0,063	0,157	0,282	0,47	0,72	0,939	1,002
	Функция распределения	НЗР	0,04	0,12	0,29	0,53	0,76	0,91	0,97
		ЗРВ	0,02	0,04	0,15	0,5	0,75	0,92	0,98
Теоретическая частота m_{Ti}		НЗР	2	3	5	8	7	5	2
		ЗРВ	1	1	4	11	8	5	2

Определим значение теоретических частот для ЗНР.

mт1 = 32 * [F(9,92) - F(5,81)] = 2

mт2 = 32 * [F(14,03) - F(9,92)] = 3

mт3 = 32 * [F(18,14) - F(14,03)] = 5

mт4 = 32 * [F(22,25) - F(18,14)] = 8

mт5 = 32 * [F(26,36) - F(22,25)] = 7

mт6 = 32 * [F(30,47) - F(26,36)] = 5

$\chi^2 = (2-2)^2/2+(3-3)^2/3 +(4-5)^2/5+(6-8)^2/8 +(8-7)^2/7 + (7-5)^2/ 5+(2-2)^2/2 = 1,64$

Продолжение приложения Ф

По таблице приложения определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2. Определим номер строки для выхода в таблицу

№стр = n_y – к; к = 3; n_y = 7,

№стр = 7 – 3 = 4.

Тогда: для ЗНР – Р% = 80,2%;

Определение доверительных границ рассеивания значений величин цветного числа.

Доверительные границы рассеивания среднего значения определяются по формуле:

$$\overline{h}_{\beta}^{H} = \overline{h} - t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\overline{h}_{\beta}^{B} = \overline{h} + t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\overline{h}_{\beta}^{H} = \bar{I} - t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\overline{h}_{\beta}^{B} = \bar{I} + t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$\overline{h}_{\beta}^{H}$ = 21,78 - 1,98 · 6,654/$\sqrt{32}$ = 19,38 мг йода;

Продолжение приложения Ф

$$\overline{h}_{\beta}^{\text{В}} = 21{,}78 + 1{,}98 \cdot 6{,}654/\sqrt{32} = 24{,}18 \text{ мг йода.}$$

С вероятностью β = 0,95 можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя находится в пределах от 19,38 до 24,18.

Определение статистической ошибки

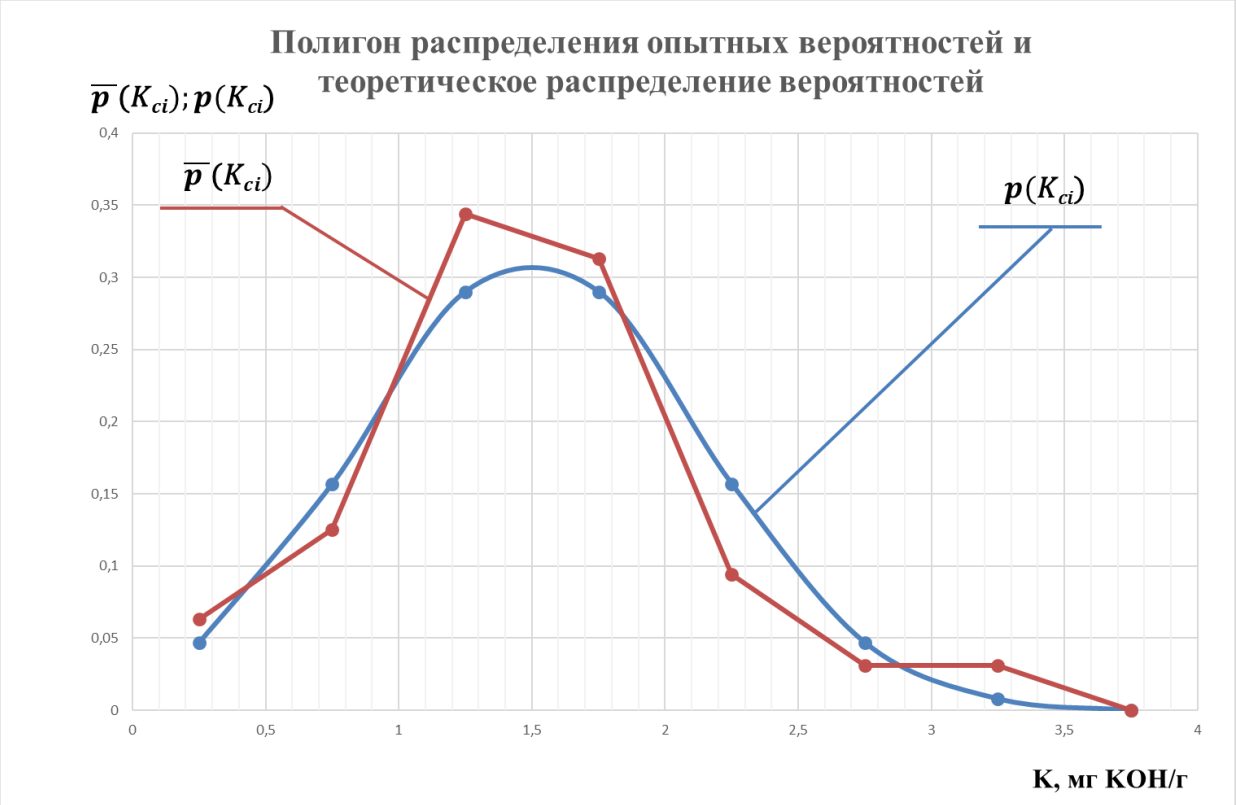
$$\varepsilon = \frac{h_{\beta 0} - \overline{h}}{\overline{h} - h_{\text{см}}} \cdot 100\%$$

$$\varepsilon_{\alpha} = (24{,}18 - 21{,}78) / (21{,}78 - 5{,}81) \cdot 100 = 15\ \%.$$

Точность расчётов вполне достаточна, так как по ГОСТу $\varepsilon_{\alpha} \leq 20\%$.

Продолжение приложения Ф

Результаты определения распределения величин кислотного числа растительного масла



Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.13 - Сводная ведомость кислотного числа подсолнечного растительного масла

№ п/п	кислотное число, мгКОН/г	№ п/п	кислотное число, мгКОН/г	№ п/п	кислотное число, мгКОН/г	№ п/п	кислотное число, мгКОН/г
1	0,03	9	1,15	17	1,4	25	1,88
2	0,21	10	1,15	18	1,64	26	1,91
3	0,77	11	1,16	19	1,69	27	1,97
4	0,86	12	1,24	20	1,7	28	2,03
5	0,95	13	1,3	21	1,78	29	2,1
6	0,98	14	1,32	22	1,79	30	2,14
7	1,02	15	1,32	23	1,8	31	2,77
8	1,03	16	1,36	24	1,85	32	3,03

Таблица Ф.14 - Статистический ряд

№ п/п	Граница интервала		Середина интервала	Опытная частота mi	Опытная вероятность	Накопленная опытная вероятность
1	0	0,5	0,25	2	0,063	0,063
2	0,5	1	0,75	4	0,125	0,188
3	1	1,5	1,25	11	0,344	0,532
4	1,5	2	1,75	10	0,313	0,845
5	2	2,5	2,25	3	0,094	0,939
6	2,5	3	2,75	1	0,031	0,97
7	3	3,5	3,25	1	0,031	1,001

Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.15 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

Граница интервала			0 … 0,5	0,5 … 1	1 … 1,5	1,5 … 2	2 … 2,5	2,5 … 3	3 … 3,5
Середина интервала			0,25	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75	3,25
Опытная частота, mi			2	4	11	10	3	1	1
Дифференциальный закон распределения	Опытная вероятность		0,063	0,125	0,344	0,313	0,094	0,031	0,031
	Теоретическая вероятность	НЗР	0,047	0,157	0,29	0,29	0,157	0,047	0,008
		ЗРВ	0,04	0,176	0,279	0,265	0,153	0,06	0,019
Интегральный закон распределения	Накопленная опытная вероятность		0,063	0,188	0,532	0,845	0,939	0,97	1,001
	Функция распределения	НЗР	0,06	0,22	0,51	0,79	0,94	0,99	1
		ЗРВ	0,02	0,16	0,5	0,84	0,96	1	1
Теоретическая частота m_{Ti}		НЗР	3	5	9	9	5	2	0
		ЗРВ	1	4	11	11	4	1	0

Определим значение теоретических частот для ЗНР.

mт1 = 32 * [F(0,5) - F(0)] = 3

mт2 = 32 * [F(1) - F(0,5)] = 5

mт3 = 32 * [F(1,5) - F(1)] = 9

mт4 = 32 * [F(2) - F(1,5)] = 9

mт5 = 32 * [F(2,5) - F(2)] = 5

mт6 = 32 * [F(3) - F(2,5)] = 2

Определим χ^2 для ЗНР

$$\chi^2 = (2-3)^2/3+(4-5)^2/5 +(11-9)^2/9+(10-9)^2/9 +(3-5)^2/5 + (1-2)^2/ 2+(1-0)^2/0 = 2,39$$

Продолжение приложения Ф

По таблице приложения определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2. Определим номер строки для выхода в таблицу

№стр = n_y – к; к = 3; n_y = 7,

№стр = 7 – 3 = 4.

Тогда: для ЗНР – Р% = 66,4%;

Определение доверительных границ рассеивания значений величин кислотного числа.

Доверительные границы рассеивания среднего значения определяются по формуле:

$$\overline{K}_\beta^H = \overline{K} - t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\overline{K}_\beta^B = \overline{K} + t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$\overline{K}_\beta^H$ = 1,49 - 1,98 · 0,637/$\sqrt{32}$ = 1,2603 мгКОН/г;

$\overline{K}_\beta^B$ = 1,49 + 1,98 · 0,637/ $\sqrt{32}$ = 1,7197 мгКОН/г.

С вероятностью β = 0,95 можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя находится в пределах от 1.2603 до 1.7197 .

Определение статистической ошибки

$$\varepsilon = \frac{K_{\beta 0} - \overline{K}}{\overline{K} - K_{\text{см}}} \cdot 100\%$$

ε_α = (1,7197 - 1,49) / (1,49 - 0) · 100 = 15,4 %.

Точность расчётов вполне достаточна, так как по ГОСТу $\varepsilon_\alpha \leq 20\%$.

Продолжение приложения Ф

Результаты определения распределения величин ингибиторов трипсина сои Соер 4

Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.16 - Сводная ведомость ингибитора трипсина сои Соер 4

№ п/п	ингиби-торы, мг/г	№ п/п	ингиби-торы, мг/г	№ п/п	ингиби-торы, мг/г	№ п/п	ингиби-торы, мг/г
1	42,32	9	44,17	17	45,77	25	47,29
2	42,85	10	44,69	18	45,87	26	47,45
3	42,87	11	44,87	19	45,98	27	47,68
4	43,12	12	45,06	20	46,14	28	47,71
5	43,17	13	45,2	21	46,71	29	47,74
6	43,21	14	45,29	22	46,92	30	48,08
7	43,31	15	45,29	23	47,04	31	48,09
8	43,94	16	45,68	24	47,05	32	48,72

Таблица Ф.17 - Статистический ряд

№, п/п	Граница интервала		Середина интервала	Опытная частота m_i	Опытная вероятность	Накопленная опытная вероятность
1	41,79	42,86	42,325	2	0,063	0,063
2	42,86	43,93	43,395	5	0,156	0,219
3	43,93	45	44,465	4	0,125	0,344
4	45	46,07	45,535	8	0,25	0,594
5	46,07	47,14	46,605	5	0,156	0,75
6	47,14	48,21	47,675	7	0,219	0,969
7	48,21	49,28	48,745	1	0,031	1

Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.18 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

Граница интервала			41,79 … 42,86	42,86 … 43,93	43,93 … 45	45 … 46,07	46,07 … 47,14	47,14 … 48,21	48,21 … 49,28
Середина интервала			42,325	43,395	44,465	45,535	46,605	47,675	48,745
Опытная частота, mi			2	5	4	8	5	7	1
Дифференциальный закон распределения	Опытная вероятность		0,063	0,156	0,125	0,25	0,156	0,219	0,031
	Теоретическая вероятность	НЗР	0,043	0,111	0,197	0,247	0,21	0,117	0,049
		ЗРВ	0,033	0,109	0,213	0,241	0,195	0,128	0,051
Интегральный закон распределения	Накопленная опытная вероятность		0,063	0,219	0,344	0,594	0,75	0,969	1
	Функция распределения	НЗР	0,06	0,17	0,36	0,61	0,81	0,93	0,98
		ЗРВ	0,02	0,1	0,27	0,63	0,84	0,95	1
Теоретическая частота m_{Ti}		НЗР	3	4	6	8	6	4	2
		ЗРВ	1	3	5	12	7	4	2

Определим значение теоретических частот для ЗНР.

mт1 = 32 * [F(42,86) - F(41,79)] = 3

mт2 = 32 * [F(43,93) - F(42,86)] = 4

mт3 = 32 * [F(45) - F(43,93)] = 6

mт4 = 32 * [F(46,07) - F(45)] = 8

mт5 = 32 * [F(47,14) - F(46,07)] = 6

mт6 = 32 * [F(48,21) - F(47,14)] = 4

mт7 = 32 * [F(49,28) - F(48,21)] = 2

Определим χ^2 для ЗНР

$\chi^2 = (2-3)^2/3+(5-4)^2/4 +(4-6)^2/6+(8-8)^2/8 +(5-6)^2/6 + (7-4)^2/ 4+(1-2)^2/2 = 4,17$

По таблице приложения определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2. Определим номер строки для выхода в таблицу

№стр = n_y – к; к = 3; n_y = 7,

№стр = 7 – 3 = 4.

Тогда: для ЗНР – Р% = 38,3%;

Определение доверительных границ рассеивания значений величин ингибитора трипсина.

Доверительные границы рассеивания среднего значения определяются по формуле:

$$\overline{H}_{\beta}^{H} = \overline{H} - t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\overline{H}_{\beta}^{\text{В}} = \overline{H} + t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$\overline{H}_{\beta}^{H}$ = 45,6 - 1,98 1,733/$\sqrt{32}$ = 44,975 мг/г;

$\overline{H}_{\beta}^{\text{В}}$ = 45,6 + 1,98 1,733/ $\sqrt{32}$ = 46,225 мг/г.

С вероятностью β = 0,95 можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя находится в пределах от 44,975 до 46,225.

Определение статистической ошибки

$$\varepsilon = \frac{H_{\beta 0} - \overline{H}}{\overline{H} - H_{\text{см}}} \cdot 100\%$$

ε_{α} = (46,225 - 45,6) / (45,6 - 41,79) · 100 = 16,4 %.

Точность расчётов вполне достаточна, так как по ГОСТу $\varepsilon_{\alpha} \leq 20\%$.

Продолжение приложения Ф

Результаты определения распределения величин ингибиторов трипсина сои Соер 5

Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.19 - Сводная ведомость ингибитора трипсина сои Соер 5

№ п/п	ингибиторы, мг/г	№ п/п	ингибиторы, мг/г	№ п/п	ингибиторы, мг/г	№ п/п	ингибиторы, мг/г
1	53,37	9	58,1	17	61,25	25	63,45
2	54,46	10	58,65	18	61,33	26	63,83
3	56,04	11	59,15	19	61,4	27	64,33
4	56,7	12	59,19	20	62,15	28	64,48
5	56,91	13	60,22	21	62,57	29	64,86
6	57,01	14	60,99	22	62,77	30	66,2
7	57,41	15	61,12	23	63,27	31	67,06
8	57,92	16	61,16	24	63,38	32	68,43

Таблица Ф.20 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

Граница интервала			52,12 … 54,63	54,63 … 57,14	57,14 … 59,65	59,65 … 62,16	62,16 … 64,67	64,67 … 67,18	67,18 … 69,69
Середина интервала			53,375	55,885	58,395	60,905	63,415	65,925	68,435
Опытная частота, mi			2	4	6	8	8	3	1
Дифференциальный закон распределения	Опытная вероятность		0,063	0,125	0,188	0,25	0,25	0,094	0,031
	Теоретическая вероятность	НЗР	0,034	0,116	0,225	0,273	0,211	0,102	0,027
		ЗРВ	0,034	0,113	0,221	0,246	0,202	0,1	0,052
Интегральный закон распределения	Накопленная опытная вероятность		0,063	0,188	0,376	0,626	0,876	0,97	1,001
	Функция распределения	НЗР	0,05	0,16	0,39	0,65	0,86	0,96	0,99
		ЗРВ	0,02	0,09	0,26	0,63	0,91	0,98	1
Теоретическая частота m_{Ti}		НЗР	2	4	7	8	7	3	1
		ЗРВ	1	2	5	12	9	2	1

Продолжение приложения Ф

Определим значение теоретических частот для ЗНР.

Для ЗНР:

mт1 = 32 * [F(54,63) - F(52,12)] = 2

mт2 = 32 * [F(57,14) - F(54,63)] = 4

mт3 = 32 * [F(59,65) - F(57,14)] = 7

mт4 = 32 * [F(62,16) - F(59,65)] = 8

mт5 = 32 * [F(64,67) - F(62,16)] = 7

mт6 = 32 * [F(67,18) - F(64,67)] = 3

mт7 = 32 * [F(69,69) - F(67,18)] = 1

Определим χ^2 для ЗНР

$$\chi^2 = (2-2)^2/2+(4-4)^2/4 +(6-7)^2/7+(8-8)^2/8 +(8-7)^2/7 + (3-3)^2/ 3+(1-1)^2/1 = 0,29$$

По таблице приложения определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2. Определим номер строки для выхода в таблицу

№стр = n_y – к; к = 3; n_y = 7,

№стр = 7 – 3 = 4.

Тогда: для ЗНР – Р% = 99%;

Определение доверительных границ рассеивания значений величин ингибитора трипсина.

Доверительные границы рассеивания среднего значения определяются по формуле:

$$\overline{H}_\beta^H = \overline{H} - t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\overline{H}_\beta^B = \overline{H} + t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$\overline{H}_{\beta}^{H}$ = 60,73 - 1,98 · 3,682/$\sqrt{32}$ = 59,402 мг/г;

$\overline{H}_{\beta}^{\text{В}}$ = 60,73 + 1,98 · 3,682/ $\sqrt{32}$ = 62,058 мг/г.

С вероятностью β = 0,95 можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя находится в пределах от 59,402 до 62,058 мг/г.

Определение статистической ошибки

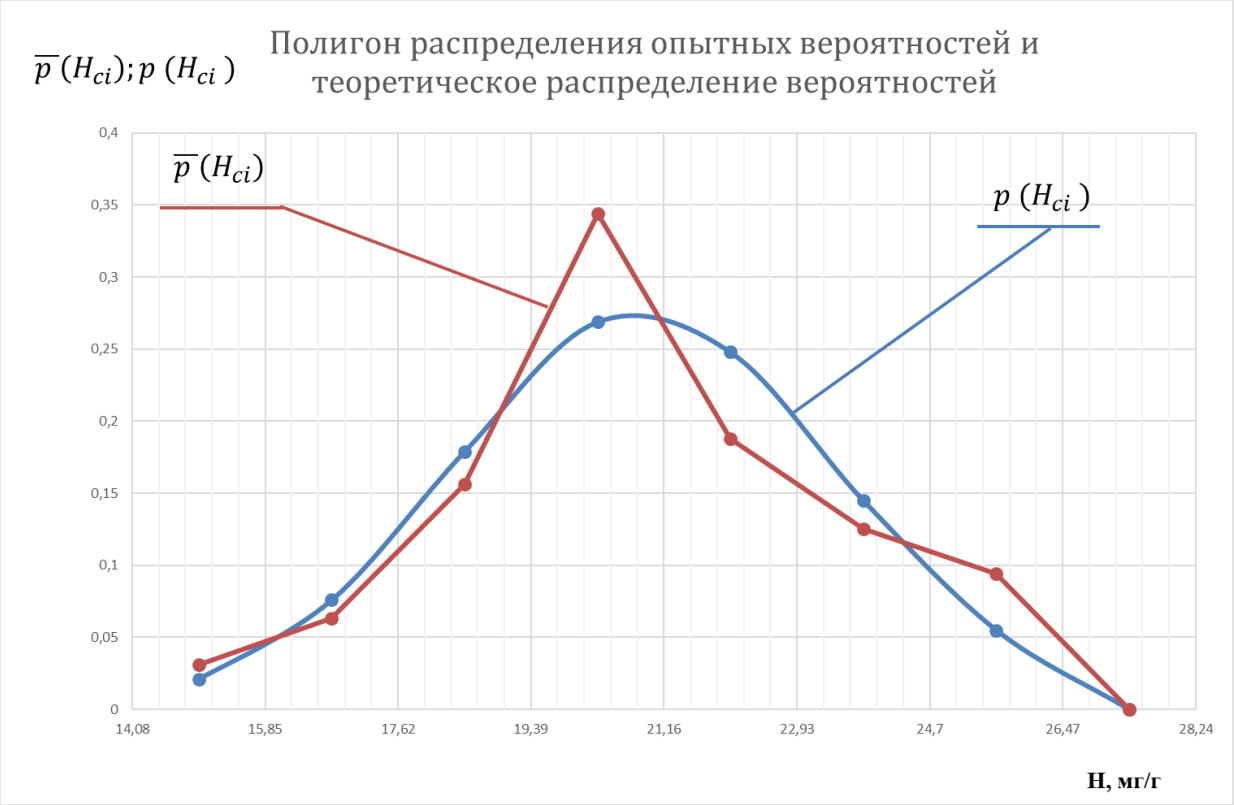
$$\varepsilon = \frac{H_{\beta 0} - \overline{H}}{\overline{H} - H_{\text{см}}} \cdot 100\%$$

ε_{α} = (62,058 - 60,73) / (60,73 - 52,12) · 100 = 15,4 %.

Точность расчётов вполне достаточна, так как по ГОСТу $\varepsilon_{\alpha} \leq 20\%$.

Продолжение приложения Ф

Результаты определения распределения величин ингибиторов трипсина сои Злата



Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.21 - Сводная ведомость ингибитора трипсина сои Злата

№ п/п	ингибиторы, мг/г	№ п/п	ингибиторы, мг/г	№ п/п	ингибиторы, мг/г	№ п/п	ингибиторы, мг/г
1	14,96	9	19,65	17	20,91	25	22,26
2	16,66	10	19,66	18	21,04	26	23,44
3	17,39	11	20,02	19	21,09	27	24,15
4	18,03	12	20,25	20	21,58	28	24,25
5	18,15	13	20,31	21	21,61	29	24,52
6	18,7	14	20,33	22	21,66	30	24,78
7	19,05	15	20,38	23	22,19	31	25,38
8	19,19	16	20,7	24	22,23	32	25,59

Таблица Ф.22 - Статистический ряд

№	Граница интервала		Середина интервала	Опытная частота mi	Опытная вероятность	Накопленная опытная вероятность
1	14,08	15,85	14,965	1	0,031	0,031
2	15,85	17,62	16,735	2	0,063	0,094
3	17,62	19,39	18,505	5	0,156	0,25
4	19,39	21,16	20,275	11	0,344	0,594
5	21,16	22,93	22,045	6	0,188	0,782
6	22,93	24,7	23,815	4	0,125	0,907
7	24,7	26,47	25,585	3	0,094	1,001

Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.23 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

Граница интервала			14,08 … 15,85	15,85 … 17,62	17,62 … 19,39	19,39 … 21,16	21,16 … 22,93	22,93 … 24,7	24,7 … 26,47
Середина интервала			14,965	16,735	18,505	20,275	22,045	23,815	25,585
Опытная частота, mi			1	2	5	11	6	4	3
Дифференциальный закон распределения	Опытная вероятность		0,031	0,063	0,156	0,344	0,188	0,125	0,094
	Теоретическая вероятность	НЗР	0,021	0,076	0,179	0,269	0,248	0,145	0,055
		ЗРВ	0,015	0,073	0,158	0,251	0,237	0,168	0,057
Интегральный закон распределения	Накопленная опытная вероятность		0,031	0,094	0,25	0,594	0,782	0,907	1,001
	Функция распределения	НЗР	0,02	0,1	0,28	0,54	0,79	0,93	0,99
		ЗРВ	0,01	0,03	0,13	0,49	0,76	0,93	1
Теоретическая частота m_{Ti}		НЗР	2	3	6	8	8	4	2
		ЗРВ	0	1	3	12	9	5	2

Определим значение теоретических частот для ЗНР.

mт1 = 32 * [F(15,85) - F(14,08)] = 2

mт2 = 32 * [F(17,62) - F(15,85)] = 3

mт3 = 32 * [F(19,39) - F(17,62)] = 6

mт4 = 32 * [F(21,16) - F(19,39)] = 8

mт5 = 32 * [F(22,93) - F(21,16)] = 8

mт6 = 32 * [F(24,7) - F(22,93)] = 4

mт7 = 32 * [F(26,47) - F(24,7)] = 2

Определим χ^2 для ЗНР

$$\chi^2 = (1-2)^2/2+(2-3)^2/3 +(5-6)^2/6+(11-8)^2/8 +(6-8)^2/8 + (4-4)^2/ 4+(3-2)^2/2 = 3,13$$

Продолжение приложения Ф

По таблице приложения определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2. Определим номер строки для выхода в таблицу

№стр = n_y – к; к = 3; n_y = 7,

№стр = 7 – 3 = 4.

Тогда: для ЗНР – Р% = 53,6%;

Определение доверительных границ рассеивания значений величин ингибитора трипсина.

Доверительные границы рассеивания среднего значения определяются по формуле:

$$\overline{H}_{\beta}^{H} = \overline{H} - t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

$$\overline{H}_{\beta}^{\text{В}} = \overline{H} + t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$\overline{H}_{\beta}^{H}$ = 20,91 - 1,98 · 2,566/$\sqrt{32}$ = 19,985 мг/г;

$\overline{H}_{\beta}^{\text{В}}$ = 20,91 + 1,98 · 2,566/ $\sqrt{32}$ = 21,835 мг/г.

С вероятностью β = 0,95 можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя находится в пределах от 19,985 до 21,835 мг/г.

Определение статистической ошибки

$$\varepsilon = \frac{H_{\beta 0} - \overline{H}}{\overline{H} - H_{\text{см}}} \cdot 100\%$$

ε_{α} = (21,835 - 20,91) / (20,91 - 14,08) · 100 = 13,5 %.

Точность расчётов вполне достаточна, так как по ГОСТу $\varepsilon_{\alpha} \leq 20\%$.

Продолжение приложения Ф

Результаты определения распределения величин ингибиторов трипсина сои Бара

Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.24 - Сводная ведомость определения ингибитора трипсина сои Бара

№ п/п	ингибиторы, мг/г	№ п/п	ингибиторы, мг/г	№ п/п	ингибиторы, мг/г	№ п/п	ингибиторы, мг/г
1	46,79	9	50,21	17	52,36	25	55,73
2	47,01	10	51,25	18	52,52	26	56,28
3	47,15	11	52,03	19	52,85	27	56,34
4	48,62	12	52,09	20	52,96	28	57,16
5	48,95	13	52,22	21	53,74	29	57,99
6	49,2	14	52,23	22	54,01	30	58,4
7	49,39	15	52,26	23	54,03	31	61,21
8	49,69	16	52,33	24	54,49	32	61,71

Таблица Ф.25 - Статистический ряд

№	**Граница интервала**		**Середина интервала**	**Опытная частота mi**	**Опытная вероятность**	**Накопленная опытная вероятность**
1	45,55	48,04	46,795	3	0,094	0,094
2	48,04	50,53	49,285	6	0,188	0,282
3	50,53	53,02	51,775	11	0,344	0,626
4	53,02	55,51	54,265	4	0,125	0,751
5	55,51	58	56,755	5	0,156	0,907
6	58	60,49	59,245	1	0,031	0,938
7	60,49	62,98	61,735	2	0,063	1,001

Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.26 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

Граница интервала			45,55 … 48,04	48,04 … 50,53	50,53 … 53,02	53,02 … 55,51	55,51 … 58	58 … 60,49	60,49 … 62,98
Середина интервала			46,795	49,285	51,775	54,265	56,755	59,245	61,735
Опытная частота, mi			3	6	11	4	5	1	2
Дифференциальный закон распределения	Опытная вероятность		0,094	0,188	0,344	0,125	0,156	0,031	0,063
	Теоретическая вероятность	НЗР	0,077	0,167	0,25	0,237	0,154	0,064	0,019
		ЗРВ	0,061	0,207	0,261	0,225	0,146	0,076	0,03
Интегральный закон распределения	Накопленная опытная вероятность		0,094	0,282	0,626	0,751	0,907	0,938	1,001
	Функция распределения	НЗР	0,11	0,28	0,52	0,76	0,91	0,98	1
		ЗРВ	0,04	0,2	0,52	0,82	0,96	1	1
Теоретическая частота m_{Ti}		НЗР	4	5	8	8	5	2	1
		ЗРВ	1	5	10	10	4	1	0

Определим значение теоретических частот для ЗНР

mт1 = 32 * [F(48,04) - F(45,55)] = 4

mт2 = 32 * [F(50,53) - F(48,04)] = 5

mт3 = 32 * [F(53,02) - F(50,53)] = 8

mт4 = 32 * [F(55,51) - F(53,02)] = 8

mт5 = 32 * [F(58) - F(55,51)] = 5

mт6 = 32 * [F(60,49) - F(58)] = 2

mт7 = 32 * [F(62,98) - F(60,49)] = 1

Определим χ^2 для ЗНР

$\chi^2 = (3-4)^2/4+(6-5)^2/5 +(11-8)^2/8+(4-8)^2/8 +(5-5)^2/5 + (1-2)^2/ 2+(2-1)^2/1 = 5,08$

Продолжение приложения Ф

По таблице приложения определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2. Определим номер строки для выхода в таблицу

№стр = n_y – к; к = 3; n_y = 7,

№стр = 7 – 3 = 4.

Тогда: для ЗНР – Р% = 27,9%;

Определение доверительных границ рассеивания значений величин ингибитора трипсина.

Доверительные границы рассеивания среднего значения определяются по формуле:

$$\overline{H}_{\beta}^{H} = \overline{H} - t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\overline{H}_{\beta}^{\text{В}} = \overline{H} + t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$\overline{H}_{\beta}^{H}$ = 52,84 - 1,98 · 3,886/$\sqrt{32}$ = 51,439 мг/г;

$\overline{H}_{\beta}^{\text{В}}$ = 52,84 + 1,98 · 3,886/ $\sqrt{32}$ = 54,241 мг/г.

С вероятностью β = 0,95 можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя находится в пределах от 51,439 до 54,241 мг/г.

Продолжение приложения Ф

Определение статистической ошибки

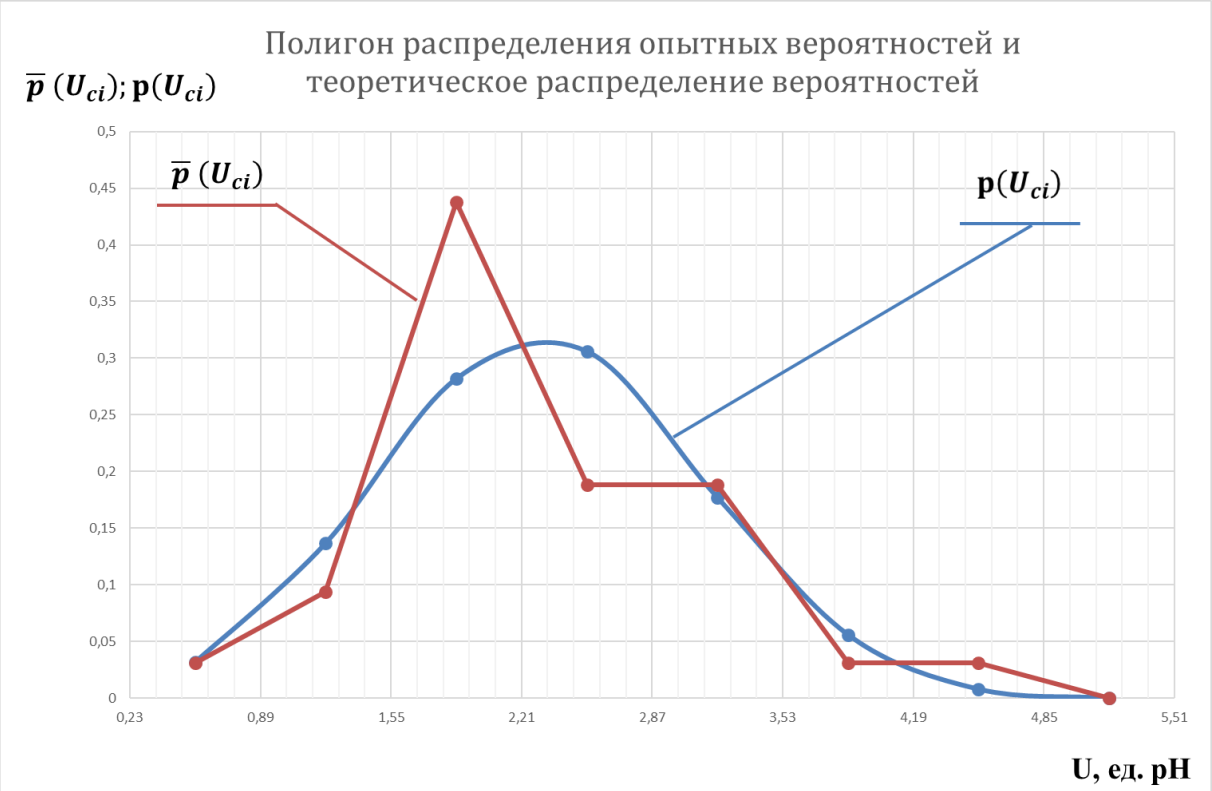
$$\varepsilon = \frac{H_{\beta 0} - \overline{H}}{\overline{H} - H_{\text{см}}} \cdot 100\%$$

$$\varepsilon_{\alpha} = (54{,}241 - 52{,}84) / (52{,}84 - 45{,}55) \cdot 100 = 19{,}2\ \%.$$

Точность расчётов вполне достаточна, так как по ГОСТу $\varepsilon_{\alpha} \leq 20\%$.

Продолжение приложения Ф

Результаты определения распределения величин уреазы сои Соер 4



Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.27 - Сводная ведомость определения показателей уреазы сои Соер 4

№ п/п	уреазы,ед. pH	№ п/п	уреазы,ед. pH	№ п/п	уреазы,ед. pH	№ п/п	уреазы,ед. pH
1	0,56	9	1,82	17	2,11	25	2,91
2	1,17	10	1,83	18	2,14	26	2,95
3	1,24	11	1,88	19	2,36	27	3,01
4	1,24	12	1,92	20	2,45	28	3,2
5	1,57	13	1,92	21	2,47	29	3,39
6	1,62	14	1,93	22	2,52	30	3,49
7	1,64	15	1,94	23	2,6	31	4
8	1,76	16	2,01	24	2,85	32	4,49

Таблица Ф.28 - Статистический ряд

№	Граница интервала		Середина интервала	Опытная частота mi	Опытная вероятность	Накопленная опытная вероятность
1	0,23	0,89	0,56	1	0,031	0,031
2	0,89	1,55	1,22	3	0,094	0,125
3	1,55	2,21	1,88	14	0,438	0,563
4	2,21	2,87	2,54	6	0,188	0,751
5	2,87	3,53	3,2	6	0,188	0,939
6	3,53	4,19	3,86	1	0,031	0,97
7	4,19	4,85	4,52	1	0,031	1,001

Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.29 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

Граница интервала			0,23 … 0,89	0,89 … 1,55	1,55 … 2,21	2,21 … 2,87	2,87 … 3,53	3,53 … 4,19	4,19 … 4,85
Середина интервала			0,56	1,22	1,88	2,54	3,2	3,86	4,52
Опытная частота, mi			1	3	14	6	6	1	1
Дифференциальный закон распределения	Опытная вероятность		0,031	0,094	0,438	0,188	0,188	0,031	0,031
	Теоретическая вероятность	НЗР	0,032	0,137	0,282	0,306	0,177	0,056	0,008
		ЗРВ	0,028	0,154	0,274	0,289	0,195	0,075	0,021
Интегральный закон распределения	Накопленная опытная вероятность		0,031	0,125	0,563	0,751	0,939	0,97	1,001
	Функция распределения	НЗР	0,04	0,18	0,45	0,76	0,93	0,99	1
		ЗРВ	0,02	0,08	0,36	0,76	0,97	0,99	1
Теоретическая частота m_{Ti}		НЗР	2	4	9	10	5	2	0
		ЗРВ	1	2	9	13	7	1	0

Определим значение теоретических частот для ЗНР.

mт1 = 32 * [F(0,89) - F(0,23)] = 2

mт2 = 32 * [F(1,55) - F(0,89)] = 4

mт3 = 32 * [F(2,21) - F(1,55)] = 9

mт4 = 32 * [F(2,87) - F(2,21)] = 10

mт5 = 32 * [F(3,53) - F(2,87)] = 5

mт6 = 32 * [F(4,19) - F(3,53)] = 2

mт7 = 32 * [F(4,85) - F(4,19)] = 0

Определим χ^2 для ЗНР

$\chi^2 = (1-2)^2/2+(3-4)^2/4 +(14-9)^2/9+(6-10)^2/10 +(6-5)^2/5 + (1-2)^2/ 2+(1-0)^2/0 = 5,83$

Продолжение приложения Ф

По таблице приложения определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2. Определим номер строки для выхода в таблицу

№стр = n_y – к; к = 3; n_y = 7,

№стр = 7 – 3 = 4.

Тогда: для ЗНР – Р% = 21,2%;

Определение доверительных границ рассеивания значений величин уреазы.

Доверительные границы рассеивания среднего значения определяются по формуле:

$$\overline{U}_{\beta}^{H} = \overline{U} - t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\overline{U}_{\beta}^{\text{В}} = \overline{U} + t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$\overline{U}_{\beta}^{H}$ = 2,3 - 1,98 · 0,82/$\sqrt{32}$ = 2,0043 ед.рН;

$\overline{U}_{\beta}^{\text{В}}$= 2,3 + 1,98 · 0,82/ $\sqrt{32}$ = 2,5957 ед.рН .

С вероятностью β = 0,95 можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя находится в пределах от 2,0043 до 2,5957 ед.рН.

Определение статистической ошибки

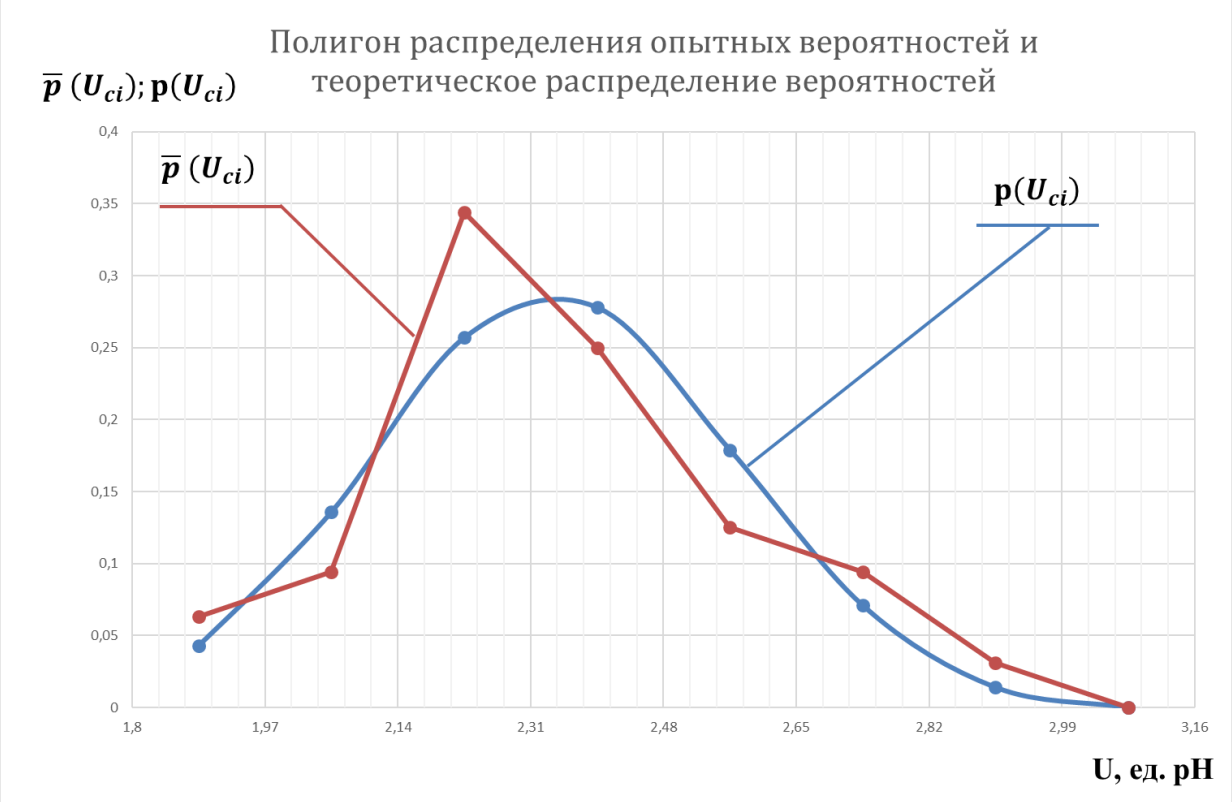
$$\varepsilon = \frac{U_{\beta 0} - \overline{U}}{\overline{U} - U_{\text{см}}} \cdot 100\%$$

$$\varepsilon_{\alpha} = (2{,}5957 - 2{,}3) / (2{,}3 - 0{,}23) \cdot 100 = 14{,}3\ \%.$$

Точность расчётов вполне достаточна, так как по ГОСТу $\varepsilon_{\alpha} \leq 20\%$.

Продолжение приложения Ф

Результаты определения распределения величин уреазы сои Соер 5



Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.30 - Сводная ведомость определения показателей уреазы сои Соер 5

№ п/п	уреазы,ед. pH	№ п/п	уреазы,ед. pH	№ п/п	уреазы,ед. pH	№ п/п	уреазы,ед. pH
1	1,88	9	2,18	17	2,31	25	2,5
2	1,94	10	2,18	18	2,36	26	2,54
3	2,01	11	2,21	19	2,4	27	2,54
4	2,09	12	2,23	20	2,44	28	2,57
5	2,09	13	2,25	21	2,46	29	2,67
6	2,15	14	2,26	22	2,47	30	2,69
7	2,16	15	2,27	23	2,47	31	2,8
8	2,16	16	2,3	24	2,47	32	2,89

Таблица Ф.31 - Статистический ряд

№	Граница интервала		Середина интервала	Опытная частота mi	Опытная вероятность	Накопленная опытная вероятность
1	1,8	1,97	1,885	2	0,063	0,063
2	1,97	2,14	2,055	3	0,094	0,157
3	2,14	2,31	2,225	11	0,344	0,501
4	2,31	2,48	2,395	8	0,25	0,751
5	2,48	2,65	2,565	4	0,125	0,876
6	2,65	2,82	2,735	3	0,094	0,97
7	2,82	2,99	2,905	1	0,031	1,001

Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.32 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

Граница интервала			1,8 … 1,97	1,97 … 2,14	2,14 … 2,31	2,31 … 2,48	2,48 … 2,65	2,65 … 2,82	2,82 … 2,99
Середина интервала			1,885	2,055	2,225	2,395	2,565	2,735	2,905
Опытная частота, mi			2	3	11	8	4	3	1
Дифференциальный закон распределения	Опытная вероятность		0,063	0,094	0,344	0,25	0,125	0,094	0,031
	Теоретическая вероятность	НЗР	0,043	0,136	0,257	0,278	0,179	0,071	0,014
		ЗРВ	0,037	0,164	0,237	0,264	0,181	0,079	0,027
Интегральный закон распределения	Накопленная опытная вероятность		0,063	0,157	0,501	0,751	0,876	0,97	1,001
	Функция распределения	НЗР	0,06	0,2	0,44	0,72	0,9	0,98	1
		ЗРВ	0,02	0,1	0,38	0,75	0,91	0,99	1
Теоретическая частота m_{Ti}		НЗР	3	4	8	9	6	3	1
		ЗРВ	1	3	9	12	5	3	0

Определим значение теоретических частот для ЗНР и ЗРВ.

mт1 = 32 * [F(1,97) - F(1,8)] = 3

mт2 = 32 * [F(2,14) - F(1,97)] = 4

mт3 = 32 * [F(2,31) - F(2,14)] = 8

mт4 = 32 * [F(2,48) - F(2,31)] = 9

mт5 = 32 * [F(2,65) - F(2,48)] = 6

mт6 = 32 * [F(2,82) - F(2,65)] = 3

mт7 = 32 * [F(2,99) - F(2,82)] = 1

Определим χ^2 для ЗНР

$$\chi^2 = (2-3)^2/3+(3-4)^2/4 +(11-8)^2/8+(8-9)^2/9 +(4-6)^2/6 + (3-3)^2/ 3+(1-1)^2/1 = 2,49$$

Продолжение приложения Ф

По таблице приложения определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2. Определим номер строки для выхода в таблицу

№стр = n_y – к; к = 3; n_y = 7,

№стр = 7 – 3 = 4.

Тогда: для ЗНР – Р% = 64,6%;

Определение доверительных границ рассеивания значений величин уреазы

Доверительные границы рассеивания среднего значения определяются по формуле:

$$\overline{U}_{\beta}^{H} = \overline{U} - t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\overline{U}_{\beta}^{\text{В}} = \overline{U} + t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$\overline{U}_{\beta}^{H}$ = 2,34 - 1,98 · 0,238/$\sqrt{32}$ = 2,2542 ед.рН;

$\overline{U}_{\beta}^{\text{В}}$ = 2,34 + 1,98 · 0,238/ $\sqrt{32}$ = 2,4258 ед.рН.

С вероятностью β = 0,95 можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя находится в пределах от 2,2542 до 2,4258 ед.рН.

Определение статистической ошибки

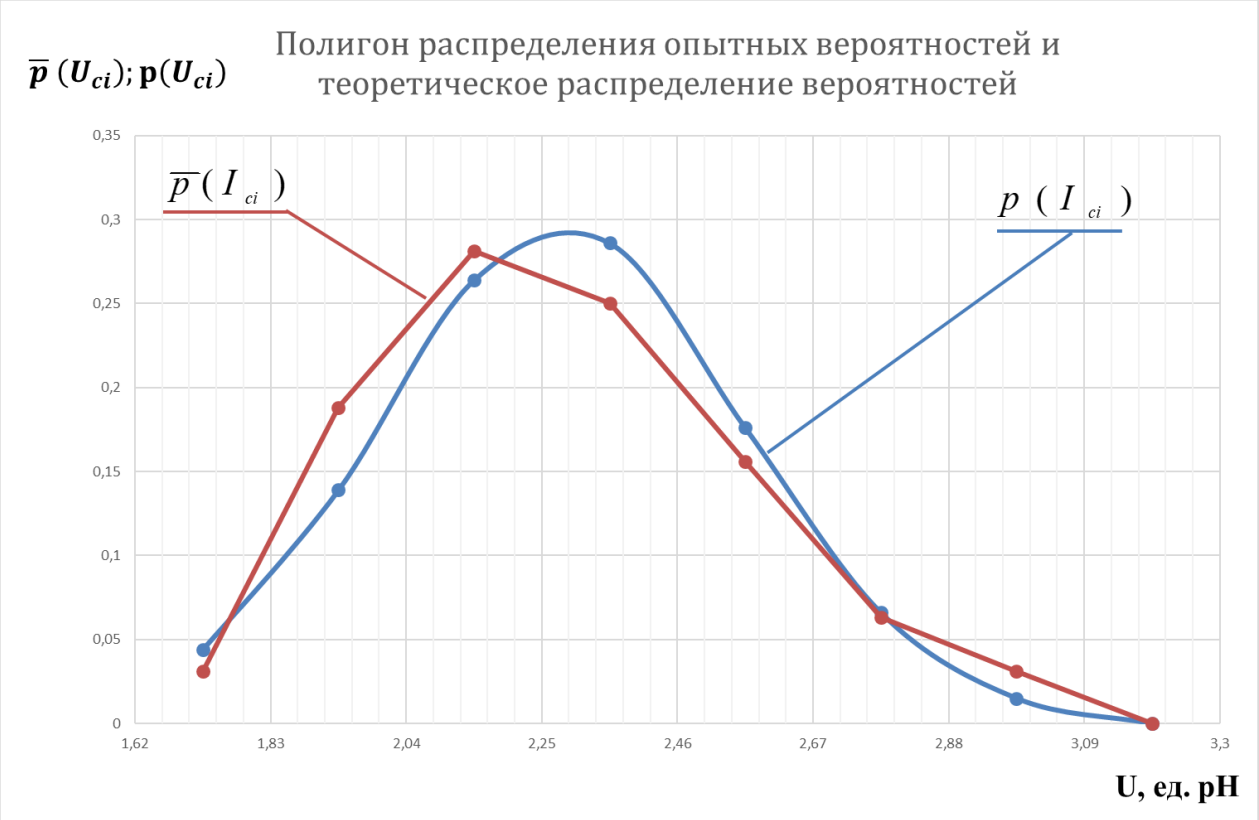
$$\varepsilon = \frac{U_{\beta 0} - \overline{U}}{\overline{U} - U_{\text{см}}} \cdot 100\%$$

ε_{α} = (2,4258 - 2,34) / (2,34 - 1,8) · 100 = 15,9 %.

Точность расчётов вполне достаточна, так как по ГОСТу $\varepsilon_{\alpha} \leq 20\%$.

Продолжение приложения Ф

Результаты определения распределения величин уреазы сои Злата



Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.33 - Сводная ведомость определения показателей уреазы сои Злата

№ п/п	уреазы, ед. pH	№ п/п	уреазы, ед. pH	№ п/п	уреазы, ед. pH	№ п/п	уреазы, ед. pH
1	1,72	9	2,12	17	2,25	25	2,48
2	1,94	10	2,12	18	2,28	26	2,48
3	1,95	11	2,13	19	2,29	27	2,49
4	1,97	12	2,15	20	2,35	28	2,53
5	1,99	13	2,16	21	2,37	29	2,57
6	1,99	14	2,16	22	2,38	30	2,71
7	2	15	2,21	23	2,41	31	2,71
8	2,07	16	2,22	24	2,44	32	3

Таблица Ф.34 - Статистический ряд

№	Граница интервала		Середина интервала	Опытная частота mi	Опытная вероятность	Накопленная опытная вероятность
1	1,62	1,83	1,725	1	0,031	0,031
2	1,83	2,04	1,935	6	0,188	0,219
3	2,04	2,25	2,145	9	0,281	0,5
4	2,25	2,46	2,355	8	0,25	0,75
5	2,46	2,67	2,565	5	0,156	0,906
6	2,67	2,88	2,775	2	0,063	0,969
7	2,88	3,09	2,985	1	0,031	1

Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.35 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

Граница интервала			1,62 … 1,83	1,83 … 2,04	2,04 … 2,25	2,25 … 2,46	2,46 … 2,67	2,67 … 2,88	2,88 … 3,09
Середина интервала			1,725	1,935	2,145	2,355	2,565	2,775	2,985
Опытная частота, mi			1	6	9	8	5	2	1
Дифференциальный закон распределения	Опытная вероятность		0,031	0,188	0,281	0,25	0,156	0,063	0,031
	Теоретическая вероятность	НЗР	0,044	0,139	0,264	0,286	0,176	0,066	0,015
		ЗРВ	0,037	0,167	0,264	0,269	0,184	0,081	0,027
Интегральный закон распределения	Накопленная опытная вероятность		0,031	0,219	0,5	0,75	0,906	0,969	1
	Функция распределения	НЗР	0,06	0,2	0,45	0,74	0,91	0,98	1
		ЗРВ	0,02	0,09	0,37	0,75	0,96	0,99	1
Теоретическая частота m_{Ti}		НЗР	3	4	8	9	5	2	1
		ЗРВ	1	2	9	12	7	1	0

Определим значение теоретических частот для ЗНР .

mт1 = 32 * [F(1,83) - F(1,62)] = 3

mт2 = 32 * [F(2,04) - F(1,83)] = 4

mт3 = 32 * [F(2,25) - F(2,04)] = 8

mт4 = 32 * [F(2,46) - F(2,25)] = 9

mт5 = 32 * [F(2,67) - F(2,46)] = 5

mт6 = 32 * [F(2,88) - F(2,67)] = 2

mт7 = 32 * [F(3,09) - F(2,88)] = 1

Определим χ^2 для ЗНР

$\chi^2 = (1-3)^2/3+(6-4)^2/4 +(9-8)^2/8+(8-9)^2/9 +(5-5)^2/5 + (2-2)^2/ 2+(1-1)^2/1 = 2,57$

Продолжение приложения Ф

По таблице приложения определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2. Определим номер строки для выхода в таблицу

№стр = n_y – к; к = 3; n_y = 7,

№стр = 7 – 3 = 4.

Тогда: для ЗНР – Р% = 63,2%;

Определение доверительных границ рассеивания значений величин уреазы

Доверительные границы рассеивания среднего значения определяются по формуле:

$$\overline{U}_{\beta}^{H} = \overline{U} - t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\overline{U}_{\beta}^{\text{В}} = \overline{U} + t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$\overline{U}_{\beta}^{H}$ 2,28 - 1,98 · 0,286/$\sqrt{32}$ = 2,1769 ед.рН;

$\overline{U}_{\beta}^{\text{В}}$= 2,28 + 1,98 · 0,286/ $\sqrt{32}$ = 2,3831 ед.рН.

С вероятностью β = 0,95 можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя находится в пределах от 2,1769 до 2,3831 ед.рН.

Определение статистической ошибки

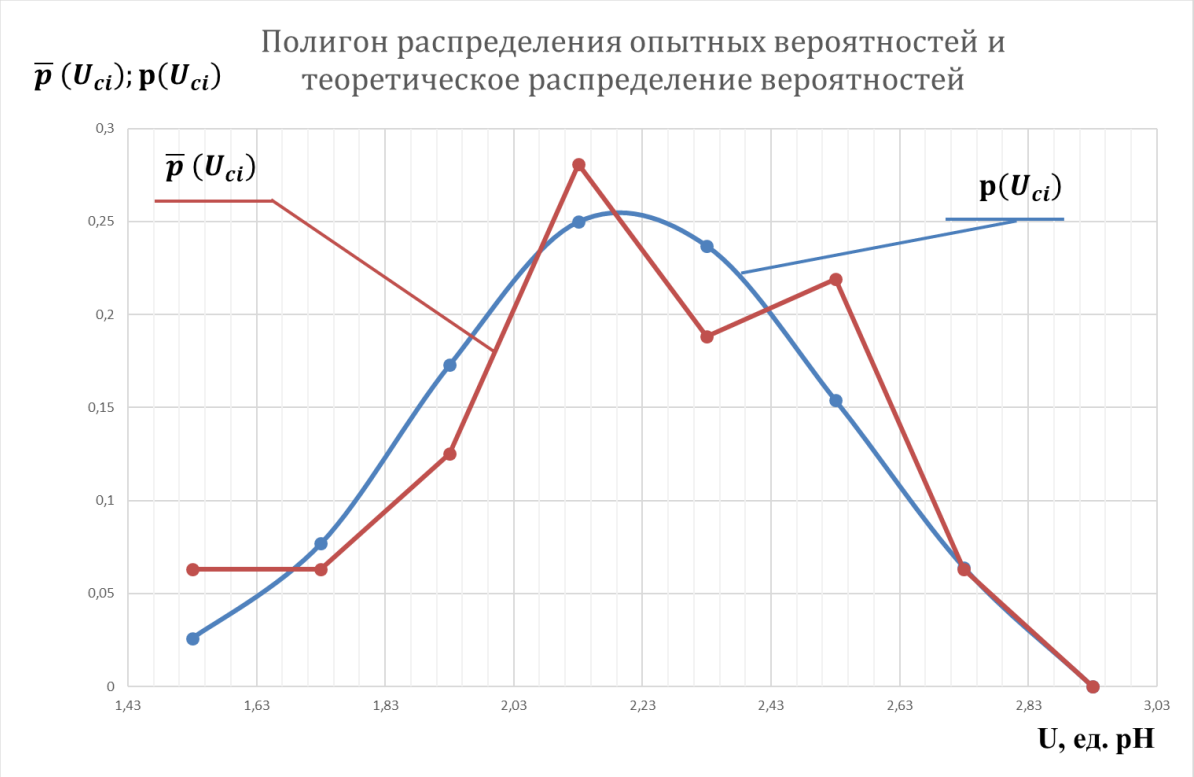
$$\varepsilon = \frac{U_{\beta 0} - \overline{U}}{\overline{U} - U_{\text{см}}} \cdot 100\% \cdot$$

ε_{α} = (2,3831 - 2,28) / (2,28 - 1,62) · 100 = 15,6 %.

Точность расчётов вполне достаточна, так как по ГОСТу $\varepsilon_{\alpha} \leq 20\%$.

Продолжение приложения Ф

Результаты определения распределения величин уреазы сои Бара



Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.36 - Сводная ведомость определения показателей уреазы сои Бара

№ п/п	Уреазы, ед. pH	№ п/п	Уреазы ,ед. pH	№ п/п	Уреазы ,ед. pH	№ п/п	Уреазы ,ед. pH
1	1,53	9	2,09	17	2,21	25	2,46
2	1,59	10	2,09	18	2,26	26	2,47
3	1,77	11	2,13	19	2,29	27	2,52
4	1,81	12	2,14	20	2,29	28	2,59
5	1,93	13	2,14	21	2,36	29	2,6
6	2,01	14	2,14	22	2,36	30	2,61
7	2,02	15	2,19	23	2,39	31	2,68
8	2,02	16	2,19	24	2,45	32	2,71

Таблица Ф.37 - Статистический ряд

№	Граница интервала		Середина интервала	Опытная частота mi	Опытная вероятность	Накопленная опытная вероятность
1	1,43	1,63	1,53	2	0,063	0,063
2	1,63	1,83	1,73	2	0,063	0,126
3	1,83	2,03	1,93	4	0,125	0,251
4	2,03	2,23	2,13	9	0,281	0,532
5	2,23	2,43	2,33	6	0,188	0,72
6	2,43	2,63	2,53	7	0,219	0,939
7	2,63	2,83	2,73	2	0,063	1,002

Продолжение приложения Ф

Таблица Ф.38 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

Граница интервала			1,43 … 1,63	1,63 … 1,83	1,83 … 2,03	2,03 … 2,23	2,23 … 2,43	2,43 … 2,63	2,63 … 2,83
Середина интервала			1,53	1,73	1,93	2,13	2,33	2,53	2,73
Опытная частота, mi			2	2	4	9	6	7	2
Дифференциальный закон распределения	Опытная вероятность		0,063	0,063	0,125	0,281	0,188	0,219	0,063
	Теоретическая вероятность	НЗР	0,026	0,077	0,173	0,25	0,237	0,154	0,064
		ЗРВ	0,022	0,085	0,161	0,22	0,217	0,157	0,087
Интегральный закон распределения	Накопленная опытная вероятность		0,063	0,126	0,251	0,532	0,72	0,939	1,002
	Функция распределения	НЗР	0,03	0,11	0,28	0,52	0,76	0,91	0,98
		ЗРВ	0,02	0,04	0,15	0,5	0,76	0,92	0,99
Теоретическая частота m_{Ti}		НЗР	2	3	5	8	8	5	2
		ЗРВ	1	1	4	11	8	5	2

Определим значение теоретических частот для ЗНР.

mт1 = 32 * [F(1,63) - F(1,43)] = 2

mт2 = 32 * [F(1,83) - F(1,63)] = 3

mт3 = 32 * [F(2,03) - F(1,83)] = 5

mт4 = 32 * [F(2,23) - F(2,03)] = 8

mт5 = 32 * [F(2,43) - F(2,23)] = 8

mт6 = 32 * [F(2,63) - F(2,43)] = 5

mт7 = 32 * [F(2,83) - F(2,63)] = 2

Определим χ^2 для ЗНР

$\chi^2 = (2-2)^2/2+(2-3)^2/3 +(4-5)^2/5+(9-8)^2/8 +(6-8)^2/8 + (7-5)^2/ 5+(2-2)^2/2 = 1,96$

Продолжение приложения Ф

По таблице приложения определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2. Определим номер строки для выхода в таблицу

№стр = n_y – к; к = 3; n_y = 7,

№стр = 7 – 3 = 4.

Тогда: для ЗНР – Р% = 74,3%;

Определение доверительных границ рассеивания значений величин уреазы

Доверительные границы рассеивания среднего значения определяются по формуле:

$$\overline{U}_{\beta}^{H} = \overline{U} - t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\overline{U}_{\beta}^{\text{В}} = \overline{U} + t_{\beta}\frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$\overline{U}_{\beta}^{H}$ = 2,21 - 1,98 · 0,312/$\sqrt{32}$ = 2,0975 ед.рН;

$\overline{U}_{\beta}^{\text{В}}$= 2,21 + 1,98 · 0,312/ $\sqrt{32}$ = 2,3225 ед.рН.

С вероятностью β = 0,95 можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя находится в пределах от 2.0975 до 2.3225 ед.рН.

Определение статистической ошибки

$$\varepsilon = \frac{U_{\beta 0} - \overline{U}}{\overline{U} - U_{\text{см}}} \cdot 100\% \cdot$$

ε_{α} = (2,3225 - 2,21) / (2,21 - 1,43) · 100 = 14,4 %.

Точность расчётов вполне достаточна, так как по ГОСТу $\varepsilon_{\alpha} \leq 20\%$.