

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова**

**На правах рукописи**

**СЕМИЛЕТ Никита Александрович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДГОТОВКИ ЗЕРНА К  
ПОМОЛУ ВЛАЖНОЙ ОБРАБОТКОЙ С УЛЬТРАЗВУКОВОЙ  
ИНТЕНСИФИКАЦИЕЙ ПРОЦЕССА**

**Специальность: 05.20.01 – Технологии и  
средства механизации сельского хозяйства**

**Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:  
д.т.н., профессор РУДИК Ф.Я.**

**Саратов – 2017**

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1 Биологическое строение зерна.....	10
1.2 Состояние и перспективы повышения качества муки.....	12
1.3 Технологические свойства зерна.....	13
1.4 Гидротермическая обработка зерна.....	18
1.5 Очистка зерна от минеральных отложений и микронасекомых.....	21
1.6 Современные технологии подготовки зерна к помолу.....	24
1.6.1 Способы гидротермической обработки зерна.....	26
1.6.2 Технологические особенности операций подготовки зерна к помолу.....	33
1.6.3 Средства механизации технологии подготовки зерна к помолу.....	36
1.6.4 Методы интенсификации очистки поверхности зерна и повышения проницаемости биологических систем.....	40
1.7 Выводы.....	43
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ В УСТАНОВКЕ ДЛЯ ОЧИСТКИ И ОТВОЛАЖИВАНИЯ ЗЕРНА В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ.....	45
2.1 Теоретический анализ механизма очистки зерна, разрушения его оболочки и отволаживания.....	45
2.2 Исследование и обоснование ультразвуковых параметров обработки зерна.....	49
2.2.1 Анализ гидролиза в ультразвуковом поле.....	49
2.2.2 Обоснование частоты ультразвуковых колебаний при подготовке зерна к помолу.....	51
2.2.3 Обоснование температурных параметров.....	55
2.3 Обоснование конструктивных параметров установки для очистки и отволаживания зерна.....	56

2.3.1 Обоснование условий распространения ультразвуковых волн в воде.....	56
2.3.2 Обоснование расположения ультразвуковых преобразователей с учетом линейных размеров камеры озвучивания и производительности установки.....	60
2.3.3 Обоснование объема воднозерновой смеси.....	62
2.4 Выводы.....	64
3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	66
3.1 Общая методика экспериментальных исследований.....	66
3.2 Методика и средства лабораторных исследований.....	68
3.3 Методика лабораторных исследований физико-механических свойств зерна.....	69
3.3.1 Методика определения зольности зерна.....	69
3.3.2 Методика определения влажности зерна.....	70
3.3.3 Методика определения качества и количества клейковины.....	71
3.3.4 Методика определения микротвердости зерна.....	71
3.3.5 Методика определения количества белка.....	71
3.4 Методика определения абсолютного количества минеральных загрязнений на поверхности зерна.....	72
3.5 Методика определения связанной воды в зерне.....	74
3.6 Методика определения коэффициента внутреннего влагопереноса.....	74
3.7 Описание лабораторной установки: факторы, определяющие технологический процесс и уровни их варьирования.....	75
3.8 Выводы.....	76
4 КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ И ОТВОЛАЖИВАНИЯ ЗЕРНА И ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ .....	77
4.1 Обоснование конструкции установки.....	77
4.2 Расчет конструктивных параметров транспортирующего шнека и мощности двигателя для привода конвейера.....	83

4.3 Исследование показателей зерна, прошедшего обработку в обочной машине.....	84
4.3.1 Результаты микроаналитического исследования загрязненности оболочки зерна.....	84
4.3.2 Результаты исследования зольности зерна.....	86
4.3.3 Результаты исследования прочностных свойств зерна.....	87
4.3.4 Результаты исследования показателей влажности зерна.....	89
4.3.5 Результаты исследования показателей клейковины в зерне.....	91
4.4 Исследование рабочего процесса и обоснование режимов работы ультразвуковой установки.....	92
4.4.1 Исследование изменения суммарной площади загрязненности оболочки зерна.....	93
4.4.2 Исследование физико-химических свойств зерна, прошедшего ультразвуковую обработку.....	95
4.5 Продуктовая эффективность предлагаемого способа подготовки зерна к помолу.....	106
4.6 Математическое моделирование процесса подготовки зерна к помолу.....	113
4.7 Выводы.....	117
5 ТЕХНИКО – ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	119
5.1 Показатели использования труда и его производительности.....	123
5.2 Ожидаемый экономический эффект от применения ультразвуковой установки для подготовки зерна к помолу.....	126
5.3 Выводы.....	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	131
ПРИЛОЖЕНИЯ	

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях жесткой конкуренции в мукомольной отрасли агропромышленного комплекса страны и продиктованных санкциями недружелюбных государств условий, остро встал вопрос о необходимости импортозамещения технологий и технических средств, в том числе для переработки зерна.

Для производства качественной муки необходимо соблюдение нескольких прерогативных условий - это использование для переработки зерна с высокими показателями кондиции, применение высокоэффективных технологий и пооперационного оборудования, дающих возможность получения требуемых показателей. Технология производства муки состоит из многократного измельчения и просеивания продукта в размольном отделении. Исходя из этого следует, что в первую очередь качество муки зависит от важнейшей операции технологического процесса, заключающегося в очистке зерна перед помолом. При очистке от зерна отделяют мелкие частицы, сорные, зерновые, минеральные и механические примеси. В соответствии с ГОСТом 9353 [1] в зерне, подготовленном для помола допускается не более 1% примесей. Это и является определяющим фактором технологической ответственности процесса очистки зерна.

Актуальность процесса подготовки зерна к помолу обусловлена не только необходимостью очистки его поверхности от измельченных оболочек и высокозольных прочных и трудноотделяемых пылевых образований, которые темнят и снижают сортность муки, но и проведения дополнительной гидротермической обработки, улучшающей исходные технологические свойства зерна.

При крупнотоннажном производстве в основном используется высокоэффективное импортное оборудование для подготовки зерна к помолу. Для мельниц малой производительности, а они перерабатывают в стране муку и крупы до 5 миллионов тонн зерна в год, они не приемлемы. Это ведет к

производству муки не стабильного качества, так как используются упрощенные технологии сухой очистки, а качество муки более чем на 50% зависит от подготовительных операций [2].

Существующий технологический процесс подготовки зерна к помолу основан на использовании порядка 30 наименований оборудования, емкостей для отволаживания с длительностью процесса до 36 часов. Все это усложняет и удороживает производство муки [3-9]. Следовательно, задача повышения эффективности подготовки зерна к помолу путем совершенствования технологии и разработки нового высокопроизводительного оборудования актуальна, решение которой имеет важное значение для мукомольной отрасли страны.

Работа выполнялась в соответствии с комплексной программой развития биотехнологии в РФ «№1853 П-П8 от 24 апреля 2012 года, а также направлением Саратовского государственного аграрного университета №01201151793. «Ресурсосберегающие технологии безопасных пищевых технологий».

**Степень разработанности темы.** Закономерности процесса взаимодействия зерна с водой исследовались такими отечественными учеными как Егоров Г.А., Щербаков В.Г., Казаков Е.Д., Кретович В.П., Гинзбург А.С., Медведев П.В. и др. [10-16]. Вопросы механической очистки и мойки зерна при его подготовке к хранению и помолу рассмотрены в работах Н.Е. Авдеева, В.И. Орбинского, В.Г. Артемьева, Г.Д. Кавецкого, Х.Х. Губейдуллина и многих других авторов. Теоретическому взаимодействию жидкой среды с обрабатываемыми объектами электрофизическими методами посвящены работы Cook S.S., Parson C.A., Kornfeld M., Suvorov H., Haller P., А.М. Фрид, А.А. Седрахана, Г.А. Остроумова, В. А. Константинова, Я.И. Френкеля и др. [17-26]. Опираясь на исследования практического использования ультразвука при обработке сельскохозяйственного сырья В.Н. Хмелева, Г. Флина, В.Б. Акопяна, Ф.Я. Рудика [27-32], в работе представлен материал по высокопроизводительной очистке и отволаживанию зерна при его подготовке к помолу.

**Цель работы.** Повышение эффективности подготовки зерна к помолу с ультразвуковой интенсификацией процесса и обоснование ее конструктивно-режимных параметров технических средств.

**Задачи исследований:**

1. На основе анализа существующих технологий и технических средств подготовки зерна к помолу с физико-химическими показателями результатов его обработки установить основные конструктивно-режимные направления интенсификации процессов для его очистки и отволаживания;
2. Теоретически исследовать и обосновать процесс и конструктивно-режимные параметры ультразвуковой установки для влажной очистки и отволаживания зерна при его подготовке к помолу;
3. Экспериментально исследовать физико-химические параметры процессов подготовки зерна к помолу. Установить математическую зависимость характера взаимодействия очищаемой и отволаживаемой поверхности зерна в акустических микропотоках ультразвуковой среды;
4. Исследовать режимы работы разработанной ультразвуковой установки и технологического процесса подготовки зерна к помолу и определить их технико-экономическую эффективность.

**Объект исследований.** Процессы взаимодействия зерна с влагой при его очистке и отволаживания в среде ультразвука.

**Предмет исследований.** Закономерности влияния конструктивно-режимных параметров на интенсивность обработки зерна в ультразвуковой установке.

**Научная новизна** работы заключается в:

- заключается в изучении особенностей загрязненности зерна в зависимости от анатомического строения и в выявлении закономерностей интенсификации процесса их взаимодействия с микроакустическими течениями воды при очистке и отволаживании в ультразвуковой установке;

- установлении зависимости повышения критериальных нормативных помольных показателей зерна от режимных составляющих технологических

операций, позволивших установить математическую модель оптимальных значений параметров процесса очистки и увлажнения;

- разработке и апробации нового микроаналитического метода оценки загрязненности зерна и качества его очистки.

### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

Физико-химическими исследованиями установлено недостаточное качество подготовки зерна к простому помолу по нормируемым параметрам зольности, твердости эндосперма, влажности и содержания клейковины, объясняемое используемыми в производстве упрощенными технологиями сухой очистки в обочных машинах и увлажнения методом холодного кондиционирования.

Теоретически исследована и подтверждена в экспериментальных и опытно-промышленных условиях целесообразность и эффективность разработанной технологии очистки и отволаживания зерна при его подготовке к помолу в ультразвуковой среде.

Установлены конструктивно-режимные параметры установки с использованием предложенных технических средств и технологии, обеспечивающих получение нормативных стабильных помольных показателей зерна.

**Методология и методы исследования.** Теоретические исследования базировались на положениях и методах исследования биохимии зерна, гидромеханики, физики, теории вероятности и современных компьютерных методов ведения и планирования экспериментов с оценкой достоверности результатов исследования, разработанных частных методик. Экспериментальные исследования выполнялись по методикам, установленным действующими ГОСТами и ОСТами на реальных образцах зерна, обработанного не действующей макетной оснастке в лабораторных и производственных условиях. Полученные результаты обработаны методами математической статистики с использованием стандартных программ.

**Положения выносимые на защиту:**

- результаты теоретических исследований закономерностей технологии очистки и отволаживания зерна при его подготовке к помолу с интенсификацией процесса ультразвуковыми акустическими микропотоками;
- математическая модель, описывающая характер взаимодействия очищаемого и отволаживаемого зерна в зависимости от режимных показателей технологического процесса обработки зерна в ультразвуковой установке, результаты микроаналитического метода оценки загрязненности зерна;
- результаты экспериментальных исследований конструктивных параметров опытно-конструкторской установки и режимов работы при подготовке зерна к помолу, обеспечивающие повышение качества обработки и эффективности технологии.

**Степень достоверности и апробации результатов** обеспечены высокой сходимостью данных теоретических и экспериментальных исследований, проведением испытаний установки и технологии в лабораторных и производственных условиях.

Основные научные положения, выводы, практические рекомендации доложены и одобрены: на научно-практических конференциях ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ» (Саратов 2014, 2015, 2016 г.г.); на международных научно-практических конференциях «Технология и продукты здорового питания» (Саратов 2014, 2015, 2016г.г.); на НТС секции «Технология хранения и переработки сельскохозяйственной продукции» Министерства сельского хозяйства Саратовской области в 2017 году.

По результатам исследований опубликовано 9 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки РФ. Общий объем работ составляет 2,9 печ.л., из которых 1,3 печ.л. принадлежат лично соискателю.

Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка литературы, включающего в себя 167 наименований и приложения. Работа изложена на 145 страницах, содержит 11 таблиц, 58 рисунков, 72 формулы и 21 страницу приложений.

## 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения высококачественных хлебобулочных изделий необходима эффективная подготовка зерна к помолу, в процессе которой возникают значительные сложности, связанные с тем что зерно – это живой организм и все процессы, протекающие в нем, подчиняются его биологической системе. В свою очередь биологическую систему зерна можно подразделять на несколько видов: морфологическую, физико-химическую и биохимическую [33,34]. Для объяснения процессов, происходящих в зерне при его подготовке к помолу, рассмотрено его строение, основные химические и биохимические свойства, проведен анализ современных технологий процесса подготовки зерна к помолу. Исходя из того, что основным сырьем для производства муки являются зерно пшеницы и ржи (около 80% муки вырабатывают из пшеницы и около 7% из ржи), в работе исследована технология подготовки к помолу зерна пшеницы.

### 1.1 Биологическое строение зерна

Зерно, относящееся к однодольным растениям, рисунок 1, состоит из зародыша 1 и эндосперма 2, плотно окруженных эпидермисом (алеироновым слоем) 3 и семенной оболочкой 4. Плодовая оболочка 5 прилегает к семенной, но не срастается с ней.

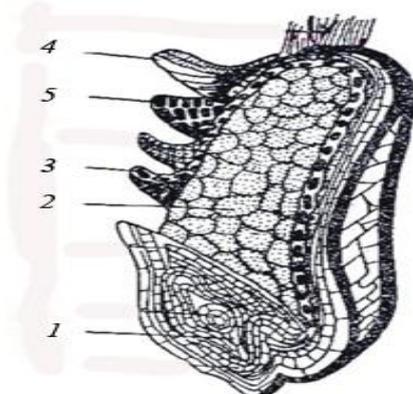


Рисунок 1 - Продольный разрез зерна пшеницы

1 – зародыш; 2 – эндосперм; 3 – алейроновый слой; 4 – семенная оболочка; 5 – плодовая оболочка.

Каждый из элементов зерна является ценным пищевым или кормовым продуктом, используемым в различных целях после его обработки. Зародыш, который в большей степени удаляется в подготовительном отделении, содержит более 20 макро- и микроэлементов. При этом содержание фосфора в нем достигает 1% и более, калия также более 1%, свыше 50 мг/кг натрия, около 100 мг/кг железа и в значительном количестве присутствует также медь, цинк, кобальт и другие микроэлементы. В связи с высоким содержанием комплекса витаминов и непредельных жирных кислот зародыш используют в фармацевтической и микробиологической промышленности. Особенно рекомендуется использовать зародыш для диетического питания при болезнях кровеносной системы, дермитах, нервных расстройствах, для профилактики атеросклероза, укрепления организма при физическом утомлении. При сортовом помоле пшеницы зародыш удаляется и в формировании муки не принимает участия. А в случае простого помола он в размолотом состоянии входит в состав муки [9]. Крахмалистая часть эндосперма содержится под алейроновым слоем и она является наиболее ценной частью зерна, из которой получают высокие сорта муки. Алейроновый слой, являющийся краевой частью эндосперма, содержит в себе белковые вещества и богат жиром, что ведет к ухудшению качества сортовой муки. Семенная и плодовая оболочки предохраняют зерно от воздействия внешней среды и они также удаляются при производстве сортовой муки, а при простом помолу они в измельченном состоянии переходят в муку.

В таблице 1 приведены обобщенные данные различных авторов по соотношению масс анатомических частей зерна пшеницы. Все значения имеют существенные варьируемые интервалы, зависящие от геометрических размеров зерна.

Таблица 1 – Соотношение различных частей зерна пшеницы в % к сухой массе

Оболочки			Эндосперм			Зародыш со щитком
плодовые	семенные	всего	Алейроновый слой	Крахмалистая часть	всего	
3,5-4,4	1,1-2,0	5,8-8,9	6,3-8,9	77-85	83,5-92,0	1,4-3,8

Для пшеницы можно принять, что в среднем содержание крахмалистой части эндосперма равно 82,5%, плодовых и семенных оболочек в сумме 7,0%, алейронового слоя-8,0%, зародыша с щитком - 2,5%.

## 1.2 Состояние и перспективы повышения качества муки

Показатели качества муки и, следовательно, хлеба во многом зависят от технологических операций подготовки зерна к помолу. В настоящее время, в большинстве случаев, такого визуального показателя как белизна муки добиваются различными химическими методами. По данным профессора института органической химии РАН профессора А.Терентьева хороших промышленных ингредиентов в России мало, поэтому используются улучшители вкуса, цвета и текстуры хлеба броматом калия и двуокисью хлора. Они практически полностью уничтожают в муке витамины и полезные жирные кислоты.

В борьбе с фузариозом зерна активно используются фунгициды и гербициды, они значительно повышают сохранность зерна, но, как химические вещества, отрицательно воздействуют на состояние отрубей, шелухи. И по этой причине, несмотря на то, что в них и содержится основные полезные вещества: витамины А, D, Е, большое количество витаминов группы В и микроэлементов, они отбрасываются, тем самым обедняя муку. Уже в прошлом веке хлеб был без

отрубей, темноватого оттенка и без отбеливателей. Но в последующем началась эра активной химической фальсификации муки. Такой белой муки как сейчас, в связи с природными биохимическими показателями зерна, быть не может.

Используемый бромат калия при нагревании превращается в бромид калия, он придает пышность и свежесть хлебу.

Ядовитая двуокись хлора, также используемая для отбеливания муки – газ, также уничтожающий полезные вещества, после окисления оставляет в муке хлорированные соединения. Они гепатоксичны.

Бензопероксиды после нагревания и разложения в муке превращаются в бензол-химическое вещество отрицательно воздействующее на желудочно-кишечный тракт.

Выход из создавшегося положения порчи муки якобы их «улучшителями» усматривается в комплексном подходе к решению проблемы:

- создании безопасных пестицидов, что в ближайшем будущем не представляется возможным;
- создании собственных отбеливателей на основе ифоксидов, что также очень длительно и дорого;
- употреблении хлеба с естественной, predetermined природой цветности;
- убеждении населения в целесообразности перехода на хлебопродукты из обойной муки, только при этом использовать технологии высокой очистки оболочки и внешних покровов от минеральных отложений, пестицидов и зараженности микронасекомыми.

Данное обстоятельство обосновывает актуальность научно-исследовательских работ, направленных на повышение эффективности подготовки зерна к помолу[35].

### **1.3 Технологические свойства зерна**

По своему биологическому строению зерно - это капиллярно-пористое коллоидное твердое тело со свойствами биополимера, таких как: поглощение и

отдача влаги; ограниченное набухание при поглощении влаги; трещинообразное разрушение структуры и гидротермические изменения при смачивании.

Технологические свойства муки принято оценивать посредством расчета отношения выхода муки к ее зольности. Зольность является одним из основных показателей мукомольных свойств зерна, так как по ее содержанию можно косвенно судить о качестве промежуточных и конечных продуктов переработки. Поэтому зольность входит в группу показателей, используемых для расчета выходов готовой продукции [36-38].

По своему содержанию зольность характеризует количество золы, образовавшейся в результате сжигания навески зерна или муки, выраженное в процентах к массе навески. Зола образуется как из неорганических, так и органических веществ зерна и она состоит из окислов и солей различных минеральных элементов, входящих в состав зерна: калия, фосфора, натрия, кальция, магния, причем на долю фосфора приходится около 60%, а на долю калия около 30% золы, 10% составляют большое количество разных солей оксидов [40].

Зольность зерна колеблется в зависимости от сортовых особенностей и почвенно-климатических условий его произрастания, причем у различных анатомических частей зерна она неодинакова. Наибольшую зольность имеют оболочки и алейрановый слой, наименьшую эндосперм. В таблице 2 представлены данные зольности различных анатомических частей зерна пшеницы.

Таблица 2 – Зольность зерна пшеницы и его частей в % на сухое вещество

Зерно и его части	Зольность, %		
	Максимальная	Минимальная	Средняя
Зерно	2,03	1,81	1,95
Эндосперм	0,51	0,38	0,46
Оболочка и алейроновый слой	9,83	7,54	8,49
Зародыш	6,08	5,11	5,98

Для зерна пшеницы базисная зольность составляет 1,97%. Известно, что за каждую 0,01 % зольности зерна пшеницы выше базисной нормы при сортовых помолах выход муки уменьшается на 0,18%.

Показатель стекловидности характеризует технологические свойства зерна, режимы его подготовки к помолу и измельчению [41]. При этом стекловидными называют такие зерна, которые слабо преломляют луч света и при просвечивании кажутся прозрачными. Мучнистые зерна при рассмотрении на свету непрозрачны, при просвечивании кажутся темными.

Между этими двумя различными формами встречаются зерна частично стекловидные. Стекловидность характеризует определенные структурно-механические свойства зерна и в первую очередь его твердость, что отражается на качестве его измельчения и формирования промежуточных продуктов.

Стекловидность характеризует степень связи белковых веществ с крахмальными зёрнами. В стекловидной пшенице белок более тесно связан с крахмальными зёрнами, что препятствует отволаживанию, для повышения его качества необходима интенсификация процесса за счет повышения температуры процесса. В зерне с мучнистым эндоспермом больше промежуточного белка, который при размолу довольно легко высвобождается, однако при этом отволаживание так же необходимо. Стекловидное зерно легче вымалывается и дает больший выход крупок, чем мучнистое. В мукомольном производстве для зерна пшеницы установлены три группы стекловидности: до 40%, от 40 до 60 %, и свыше 60% [42].

Показатель влажности имеет большое значение при хранении зерна и при его переработке. Количественное содержание, состояние и характер взаимодействия влаги с частями зерна оказывают существенное влияние на его технологические свойства и на качество проведенной технологии подготовки зерна к помолу.

С учетом стойкости при хранении, а также возможности переработки установлено 2 состояния зерна по влажности: сухое, до 14 % включительно; средней сухости, свыше 14 до 15,5%; влажное, свыше 15,5 до 17% включительно; сырое, свыше 17%.

Влажность зерновой смеси обуславливает и ее гигроскопичность, т.е. способность поглощения и отдачи влаги, зависящую от физических, технологических свойств и химического состава зерна, а также от термодинамических условий окружающей среды [44].

Вода является неотъемлемой частью зерна, она входит в структуру его макромолекул и вызывает энергетическое взаимодействие с активными центрами. При том, сорбция паров воды зерном, в соответствии с законом энергии связи, имеет вид:

$$U = -RT \ln \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right), \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}, \quad (1)$$

где: R – универсальная газовая постоянная, кДж/моль;

T – температура на термодинамической шкале, °K;

$\rho/\rho_0$  – относительное давление паров воды в атмосфере.

Таким образом она зависит от температуры и насыщенности паром воды материала в гигроскопической среде.

Анализ изотермы сорбции паров воды в зерне, рисунок 2, указывает на ее распад по трем участкам.

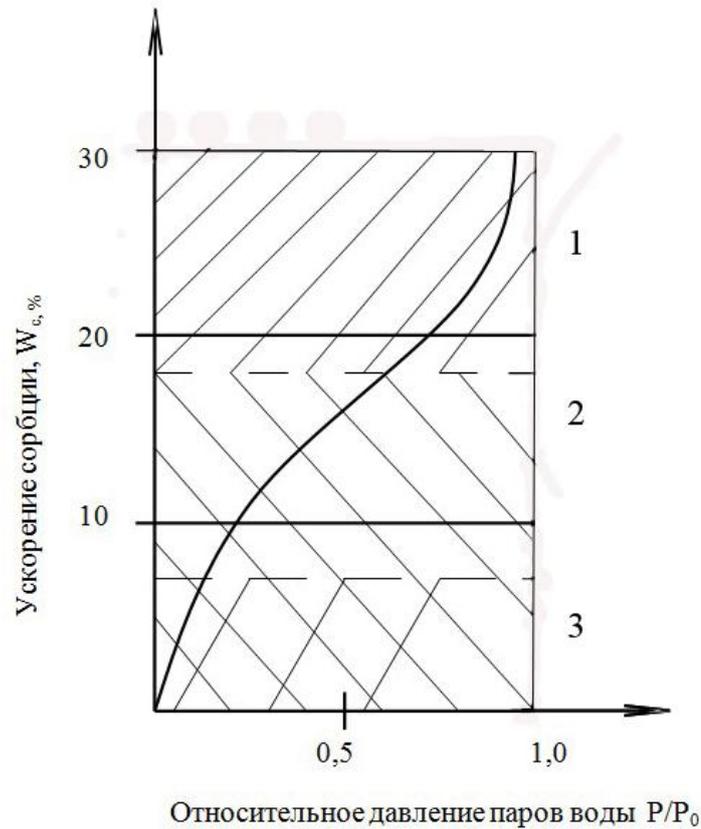


Рисунок 2 – Усредненная изотерма сорбции паров в зерне пшеницы при 20°C

Первый участок имеет место при 7-8% влажности зерна, здесь у него не проявляются пластические свойства, практически протекает упругая деформация. Размол затруднен, качество муки плохое. Второй участок наблюдается при 15-17% влажности. При этой критической влажности изменяются все свойства зерна и они являются оптимальными для его измельчения, повышается выход муки и ее качество, снижается расход энергии на измельчение. Третий этап продолжается при перенасыщении зерна парами воды до гигроскопического значения влажности. Исходя из этого, энергия связи при 5% влажности составляет  $E = 7$  кДж/моль, при 12% –  $E = 2,5$  кДж/моль, при 15% –  $E = 1,5$  кДж/моль, при 20% –  $E = 0,5$  кДж/моль.

Все приведенные показатели находятся в области физико-химической связи воды. При увлажнении зерна на 14-15% происходит заметное снижение энергии

связи влаги, это говорит об активизации ферментной системы зерна. Перемещение влаги в зерне протекает за счет диффузии, а не движения потока воды, и, следовательно, переноса минеральных веществ с водой нет. Приведенное говорит о необходимости соблюдения при отволаживании оптимальных показателей влажности и температуры.

При подготовке зерна к помолу процесс отволаживания на мукомольном предприятии достаточно длителен. Зерно достигает своего технологического оптимума за 24-36 часов отстаивания в емкостях, при соблюдении установленных режимов. Это, несомненно, ведет к значительным затратам как временных факторов, так и к увеличению затрат на содержание площадей под емкости для отволаживания.

Прочность оболочек и эндосперма, их связи друг с другом являются одними из основополагающих факторов для качественного размола зерна. Оптимальные процессы разрушения зерна с образованием крупчатки характеризуются свойствами его релаксации и твердозернистостью. Релаксационные явления возникают в зерне при отволаживании и измельчении. А твердозернистость – от влажности зерна и чем она выше, тем ниже твердость и выше пластичность.

Таким образом, качество измельчения зерна полностью взаимосвязано с воздействием влаги на структуру зерна и его механические свойства, что осуществляется гидротермической обработкой при подготовке зерна к помолу.

Данное обстоятельство позволило сформулировать рабочую гипотезу о том, что повысить эффективность технологического процесса подготовки зерна к помолу возможно за счет воздействия на качественные критерии (получения рациональных технологических оптимумов зольности, влажности, микротвердости эндосперма и клейковины зерна) за меньшую длительность технологической операции очистки и увлажнения, что снизит удельные эксплуатационные затраты и повысит качество подготовки зерна к помолу.

#### **1.4 Гидротермическая обработка зерна**

Степень изменения свойств зерна зависит от принятых режимов его гидротермической обработки. Изменение влажности зерна ведет к его

набуханию и, соответственно, изменению технологических свойств [9], рисунок 3.

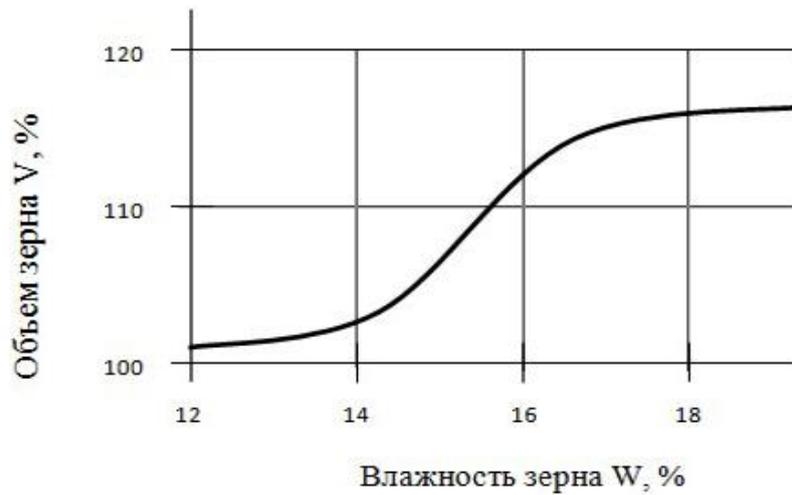


Рисунок 3 – Влияние влажности зерна на его объем

При набухании плотность зерна снижается, в макромолекулы внедряется вода, ведущая к рыхлому расположению цепей структуры под воздействием неравномерности к набуханию белковых матриц и крахмальных гранул эндосперма и ведут к процессу образования микротрещин в стекловидной эндосперме. Это объясняется релаксацией внутренних напряжений в зерне, рисунок 4.

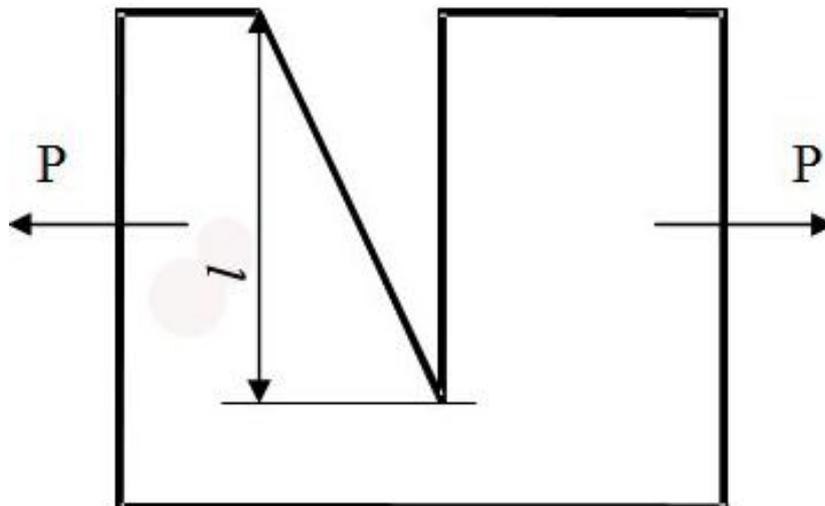


Рисунок 4 – Трещинообразование в структуре зерна

Процесс трещинообразования при увлажнении зерна зависит от упругости эндосперма:

$$\omega = \frac{\sigma^2}{2E}, H, \quad (2)$$

где:  $\sigma$  – напряжение в эндосперме, Н;

$E$  – модуль упругости эндосперма.

Энергия, возникающая в зерне при набухании с ростом трещины возрастает по линейному закону.

$$U_T = k\omega l, \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности;

$l$  – длина трещины, мм.

В соответствии с данными литературных источников [9, 14, 16], наибольшее количество трещин образуется после 8 часов увлажнения зерна это объясняется закономерным процессом диффузионного влагопереноса в зерне. Вода медленно проникает в микротрещины, интенсивность возрастания микротрещин (рисунок 4), наблюдается при 14-17% влажности.

При меньших значениях напряжения растяжения  $P$  (рисунок 4), недостаточны для разрыва ткани эндосперма, а при больших, из-за возрастания пластичности, упругая деформация переходит в пластическую, что исключает появление технологически необходимых трещин.

Установлено что наиболее рациональные условия для измельчения зерна достигаются при его максимальном разрыхлении.

Оптимальные параметры влажности зерна взаимосвязаны с длительностью увлажнения и температурой процесса при проведении гидротермической обработки (ГТО). Холодное кондиционирование, протекающее при температуре  $20^\circ \pm 2$  градуса по Цельсию, длится по времени минимум 12 часов, и как следует из таблицы 3, дает низкие результаты по выходу и зольности муки.

Таблица 3 – Выход и зольность муки при подготовке к помолу при различных видах ГТО

Подготовка зерна к помолу	Выход муки, %/ Зольность муки, %			
	Всего	В том числе по сортам		
		Высший	Первый	Второй
Без ГТО	76,3/0,93	5,2/0,53	32,4/0,72	38,7/1,17
Холодное кондиционирование	77,2/0,72	24,0/0,49	34,2/0,65	19,0/1,08
Скоростное кондиционирование	78,0/0,67	29,6/0,48	32,8/0,63	15,6/1,11

Из таблицы следует, что при скоростном кондиционировании, проводимом с пропариванием зерна в мягком режиме, качественные показатели муки возрастают, а сроки отволаживания уменьшаются.

Таким образом, современная технология подготовки зерна к помолу основана на термической обработке, заключающейся в увлажнении зерна перед измельчением в установленных температурных и временных режимах. И зная закономерности влагопереноса в зерне, зависящие от температуры и времени, исследованию подлежат вопросы, связанные с возможностью использования акустических направленных микротоков, интенсифицирующих процесс прохождения влаги в клетках зерновки [30,31].

### 1.5 Очистка зерна от минеральных отложений и микронасекомых

К процессу подготовки зерна к помолу предъявляются различные требования, зависящие от технологии размола - сортового, формируемого только из эндосперма или простого, обойного, формируемого за счет измельчения всего зерна вместе с оболочками и зародышем.

В сортовом размоле для муки, используемой в кондитерской промышленности, содержание белков, витаминов и минеральных веществ значительно снижено за счет использования лишь эндосперма. Все остальные особо загрязненные поверхности удаляются. Обойная же мука за счет использования достоинств, имеющихся во всех остальных, кроме эндосперма,

частях зерна, сохраняет белки, витамины и минеральные вещества в большей степени. Она в настоящее время приобретает все большее использование в хлебобулочной промышленности по причине повышенной питательной ценности продукта.

В соответствии с ГОСТ 27186-86 «Зерно – заготовляемое и поставляемое». Термины и определения [44], показатели качества зерна оцениваются: зерновой примесью, состоящей из неполноценных зерен основной культуры, а также из зерен других культурных растений, допускаемых при приемке, сорной примеси зерна. Исходя из этого, зерно, подвергаемое размолу, проходит сложный процесс стабилизации разнообразных его свойств. В подготовительном отделении мельницы при сепарировании зерна введено ограничение содержания посторонних примесей: на начальный период сорной не более 2,0%, зерновой не более 5,0%, остаточного сочетания сорной 0,3% и зерновой 3,0%. Минеральные примеси зерна подразделяются на макроэлементы, микроэлементы и ультрамикроэлементы, содержащиеся в тканях зерна. Они в той или иной мере обеспечивают жизнедеятельность организма человека и при подготовке зерна к помолу остаются в нем. В количественном соотношении максимальное содержание минеральных веществ, порядка  $2/3$ , находятся в оболочках алейронового слоя. Сосредоточение наибольшего количества минеральных веществ в алейроновом слое объясняется загрязнением зерна кремнием, накопившемся на его поверхности. Это обстоятельство ведет к ухудшению качества зерна [33,34].

Содержание минеральных примесей и отложений оценивается показателем зольности, обусловленным отношением массы золы, получаемой в результате сжигания размолотого зерна при определенной температуре в заданных условиях, к массе сжигаемого вещества, выраженной в процентах.

Однако, показатель зольности зерна дает суммарное соотношение всех минеральных веществ как в тканях, так и в оболочке, что не позволяет дифференцировать ее количество в зерне и периферийных зонах – оболочке, бороздке и бороздке. Эти различия в зольности используются при контроле выхода муки по сортам. На этом основании при подготовке к помолу зерновая

масса, освобожденная от примесей традиционными методами, дополнительно \_+подвергается очистке с целью удаления загрязнений с поверхности зерна. Эффективность очистки зерна обуславливается величиной снижения зольности, в этой связи контроль загрязненной поверхности зерна до и после очистки сухим или мокрыми способами приобретает особую технологическую важность. Наряду с этим при подготовке осуществляется очистка поврежденных поверхностей зерна от продуцентов митотоксинов, образовавшихся при травмировании зерна.

На мукомольных предприятиях традиционно, в зависимости от поставленной задачи получения обойной или сортовой муки, используются идентичные технологии подготовки зерна к помолу, отличающиеся только различной насыщенностью операций и оборудования [45-48], рисунок 5.

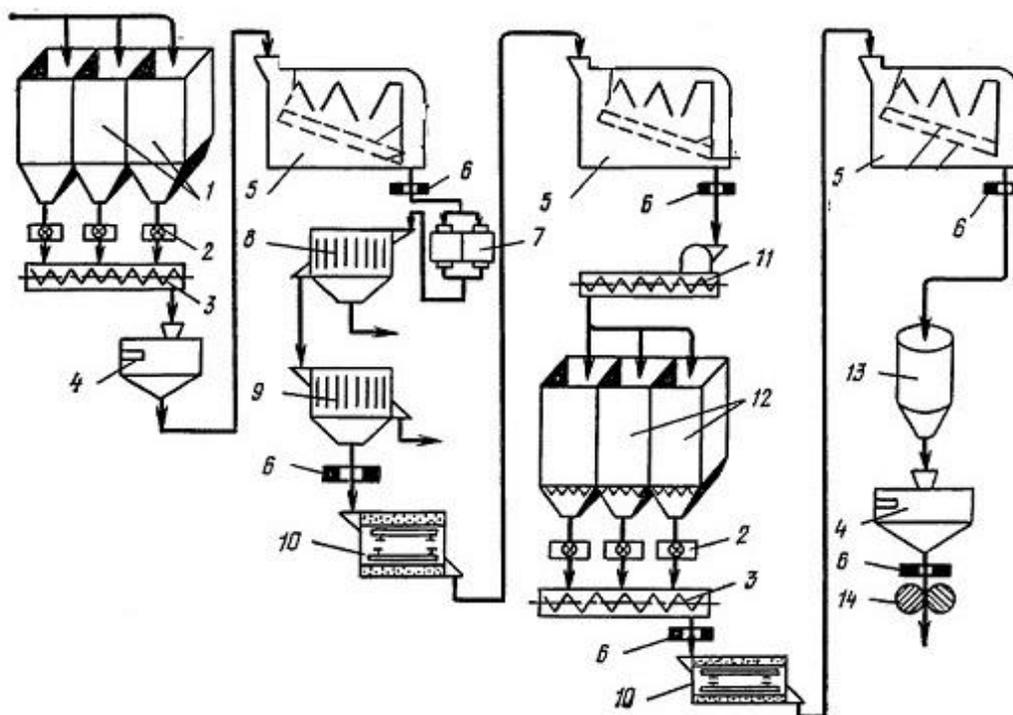


Рисунок 5 – Схема технологического процесса подготовки зерна к помолу:

1-бункера для неочищенного зерна; 2 – дозаторы; 3 – смеситель; 4 – автоматические весы; 5 - воздушно-ситовые сепараторы; 6 – магнитные сепараторы; 7 – камнеотделительная машина; 8 – куколотборочная машина; 9 – овсюгоотборочная машина; 10 – обочная машина; 11 – увлажнительная машина; 12 – бункера для отволаживания; 13- бункер перед вальцовым станком; 14- вальцовый станок.

При простом помоле, рисунок 5, применяются операции увлажнения 1, 2, очистка от примесей на воздушно-ситовом сепараторе 4 и камнеотборнике 5.

После обработки зерна на триерах куколе – и овсюгоотборниках оно поступает на шелушение 7 и повторную сепарацию. Пройдя еще один этап холодного кондиционирования зерно обрабатывается в обойной машине, подвергается дополнительному шелушению, аспирации, и готово к помолу. Исходя из количества технологических операций при простом помоле предъявляются значительно упрощенные требования к качеству обойной муки, хотя она является основной для производства, предпочитаемого населением страны, хлеба. При сортовом помоле к качеству увлажнения зерна и его очистке уделяется особое внимание и влечет за собой повторные операции доувлажнения и очистки.

Однако, исходя из анализа технологического процесса, следует констатировать, что все операции по отволаживанию и очистке зерна при простом помоле крайне нестабильны и по этой причине нужно исследовать новые научно-производственные направления по интенсификации процесса с повышением качества и уменьшением количества машин и времени для подготовки зерна к помолу.

## **1.6 Современные технологии подготовки зерна к помолу**

Мука представляет собой пищевой продукт, получаемый путем последовательных технологических операций тепломассообмена, измельчения, сепарирования и в зависимости от сортности с удалением или без удаления плодовых и семенных оболочек, алейронового слоя и зародыша зерна при одновременном дроблении мучнистого ядра-эндосперма или в целом зерна на частички заданной крупности.

Все эти операции связаны с применением технических средств. На современных мельницах и крупозаводах все отрасли по подготовке зерна к помолу и производству готовой продукции полностью механизированы.

Современные технологии подготовки зерна к помолу состоят из процессов, сложившихся в 50-х годах прошлого столетия. За длительное время технология

получения муки изменилась незначительно. При этом совершенствовалось только технологическое оборудование. Даже лидеры мукомольной промышленности, такие европейские государства как Франция, Германия, Швейцария, занимаются лишь модернизацией мукомольных машин.

Влияние зерноочистительного комплекса на качество муки необычайно высоко. К примеру, для получения муки высшего и 1 сорта зерно пройдя все операции по подготовке, должно отвечать следующим нормам: влажность должна составлять 14,5-15,0%; зольность в чистом зерне – 1,97%; содержание сорной примеси – 1%, в том числе минеральной – 0,1%, вредной – 0,1%; содержание зерновой примеси – 1%; натура при сортовых помолах пшеницы - 750 г/л. Достичь поставленных результатов чисто технически не представляется возможным по той причине, что каждая операция выполняется на специальном, предназначенном для этого оборудовании. В процессе очистки на традиционно используемом оборудовании вследствие изменения его рабочих показателей резко ухудшается технологическая, техническая и экономическая эффективность операций.

Исходя из изложенного актуальность совершенствования всех операций получения муки и особенно процесса подготовки зерна к помолу, включающего в себя формирование помольных партий, удаление примесей, очистку поверхности зерна сухим или влажным способами и его гидротермическую обработку несомненна[5]. Здесь особо важным представляется применение системной подготовки зерна к помолу. Так, говорить о совершенности применяемых технологий не приходится по той причине, что она затрагивает от 17 до 30 машин, количество оборудования зависит от свойств поступающего зерна и применяемой технологической схемы переработки. Очевидно, что использование большого числа машин требуют значительного повышения затрат на подготовку и отволаживание зерна, что повышает себестоимость муки.

Пройдя весь цикл подготовительных операций при их длительности порядка 12...40 часов, зерно считается готовым к размолу, так как его параметры доведены до базисного состояния, при этом энергозатраты составляют около 20

кВт на подготовку 20 тонн зерна. С точки зрения временных и энергетических затрат можно сделать вывод о необходимости исследования и разработки новых способов, снижающих себестоимость и повышающих качество операции подготовки зерна к помолу.

### 1.6.1 Способы гидротермической обработки зерна

Основная задача гидротермической обработки состоит в изменении исходных технологических свойств зерна в заданном технологами направлении и стабилизации их на оптимальном уровне. Основным показателем, который влияет на преобразование свойств зерна, является влажность и ее изменение за определенный промежуток времени. На рисунке 6 представлен график зависимости объема зерна от процента влажности. Из него следует, что особенно интенсивно развивается процесс набухания зерна при влажности 14...16% [49].

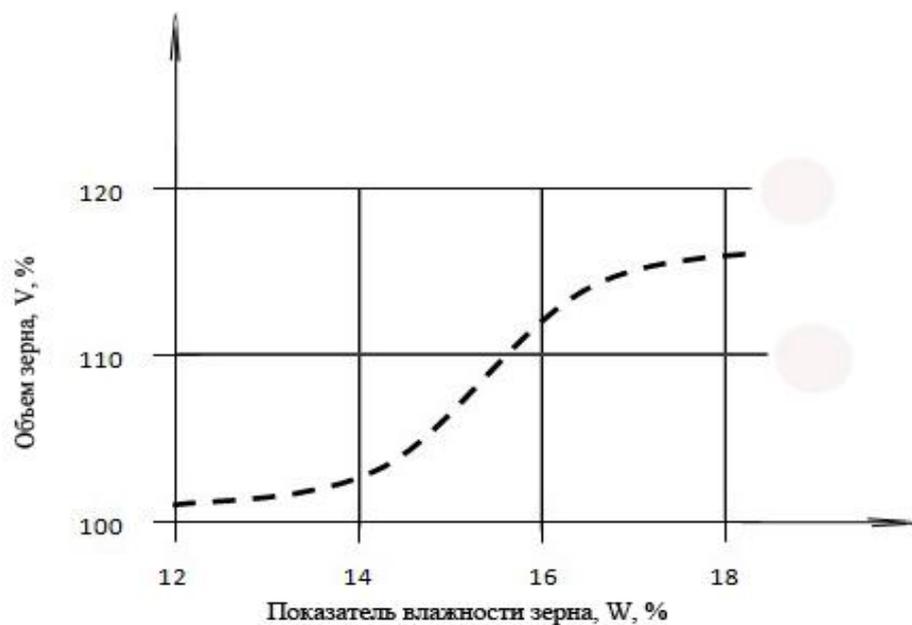


Рисунок 6 – Влияние влажности на физический объем зерна

Увеличение степени увлажнения зерна значительно облегчает такие процессы, как отделение оболочки и его последующий размол, что обеспечивает максимальную технологическую эффективность переработки зерна в муку. Однако показатель влажности зерна не должен быть более 15,5%, так как в

случае переувлажнения зерна процесс его переработки значительно затрудняется и его приходится подвергать дополнительной операции сушке до достижения оптимальных показателей влажности, составляющих 14,5-15,5% .

Температура процесса отволаживания играет основную роль при взаимодействии воды с зерном [50]. Установление того или иного температурного режима осуществляют путем предварительного подогрева воды, реже зерна. Иногда взамен или совместно с подогревом воды используют иные, не тепловые методы обработки зерна, способствующие достижению рациональных показателей влажности. Исходя из этого приняты следующие способы кондиционирования зерна:

- холодное (водой без предварительного подогрева);
- горячее (водой с подогревом ниже точки кипения, обычно 30...50°C);
- скоростное (водяным паром);
- с использованием нетепловых факторов.

Постоянное применение на практике одного из процессов, так же как и применение всех сразу, не представляется возможным по той причине, что технологические характеристики поступающего в подготовительное отделение зерна находятся в большом диапазоне и это влечет за собой необходимость постоянного приспособления режимов и способов к перерабатываемому продукту.

В известном способе холодного кондиционирования [51], при котором увлажнение зерна водой производится при температуре 15...20°C, а затем осуществляется его отволаживание путем изотермической выдержки, на которую затрачивается до 40 часов времени. В процессе отволаживания происходит равномерное распределение влаги по анатомическим его частям, сопровождающееся следующими структурно-механическими и технологическими преобразованиями:

- набуханием с выделением теплоты гидратации;
- разрыхлением эндосперма за счет возрастания удельного объема;
- развитием микротрещин в эндосперме;

-ослаблением связи оболочек и алейронового слоя с крахмальной частью эндосперма [52] за счет разницы в изменении удельных объемов при набухании.

Основными недостатками данного метода следует считать:

- во-первых, при холодном кондиционировании требуется строгое соблюдение временного режима отволаживания. В противном случае, к примеру, при переработке зерна пшеницы со слабой клейковиной, ее свойства могут измениться в нежелательном направлении: упругость может уменьшиться, а растяжимость возрасти. Это указывает на нецелесообразность применения холодного кондиционирования для зерна со слабой клейковиной [53]. Кроме того, при повышении времени отволаживания даже на короткий срок происходит смыкание образовавшихся ранее микротрещин в эндосперме. Это происходит в результате воздействия двух конкурирующих процессов: набухания, сопровождающегося размягчением эндосперма и развития микротрещин в нем из-за неравномерности напряжений в зерновке, вызванной различной способностью впитывания влаги и, соответственно, расширения. В результате этого разделение анатомических частей зерна в мукомольном процессе затрудняется, показатели выхода муки и ее качества ухудшаются [54].

- во-вторых, увеличение температуры при холодном кондиционировании может быть достигнуто только за счет теплоты гидратации [55]. Но этот тепловой эффект действует не на протяжении всего процесса набухания, а лишь на первом этапе при поглощении небольшого количества воды. В последующем набухание вызывает увеличение массы и объема веществ, но при этом уменьшается выделение тепла [56]. Известно, что температура играет важнейшую роль в гидротермическом процессе кондиционирования. С увеличением температуры и значения ее градиентов в сечении зерновки скорость поглощения воды зерном увеличивается и, следовательно, усиливаются и все процессы, зависящие от интенсивности увлажнения. Таким образом, при холодном кондиционировании не может быть достигнута высокая интенсивность и технологичность процесса [57];

- в-третьих, эффективность холодного кондиционирования в значительной степени зависит не от средней влажности зерновой массы, а от увлажнения отдельных зерновок, составляющих эту зерновую массу [58]. Поэтому ввод воды надо проводить так, чтобы обеспечить равномерность ее распределения по поверхности каждой зерновки, например, помещая зерно на короткий промежуток времени полностью в воду [59]. Для этого требуются дополнительные технические средства, например, устройства для мелкодисперсного распыления [27];

– в-четвертых, кондиционирование зерна водой комнатной температуры не производит бактерицидного или бактериостатического действия на микроорганизмы, содержащиеся на поверхности зерновок и способных вызвать микробиологическую порчу выработанной из него муки, либо выпекаемого из нее хлеба.

Известен способ горячего кондиционирования [60], при осуществлении которого температуру зерна повышают до установленной величины за счет предварительного подогрева воды, что способствует быстрейшему распространению влаги внутрь зерновки. Такое направленное движение влаги разрывает эндосперм, а оболочки при этом сохраняют достаточную эластичность. Увеличение скорости влагопоглощения при предварительном подогреве увлажняющей воды достигается за счет повышения градиента температуры между наружными и внутренними частями зерна. Ясно, что время отволаживания при этом сокращается.

Недостатками данного и аналогичных ему способов кондиционирования зерна подогретой водой, как и в предыдущем случае, являются:

– специфичность, выражающаяся в том, что при переработке зерна высокостекловидной мягкой пшеницы с хорошим белково-протеиновым комплексом такое кондиционирование приводит к потере клейковины, значительному повышению ее упругости [61];

– потребность в средствах для равномерного распределения влаги;

Кроме того, повышение температуры активизирует развитие микрофлоры зерна, в том числе и возбудителей картофельной болезни. Под воздействием тепла происходит также активизация ферментов [62], в том числе продуцентов вредителей. Повышение ферментативной активности приводит к необратимым изменениям в белково-протеиназном и углеводно-амилазном комплексе зерна, что, в свою очередь, чаще всего ведет к ухудшению хлебопекарных свойств муки [63].

Известен способ скоростного кондиционирования [64], при котором увлажнение и нагрев осуществляют паром при давлении, близком к атмосферному. Такой способ ГТО позволяет еще более интенсифицировать процесс переноса влаги внутрь зерна [65, 66] и, соответственно, ускорить процесс разрыхления эндосперма. При увлажнении паром не требуется дополнительных средств для повышения равномерности распределения влаги, так как диффузия пара в зерновую массу протекает значительно эффективнее, чем диффузия воды. Контакт зерна с паром при таком способе кондиционирования обеспечивает наивысшие среди всех способов ГТО значения градиентов температуры, а, значит, и диффузии влаги внутрь зерновки.

Однако, данный и аналогичные ему способы кондиционирования зерна паром также обладают существенными недостатками.

Скоростное кондиционирование паром, также как холодное и горячее, обладает низкой универсальностью. Известно [67], что при нагреве зерна, происходящего за счет теплоты конденсации пара на его поверхности происходит укрепление клейковины. Кроме того, при повышении интенсивности за счет увеличения температуры пара возникает опасность термической денатурации белков. Способ, как и вышеперечисленные, не обеспечивает обеззараживания обрабатываемого зерна, так как многие бактерии и споры грибов терморезистентны. Например, споры *Bacillus subtilis* и *Bacillus mesentericus* – возбудителей картофельной болезни – могут выдерживать действие температуры кипения воды.

Способность термической активации ферментов здесь также сохраняется и является одним из недостатков.

Управляемость процесса скоростного кондиционирования по сравнению с холодным и горячим способами увлажнения в части обеспечения заданной влажности несколько хуже. Причиной является то обстоятельство, что процесс во многом зависит от температуры помещения, в котором производят кондиционирование, исходной температуры зерна и соотношения скоростей подачи зерна и пара. Эти факторы влияют на условия конденсации и, в конечном итоге, на то, сколько влаги будет впитано зерном [68].

Известен способ кондиционирования, при котором воду, используемую для увлажнения, подвергают не тепловой обработке, а электрохимической активации [69]. При исследовании влияния электрохимически активированной воды на технологические свойства зерна установлено, что для увлажнения лучше использовать католит-щелочную фракцию активированной воды, оптимальное значение водородного показателя рН которой должно находиться в пределах 1,5...11,5 единиц. При этом время отволаживания зерна снижается на 2...4 часа, микрофлора уменьшается более чем на 60%, снижается зольность, а выход муки увеличивается на 3,5 %.

Описанный способ сохраняет некоторые недостатки холодного и горячего кондиционирования, состоящие в неравномерном распределении влаги по массе зерна, более того, процесс отволаживания характеризуется низкой интенсивностью.

Метод получения католита, используемого при данном способе для увлажнения зерна – это униполярная электрохимическая активация воды, которая предполагает ее повышенный расход, так как другая фракция – анолит, получаемая при электролизе в процессе кондиционирования не используется.

В промышленности для кондиционирования традиционно используется обычная водопроводная вода. Это порождает еще один недостаток способа, заключающийся в быстром загрязнении электродов отлагающимися на них солями жесткости в воде.

Существует также способ обработки, в котором на зерно распыляют при помощи ультразвука раствор воды и пропионовой кислоты с одновременным воздействием статическими электрическими разрядами противоположных потенциалов, путем подачи высокого напряжения на рабочие органы ультразвуковых распылителей [70]. Здесь в качестве средства обеспечения равномерного увлажнения поверхности зерновок использовано ультразвуковое распылительное устройство, диспергирующий эффект которого усилен электростатической стабилизацией получаемого аэрозоля. В качестве бактерицидных факторов используются непосредственно ультразвук, пропионовая кислота, тепло- и электрические заряды капель компонентов.

У данного способа также существует ряд недостатков, сказывающихся в необходимости применения органической кислоты в качестве биоцидного средства при выработке из такого зерна хлебопекарной муки, что влечет за собой повышение ее кислотности, ухудшает вкус выпекаемого из нее хлеба. Проникновение кислоты внутрь зерновки без предварительного растворения ее в воде, что возможно при такой организации процесса, вызывает частичную химическую денатурацию белков клейковины [71] с сопутствующим ухудшением хлебопекарных свойств муки. При переработке такого зерна с повышенной кислотностью в муку резко снижается продолжительность эксплуатации используемых в мукомольном процессе полиамидных сит. Использование данного способа, предназначенного преимущественно для обработки зерна кондиционированием перед закладкой на хранение, повышает интенсивность увлажнения больше, чем при холодном кондиционировании. Кроме того, электрический заряд зерновок может препятствовать диффузии влаги внутрь анатомических частей зерна, так как последняя будет приводить к увеличению плотности заряда на поверхности фронта диффузии.

В самой же воде физико-химические изменения при ее распылении практически не происходят, так как аэрозоль, образуемая под воздействием ультразвука, излучающегося в тонкий слой воды, почти мгновенно превращается в туман за счет возникновения эффекта кавитации на поверхности

жидкости. Именно захлопывание кавитационных пузырьков приводит к распылению жидкости. Известно, что только осцилляция кавитационных полостей в нестационарном режиме приводит к возникновению таких явлений как ультразвуковая диссоциация воды (сонолиз) и кавитационная дезинтеграция.

Для обеспечения выхода одного микромоля, например, перекиси водорода  $H_2O_2$ , являющейся одним из продуктов сонолиза, требуется затратить энергию, равную 1 кДж при плотностях мощности первичного поля на порядок выше кавитационного порога [72-76], тогда как для образования тумана достаточно незначительное превышение порога кавитации, обеспечивающего мгновенный результат. Поэтому при ультразвуковом распылении активация самой воды практически не происходит, а положительный эффект достигается за счет ее диспергирования и смешивания с кислотой.

Также известен способ обработки зерна [77], где в зерно распыляют при помощи ультразвука воду. Его особенность заключается в том, что воду непосредственно перед распылением подвергают ультразвуковой обработке в кавитационном режиме (сонолизу). Кроме того, воду перед активацией аэрируют. Данный способ имеет значительные преимущества над перечисленными, достигаемое за счет интенсификации процесса отволаживания, по причине появления в воде свободных гидроксильных радикалов. Недостатками данного способа, как и всех вышеизложенных, является плохая очистка зерна от трудноотделимых минеральных примесей, не отделяется оболочка зерна, а также нет бактерицидного воздействия.

### **1.6.2 Технологические особенности операций подготовки зерна к помолу**

После сепарации зерно, предназначенное к помолу, подвергается дополнительной обработке, заключающейся в удалении загрязнений с поверхности, накопившихся во всех стадиях его производства и транспортировки. Наряду с этим на поверхности зерна развиваются плесневые

грибки-продуценты микотоксинов. Для удаления этих загрязнений зерно обрабатывается сухим и мокрыми способами [11].

Сухой способ обработки зерна используется в основном для простого помола – получения обойной муки. Обойные машины применяются двух типов: с абразивными и стальными цилиндрами. При сортовом помоле используются обочные машины с сетчатой обечайкой. Известно, что от принятого процесса очистки зерна зависит качество муки. При простом помоле измельчается все зерно, за исключением 1...2 % плодовой оболочки. При сортовом помоле удаляется вся оболочка и зародыш. Это обеспечивает требуемую чистоту поверхности [78-81]. Обеспечение качества очистки поверхности зерна при простом помоле затруднено ввиду его особого анатомического строения. Бороздка и бородка, рисунок 7, являющиеся концентратами загрязнений, очень трудно очищаются и вследствие этого повышается показатель зольности, рисунок 7.

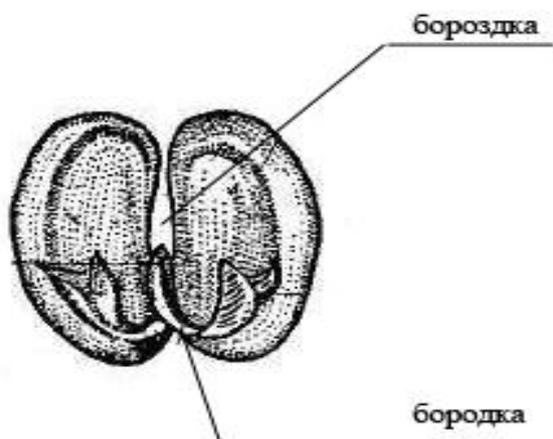


Рисунок 7 – Биологическая форма поверхности зерна

Налипшая грязь и волоски бороздки и бородки при обработке зерна на обочных машинах трудноудаляемы из-за усложненной доступности обрабатываемой поверхности. Эффективность очистки зависит от кинематики обочных и щеточных машин. В связи с упрощенной схемой подготовки зерна сухой метод обработки поверхности зерна удаляет незначительную часть

оболочек, наиболее загрязненные доступные его части. Это обеспечивает снижение показателя зольности всего на 0,10... 0,15%. Таким образом, показатель зольности, обуславливающий отношение массы золы, состоящей из минеральных веществ самого зерна и загрязнений, к массе сжигаемого измельченного зерна в процентах, не может обеспечивать высокое качество муки.

Обработка зерна в обочной машине предназначена также для удаления из оборочки и зародыша живых вредителей насекомых или клещей в любой стадии их развития. Их удаление также крайне затруднено из труднодоступных зон зерна, рисунок 7.

Таким образом, механические способы очистки зерна не дают желаемые качественные показатели очистки, так как минеральные загрязнители и вредители труднодоступны в местах их преимущественной концентрации.

Мокрые виды обработки зерна предназначены для увлажнения и мойки, рисунок 8.



Рисунок 8 – Виды мокрой обработки зерна

Мокрая обработка зерна осуществляется тремя способами: холодным кондиционированием, с целью изменения его структурно-механических свойств перед ГТО; увлажнением зерна перед шелушением; мойкой для отделения примесей и загрязнителей [82-84].

### **1.6.3 Средства механизации технологии подготовки зерна к помолу**

При сухой обработке зерна применяются машины обоечного или щеточного типа вертикального или горизонтального расположения [11,85].

Вертикальные обоечные машины осуществляют очистку зерновой массы за счет пропускания зерна на диск с закрепленным на валу бичевым ротором. При вращении за счет центробежной силы зерно сбрасывается в рабочую зону и по мере передвижения вниз подвергается ударным воздействиям и трению в сетчатую поверхность цилиндра. Это ведет к отделению минеральных отложений, зародыша, бороздки. Однако, как говорилось ранее, биологические особенности строения зерна не позволяют качественно очистить всю его поверхность. Рабочий процесс обоечных машин горизонтального типа идентичен вертикальному, только за счет дополнительных гонков повышается интенсивность обработки зерна. Оба типа машин позволяют снизить зольность зерна на 0,01%...0,02% при увеличении содержания битых на 0,4 %...0,8%. Данное обстоятельство не может характеризовать процесс очистки как оптимальный.

Моечные машины предназначены для промывания загрязнений и микроорганизмов. Используется для мойки питьевая вода с расходом до 2 м<sup>3</sup> на 1т. зерна. Способы очень затратны, поэтому они практически не используются, а получили наибольшее применение машины мокрого шелушения. Они выполнены в виде отжимных колонок, что позволило снизить удельный расход воды в 5...10 раз со снижением показателя зольности на 0,03...0,05%. Используемые в производстве машины ЗКМ-60, 6МЗ и Ж-9-М6А

многопозиционны и высокопроизводительны, с обработкой 6...10 т/ч. Принцип рабочего процесса у них идентичен.

В зерноочистительных отделениях мукомольных предприятий для обеззараживания (до 70%) зерна используются энтолейторы. Их использование продиктовано невозможностью удаления вредителей обычными способами. Несомненно, что использование сложного комплекса машин с высокой производительностью зерна усложняют и удорожают себестоимость конечного продукта – муки. Если для крупных предприятий эти затраты в общих затратах не так заметны, то для мелких и средних они невосполнимы.

Анализом литературных источников по новым направлениям очистки зерна установлена тенденциозная направленность, они преследуют цель улучшения известных технических средств. К примеру, авторами Артемьевым В.Г., Итоным В.М. [86] предложено устройство для мойки зерна, рисунок 9.

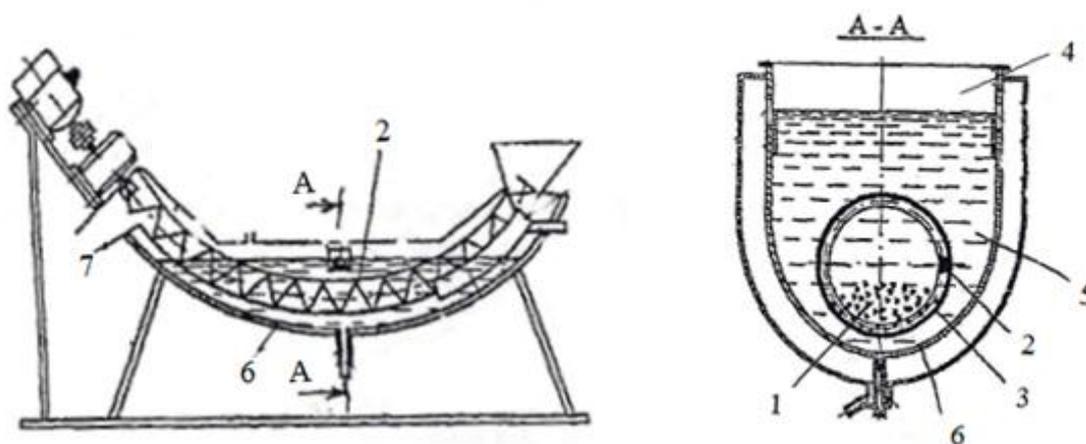


Рисунок 9 – Моечное устройство со спиральновинтовым подающим устройством

В данном устройстве зерно 1 винтовым транспортером 2 подается по перфорированному кожуху 3 в емкость с интенсивным воздействием воды 4, которая сквозь перфорированную стенку желоба 5 осуществляет мойку непрерывно перемешиваемого спирально-винтовым устройством 2 зерна. При

этом тяжелые отложения проходят сквозь перфорированную поверхность и оседают на дне емкости 4. Легкие же примеси всплывают на поверхность и выносятся из моечной емкости потоком воды. Очищенное зерно через разгрузочное окно 7 подается в сход.

За счет образования струйного истечения воды, авторами не указано какого ламинарного или турбулентного, мойка якобы должна ускоряться, но эта активность никак не сможет повлиять на проникновение воды в бороздку и бороздку. Для того, чтобы очистить качественно всю поверхность зерна необходимо, по нашему мнению, создать области высокого давления с микротечениями импульсивного характера.

В работе [87] тех же авторов предлагается мойку зерна осуществлять в барабанной центрифуге, рисунок 10.

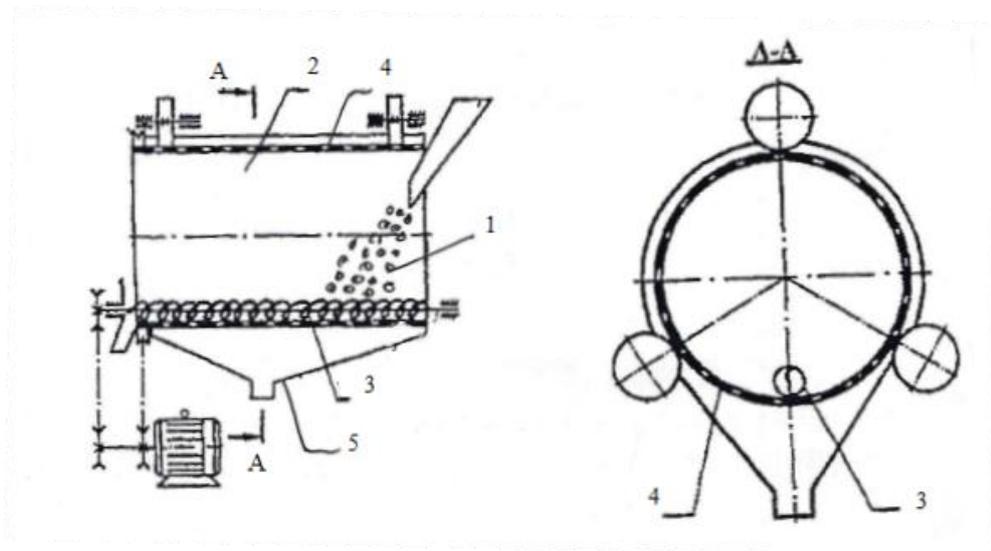


Рисунок 10 – Моечное устройство с барабанной центрифугой

В данном случае барабанная центрифуга предназначена как дополнительное устройство, осуществляющее вынос излишков влаги из зерна. Зерно 1 загружается в барабан 2, за счет спиралевидного подающего устройства 4 оно, при вращении барабана, равномерно распределяется и под действием центробежной силы приближает зерно к перфорированной стенке барабана 4. Отжатая таким образом вода, собирается в водосборнике 5 и выводится наружу.

Данное устройство предназначено только для обеспечения работы устройства, представленного на рисунке 9 и не повышает качество очистки поверхности зерна.

Работами Губейдулина Х.Х. и Гафина Р. М. [88] исследовалась технология влажной обработки зерна. В данной технологии и разработанном устройстве рассматривается вопрос подачи зерна в моечную установку, рисунок 11.

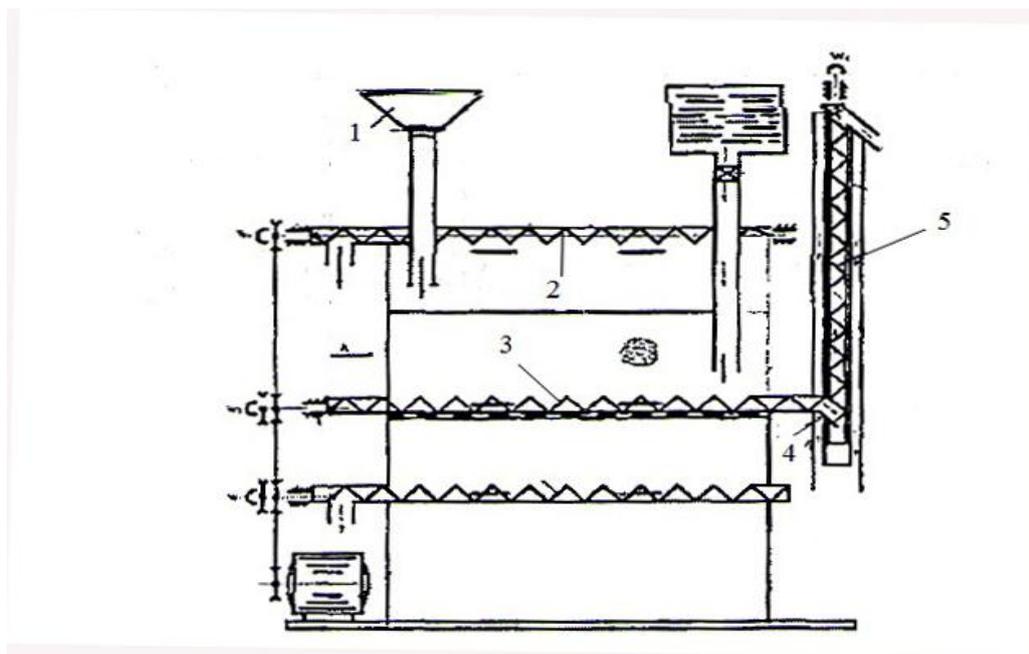


Рисунок 11 – Установка для мойки зерна со спиралевидным подающим механизмом

Зерно 1 поступает в моечную емкость 2 с водой, далее спиралью 3 по лотку 4 оно подается на перфорированную стенку центрифуги 5, где высвобождается от излишков воды и идет на сход. Все остальные механизмы предназначены для очистки воды и ее вывода из установки.

Приведенный анализ имеющихся разработок технических средств говорит об их общей достаточно важной технологической направленности – поверхностной мойке зерна. Однако, все предложенное может обеспечить только чистоту доступной для обработки поверхности зерна и никак не сможет воздействовать на труднодоступные места с отложениями минеральными

составляющими и микронасекомыми. Для этой цели необходимы более активные проникающие воздействия, интенсифицирующие процесс и обеспечивающие высокие показатели качества очистки и отволаживания зерна.

#### **1.6.4 Методы интенсификации очистки поверхности и повышения проницаемости биологических систем**

С пятидесятих годов прошедшего столетия начато активное использование во всех областях науки и техники ультразвука. У их истоков стояли такие ученые как Бергман Л., Ольшанский Н.А., Коган М.Г. [73, 89, 90]. В последующем вопросами использования ультразвука в пищевой отрасли занимались Домчук И.С., Архипова Т.И., Даниловцева А.Б. и др [91-94]. При этом диапазон использования ультразвуковых колебаний распространяется практически во всех областях перерабатывающей отрасли. Повышается эффективность технологических процессов ускорения проницаемости материалов, в частности вакуолей сахарной свеклы. Ультразвук используется при производстве пектина, фруктово-ягодных соков, продукции животноводства.

В пищевой промышленности, в частности переработки молока, ультразвук используется при выполнении операций гомогенизации и бактерицидной обработки. К примеру, при гомогенизации ультразвуковые колебания разбивают жировые составляющие молока, находящиеся в виде шариков, что повышает питательную ценность продукта. Даже при десятиминутной обработке сокращается количество болезнетворных бактерий с 610000 до 80000. Активно используется ультразвук и для повышения интенсивности растворимости различных веществ в воде, таблица 4.

Таблица 4 – Интенсивность растворимости в воде различных веществ

№	Растворяемые вещества	Количество, г.	Объем воды, мл.	Время растворения, мин.	
				Традиционным способом, мин	С ультразвуком, мин
1.	Сахар	10	100	1	0,25
2.	Желатин	1	100	120	10
3.	Соль	10	100	3	0,5
4.	Сухое молоко	20	100	10	1
5.	Яичный порошок	10	100	10	2
6.	Сухие красители	10	100	3-15	1

Исходя из теории ультразвукового воздействия на обрабатываемые поверхности [30,95-97] акустическое число Маха, составляющее отношения нелинейности члена акустики к инерционному члену акустики объединено зависимостью:

$$M = \frac{\rho_0 K V_0^2}{\rho_0 \omega V_0}, \quad (4)$$

где:  $\rho_0$  – плотность неводушной среды, кг/м<sup>3</sup>;

$K$  – волновое число  $K=W/C_0$ , где  $W$  – частота звуковых колебаний, Гц и

$C_0$  – скорость звука, м/с;

$V_0$  – амплитуда скорости, м/с;

$\omega$  – круговая частота, Гц.

Из чего следует, что нелинейные явления являются определяющими в развитии и продвижении акустических сил и течений. Это и объясняет переход от статичного, уравновешенного состояния жидкости к акустическим течениям вблизи плоской и цилиндрической границ омываемого объекта с последующим выносом измельченных веществ из приграничной зоны в жидкость, рисунок 12.

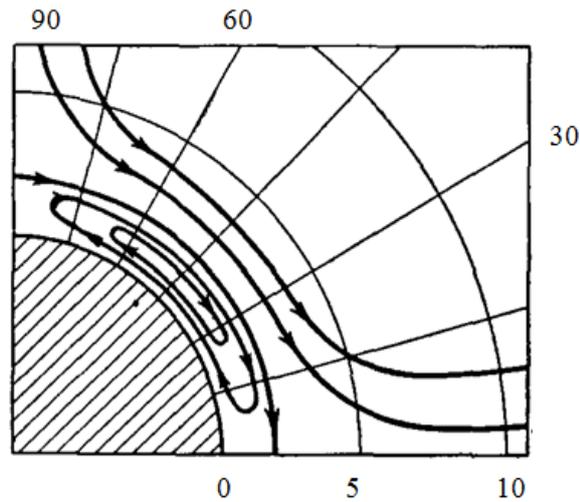


Рисунок 12 – Акустические течения вблизи плоской и цилиндрической границ оmyваемого объекта

Интенсивность этих микротечений по поверхности оmyваемого объекта и будет являться определяющей качества очистки оболочки зерна от минеральных примесей и зараженности продуцентами микротоксинов.

Коллективом авторов, под руководством д.т.н., профессора Рудик Ф.Я., исследовались вопросы очистки нерафинированных подсолнечных масел и глубокой влажной обработки сои [31, 98-103].

Нерафинированные растительные масла, обладающие высокими питательными свойствами, подвержены активному процессу окислительной порчи. Как установлено авторами уже после трехмесячного хранения, вследствие протекания в них свободных радикальных реакций, наблюдается рост первичных продуктов окисления – кислотного, перекисного, анизидинового, цветного чисел. Этот процесс автоокисления ведет к нарушениям пищевых показателей и к токсичности продукта. За счет установленных режимов ультразвуковой обработки в растительном масле приостанавливаются процессы окисления. Продукты окисления за счет акустических микропотоков осаждаются и адсорбируются в фильтрационной перегородке. Очистка растительных масел высокоэффективна, за счет обработки ультразвуком из масла выводятся все окислительные составляющие, восстанавливаются исходные показатели и цветность.

Динамика экстрагирования ингибиторов СОИ при использовании традиционной технологии, в основе которой лежат использования воды и реактивных форм кислорода, продолжительна. Среднее значение экстрагированных ингибиторов, обработанных в течении 1 часа составляет 57%, в течении 4 часов - 18%, 6 часов - 11% и 8 часов - 2%. Рациональным, с позиции продолжительности обработки, считается 4 часа, при большей длительности замачивания эффективность экстрагирования падает на 1/3. Установлено что при постоянной скорости химического взаимодействия сои с водой продолжительность и эффективность обработки можно снизить за счет ускорения процесса массообмена. Цель была достигнута за счет обработки измельченного зерна ультразвуком. Эффективность обработки в ультразвуковом поле при установленных режимах обработки повысилась за счет активности антиферментов более чем на 40%. И за 30-40 минутную продолжительность обработки в поле ультразвука экстрагирование ингибиторов достигает 90%.

Таким образом на основании анализа существующих технологий очистки зерна можно предположить, что высокая эффективность технологических операций мойки и увлажнения при подготовке зерна к помолу может быть достигнута путем интенсификации процессов в ультразвуковом поле.

## **1.7 Выводы**

1. Результаты анализа литературных и патентных источников показали, что существующие технологии, принятые для подготовки зерна к помолу, многооперационны с использованием значительного количества технических средств и производственных площадей, сложны, длительны по времени и финансово затратны. Их использование при производстве обойной муки нерационально, а принятые простые схемы не обеспечивают качество очистки и отволаживания;

2. Принятые в настоящее время технологии очистки и отволаживания при простом помолу нестабильны и зависят от состояния обрабатываемого зерна. Для обеспечения качества подготовительных операций, необходимо создание физико-механических условий, воздействие которых интенсифицировало бы процесс оmyвающего и проникающего действия воды на зерно при снижении затрат на средства механизации;

3. Установлено, что наиболее полно отвечающим поставленным требованиям являются технологии, основанные на использовании нелинейных ультразвуковых явлений, создающих акустические силы и течения микропотоков вблизи оmyваемого объекта с выносом измельченных загрязнителей и микронасекомых в жидкость и ускорением проницаемости жидкости в зерно для его увлажнения.

## **2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ В УСТАНОВКЕ ДЛЯ ОЧИСТКИ И ОТВОЛАЖИВАНИЯ ЗЕРНА В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ**

### *Программа исследований*

Исходя из материалов исследования, представленных в первом разделе, установлена необходимость более тщательной подготовки зерна, прошедшего предварительную очистку к помолу. Для получения высококачественной муки оболочка зерна должна быть очищена от минеральных загрязнений и зараженности. При сортовом помоле это достигается путем неоднократной сухой и мокрой очистки, высвобождения зерна от оболочки, части алейронового слоя, зародыша. В случае простого помола требования к подготовке зерна понижены и, соответственно, то что не очищено, особенно в бородке и бороздке, идет в муку. Одновременно с этим для достижения необходимых технологических параметров зерна его необходимо отволаживать. Здесь не удовлетворяют длительность и сложность соблюдения процесса, а также значительное количество емкостей для отволаживания.

В рассматриваемой работе эффективность подготовки зерна к помолу достигается за счет использования ультразвуковых кумулятивных микротечений. И в этой связи в теоретическом разделе рассматриваются вопросы исследования конструктивных параметров установки и режимных характеристик процесса очистки и отволаживания зерна.

### **2.1 Теоретический анализ механизма очистки зерна, разрушения его оболочки и отволаживания**

В литературных источниках [104-139] под термином ультразвуковая кавитация понимается образование в жидкости парогазовых полостей в фазе отрицательного давления звукового поля. По сути это процесс нарушения

сплошности жидкости в ее слабых местах, где по какой-то причине нарушена симметрия межмолекулярных сил сцепления частиц жидкости. В фазе положительного давления происходит захлопывание такой полости, причем этот процесс сопровождается мощным гидродинамическим ударом, в результате которого и происходит разрушение твердых тел. При этом интенсивность звукового поля должна превышать кавитационный порог в  $1 \text{ Вт/см}^2$  [104-109].

Ряд авторов объясняют интенсивность кавитационного разрушения материала наличием трещин и пор на его поверхности [111-114]. Что для нашего случая, заключающегося в необходимости интенсифицировать процесс разрушения поверхности зерна очень важно, так как при этом удаляются минеральные загрязнения и микронасекомые. Это объясняется тем, что в жидкости, которая находится в трещинах и порах оболочки и загрязнения могут развиваться местные кавитационные полости, которые при захлопывании создают значительные давления, воздействующие на поверхность изнутри, для нашего случая, на оболочку зерна. Установлено, что в трещине длиной 1 мм и шириной 0,1 мм при постоянном атмосферном давлении могут возникать местные локальные давления до 50 атмосфер. Возникающее в жидкости давление, сопровождаемое гидравлическими ударами при захлопывании кавитационных полостей, создает гидравлический клин, раздвигающий и разрушающий поверхность твердого тела. Под действием высоких локальных давлений, возникающих при захлопывании кавитационной полости, жидкость вдавливается в микротрещины и поры, а воздух, находящийся в них, подвергаясь адиабатическому сжатию, нагревается до высоких температур. Одновременно с этим происходит нагрев слоя жидкости, проникшей в пору и соприкасающейся с нагретым воздухом. В момент спада местного давления жидкость и образовавшиеся пары, находящиеся под большим давлением, выбрасываются из микротрещины или поры, что ведет к интенсивному разрушению поверхности оболочки и загрязнений.

Исследованиями [120-131] методом скоростной киносъемки с частотой  $3 \cdot 10^5$  кадров в секунду установлено образование струй жидкости, которые при

захлопывании кавитационной полости, находящейся вблизи твердой стенки, рисунок 13, повышает скорость указанных струй до 50...100 м/сек.

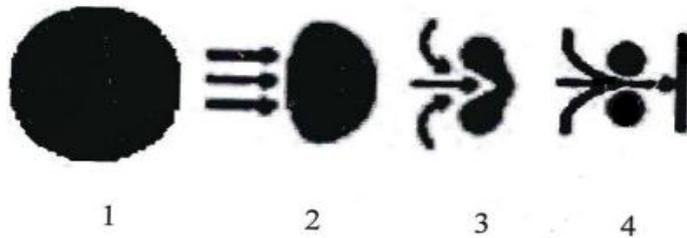


Рисунок 13 – Механизм образования струи жидкости при захлопывании кавитационной полости

1-образование парогазового пузырька; 2-сжатие; 3-деление на 2 полости; 4-захлопывание пузырька.

Благодаря кавитационному захлопыванию полости молекулы воды расщепляются на валентно ненасыщенные весьма реакционноспособные Н и ОН радикалы [13-1374]:



Время жизни этих радикалов  $10^{-2}$ - $10^{-4}$  сек. Ионы водорода проникают в кристаллическую решетку твердого тела, чем способствуют понижению прочности обрабатываемого вещества [138]. Появление в воде свободных гидроксильных радикалов должно интенсифицировать процесс отволаживания зерна из-за стремления свободных отрицательно заряженных гидроксильных групп к нейтральному состоянию.

Исследования механизма ультразвуковой очистки показывают, что преобладающую роль в очистке поверхности играют пульсирующие кавитационные пузырьки. На поверхности они совершают интенсивные колебания и порождают при захлопывании давление до 100МПа, преодолевая

силу сцепления загрязнений ( $10^2 \dots 10^3$  Па) с поверхности зерна, проникают под них, рисунок 14, разрывают и отслаивают их с поверхности зерна [139].



Рисунок 14 – Схема отделения загрязнения пульсирующими кавитационными пузырьками: а - начальный момент, б - момент разрыва и отделения

При определении параметров обработки при подготовке зерна к помолу следует учитывать, что изменение объема кавитационного пузырька тем больше, чем ниже частота ультразвуковых колебаний. Соответственно, для получения максимального давления при захлопывании пузырька, необходимо использовать нижнюю границу ультразвукового диапазона 18 кГц. Изменение объема кавитационного пузырька за долю периода, приходящуюся на стадию захлопывания сферического пузырька выражается:

$$K = R^3_{max} - R^3_{min} \Delta t \cdot f, \quad (6)$$

где:  $f$  – частота колебаний, кГц;

$\Delta t$  – время захлопывания, с;

$R^3_{max}$  и  $R^3_{min}$  – максимальный и минимальный радиусы пузырька, мм.

Экспериментальными исследованиями установлено, что воздействие на зерно в ламинарном потоке жидкости акустической кавитации, порождаемой ультразвуковыми волнами с частотой 18-18,5 кГц при плотности мощности не менее  $1 \text{ Вт/см}^2$ , называемой порогом кавитации, проявляется в виде колебаний

парогазовых пузырьков. Они сопровождаются возникновением периодического несинусоидального звукового поля с высокими пиковыми значениями давления и колебательной скорости. В кавитационной области возникают мощные гидродинамические возмущения в виде сильных импульсов сжатия (микроударных волн) и микропотоков, порождаемых пульсирующими пузырьками. По тепловой теории в момент захлопывания кавитационного пузырька внутри него развивается температура равная  $10^4$  °С. При этой температуре молекулы воды внутри кавитационного пузырька переходят в возбужденное состояние и расщепляются на радикалы Н и ОН.

На поверхность зерна, при проходе через поле акустической кавитации, интенсивно воздействуют захлопывающиеся кавитационные пузырьки. Прочность оболочек зерна, находящаяся в пределах 27...31,6 МПа, значительно меньше давления, возникающего при захлопывании пузырька, достигающего 100 МПа. Исходя из приведенного анализа сделано предположение о том, что многократные гидравлические кумулятивные удары, возникающие при захлопывании кавитационных пузырьков, должны отделять от зерна загрязнители и микрочастицы, а также вызывать разрушение оболочки зерна и частичное ее отделение от алейронового слоя, что значительно сократит время и энергозатраты на ее полное отделение в последующем.

## **2.2 Исследование и обоснование ультразвуковых параметров обработки зерна**

### **2.2.1 Анализ гидролиза в ультразвуковом поле**

Исходя из того, что при обработке зерна ультразвуком преследуется цель создания совмещенных процессов очистки зерна и отволаживания наиболее значимым параметром установлено время отволаживания зерна в ультразвуковой среде. Для решения поставленной задачи исследована реакция гидролиза, рисунок 15.

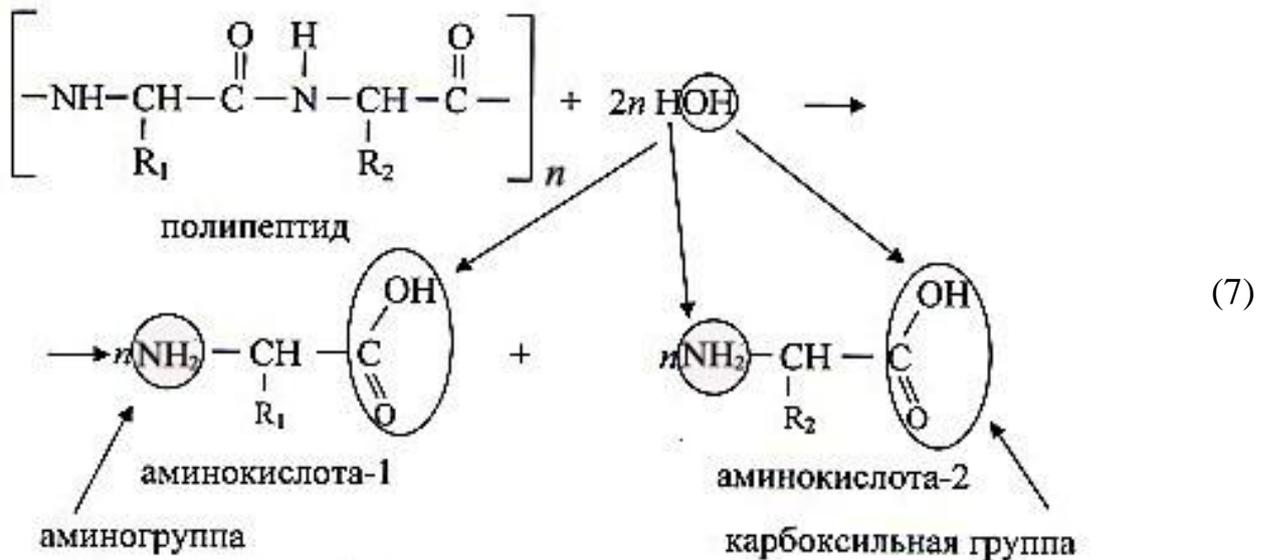


Рисунок 15 – Реакция гидролиза белков

Из формулы реакции гидролиза белков видно, что гидроксильная группа из молекулы воды присоединяется к полипептиду разрывая его на аминокислоты и образует в них карбоксильную группу COOH. Высвобождающиеся при этом ионы водорода соединяются с азотом и создают аминную группу NH<sub>2</sub> [140]. Для осуществления этой реакции, наиболее значимым является разрыв связей в молекуле воды, так как молекула белка имеет неустойчивые соединения [141]. Для осуществления процесса молекулам воды необходимо развернуться таким образом, чтобы содержащийся в ней кислород находился между углеродом белка и своими собственными ионами водорода. Только после этого становится возможна сама реакция. Для такой рекомбинации молекул воды относительно молекул белка в статическом режиме без интенсификации процесса требуется не менее 120 минут, время же самой реакции незначительно и составляет 15-30 секунд [142]. Таким образом, в случае воздействия ультразвукового поля на воду возможно разделение ее молекулы на гидроксильную группу и ион водорода [143]. Следовательно, появление в растворе свободных отрицательно заряженных гидроксильных групп, притягивающихся к молекуле белка и занимающих как свободные углеродные связи и в итоге способствующих

разрыву полипептидной цепи не будут зависеть от времени на реструктуризацию и рекомбинацию молекул воды. Из выше сказанного следует, что гидролиз белка может быть осуществлен за 15-30 секунд, необходимых только на осуществление реакции.

### 2.2.2 Обоснование частоты ультразвуковых колебаний при подготовке зерна к помолу

Из теоретического анализа кавитационных [121] явлений следует, что потенциальная энергия жидкости, в которой образуется кавитационная полость с максимальным радиусом  $R_{\text{макс}}$ , равна:

$$E = \frac{4}{3} \pi R_{\text{макс}}^3 \cdot P_{\text{вн}}, \text{ Дж}, \quad (8)$$

где:  $R_{\text{макс}}$  – максимальный радиус кавитационной полости, м;

$P_{\text{вн}}$  – давление в жидкости, Па.

В этом уравнении  $P_{\text{вн}}$  равно давлению в окружающей жидкости, действующему на кавитационную полость в момент времени, когда она достигает максимального радиуса. Величина этого давления определяется суммой звукового ( $P_{\text{зв}} \sin \omega t$ ) и статического давлений:

$$P_{\text{вн}} = P_{\text{зв}} \sin \omega + P_{\text{ст}}, \text{ Па}, \quad (9)$$

где:  $P_{\text{зв}} \sin \omega t$  – звуковое давление, Па;

$P_{\text{ст}}$  – статическое давление, Па.

Выражение для определения максимального радиуса кавитационной полости имеет вид:

$$R_{\text{макс}} = \frac{0,4}{f} \left(1 - \frac{P_{\text{ст}}}{P_{\text{зв}}}\right) \sqrt{\frac{P_{\text{зв}}}{\rho}}, \text{ м}, \quad (10)$$

где:  $f$  – частота звукового поля, Гц;

$P_{\text{ст}}$  – статическое давление жидкости, Па;

$P_{\text{зв}}$  – амплитудное значение звукового давления, Па;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

В свою очередь амплитудное значение звукового давления определено выражением:

$$P_{\text{зв}} = \rho \cdot C \cdot f \cdot A, \text{ Па}, \quad (11)$$

где:  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$C$  – скорость звука в жидкости, м/с;

$f$  – частота колебаний, Гц;

$A$  – амплитуда колебаний излучателя, м.

Из вышеприведенных выражений следует, что потенциальная энергия жидкости, в которой образуется кавитационная полость, а так же давление в жидкости при захлопывании этой кавитационной полости, тем больше, чем больше максимальный радиус кавитационной полости  $R_{\text{макс}}$ . Это объясняется тем, что энергия, выделяющаяся в жидкости при захлопывании кавитационной полости не может быть больше, чем потенциальная энергия жидкости в которой образуется полость и практически равна последней.

Выражение (11) устанавливает, что величина максимального радиуса обратно пропорциональна частоте звукового поля. И в этой связи исследовалось влияние частоты звукового поля на эффективность кавитационного воздействия. Известно, что кавитационная область представляет собой множество кавитационных полостей, занимающих определенную часть пространства в

определенном объеме жидкости. При этом количество кавитационных полостей зарождается акустической энергией, которая передается жидкости. А общая потенциальная энергия жидкости в кавитационной области  $E_{об}$ , в которой образуются кавитационные полости, равна сумме значений потенциальной энергии от образования в жидкости множества кавитационных полостей. Таким образом используя выражение (8) можно записать:

$$E_{об} = \frac{4}{3} \pi R_{макс}^3 \cdot P_{вн} \cdot n, Дж, \quad (12)$$

где:  $n$  – количество кавитационных полостей, шт.

Исходя из того, что количество вводимой в жидкость акустической энергии является величиной постоянной принимаем, что и давление в жидкости ( $P_{вн}$ ) является постоянным. Приняв, что количество кавитационных полостей в кавитационной области при исходной частоте  $f_1$  равно  $n_1$ , а при исходной частоте  $f_2$  равно  $n_2$  и при неизвестной связи между ними запишем уравнение для каждого из значений  $n$ . Учитывая то, что общая потенциальная энергия жидкости в кавитационной области не изменилась (так как она равна вводимой в жидкость акустической энергии), оба полученных уравнения приравнены друг другу и тогда с учетом выражения (9) получим:

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi \cdot \left[ \frac{0,4}{f_1} \left( 1 - \frac{P_{см}}{P_{зв}} \right) \sqrt{\frac{P_{зв}}{\rho}} \right]^3 \cdot P_{вн} \cdot n_1 &= \frac{4}{3} \pi \cdot \left[ \frac{0,4}{f_2} \left( 1 - \frac{P_{см}}{P_{зв}} \right) \sqrt{\frac{P_{зв}}{\rho}} \right]^3 \cdot P_{вн} n_2; \\ \left( \frac{0,4}{f_1} \right)^3 \cdot n_1 &= \left( \frac{0,4}{f_2} \right)^3 \cdot n_2; \\ \frac{n_1}{f_1^3} &= \frac{n_2}{f_2^3}. \end{aligned} \quad (13)$$

Отсюда следует, что количество кавитационных полостей в кавитационной области меняется от значения  $n_1$  к значению  $n_2$  в кубической степени и зависит от изменения частоты, то их количество будет иметь прямую связь от устанавливаемой оптимальной частоты:

$$n_2 = n_1 \cdot (f_2/f_1)^3. \quad (14)$$

Из выражения (14) очевидно, что при увеличении числа кавитационных полостей снижается энергия, которая выделяется при захлопывании единичной кавитационной полости. Условно, для разрушения оболочки зерна и ее отделения, а также отрыва минеральных загрязнений с его поверхности, необходима вполне конкретная величина энергии от захлопывания единичной кавитационной полости вне зависимости от количества этих полостей.

Произведя расчет потенциальной энергии окружающей жидкости для единичной кавитационной полости с использованием частоты нижнего порога ультразвука 18 кГц и с амплитудой  $21 \cdot 10^{-6}$  м, в соответствии с формулой (11) для определения амплитудного значения, установлены значения параметров:

$$P_{зв.} = 3,561 \cdot 10^6 \text{ Па}; R_{\max} = 0,00126 \text{ м}; E = 0,84 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

А для частоты ультразвука 18,5 кГц они равны:

$$P_{зв.} = 3,66 \cdot 10^6 \text{ Па}; R_{\max} = 0,00123 \text{ м}; E = 0,77 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

Из приведенных данных следует, что увеличение частоты ультразвуковых колебаний от 18 до 18,5 кГц снижает потенциальную энергию жидкости, окружающей кавитационные полости на 8,3%, что говорит о нецелесообразности дальнейшего повышения частоты. Опираясь на полученные данные можно осуществить выбор ультразвукового оборудования для очистки зерна,

способного генерировать колебания с частотой, находящейся на нижней границе 18 кГц. В разрабатываемой установке принято использовать систему из генератора ультразвука и преобразователей, имеющих возможность создавать подходящий низкочастотный диапазон ультразвуковых колебаний с варьированием в интервале от 18 до 18,5 кГц.

### **2.2.3 Обоснование температурных параметров**

При очистке и отволаживании зерна следует учитывать то, что при температуре от 50<sup>0</sup>С и выше происходит денатурация его белка. Под денатурацией понимается нарушение общего плана уникальной структуры нативной молекулы белка, преимущественно ее третичной структуры, приводящее к потере характерных для нее свойств растворимости. При одной и той же температуре степень денатурации зависит от продолжительности воздействия тепла и от влажности белка. Чем меньше влаги содержит белок, тем он устойчивее к действию повышенных температур и наоборот – при большей влажности белок легче денатурируется [140]. Все белки денатурируют при нагревании их выше 50<sup>0</sup>С [141]. В этой связи даже кратковременный нагрев увлажненного зерна выше 50<sup>0</sup>С недопустим. В свою очередь, интенсивность влагопереноса в зерне резко возрастает в температурном интервале от 20 до 30<sup>0</sup>С. Нагревание и охлаждение зерна при его подготовке к помолу базируется на процессе теплообмена. В данных процессах считается, что зерно является открытой термодинамической системой и изменение его свойств в результате внешнего воздействия на него зависит от интенсивности самого процесса и его теплофизических свойств [142]. Для подтверждения этой теории в экспериментальных исследованиях был принят интервал температур от 20 до 40<sup>0</sup>С.

## **2.3 Обоснование конструктивных параметров установки для очистки и отволаживания зерна**

Очистка и отволаживание зерна намечены по схеме:

- формирование воднозерновой смеси и ее проход через ультразвуковое поле;
- отволаживание и очистка зерна с учетом его исходных показателей влажности с последующим отделением воды, содержащей диспергированные минеральные загрязнения и частицы зараженности на оболочке.

В соответствии с принятой схемой очистки и отволаживания, необходимо дать теоретическое обоснование распространению ультразвуковых колебаний в воде и пропорциональное отношение воды и зерна. Это содействует созданию условий, при которых можно создать эффект акустической кавитации в получаемой смеси. В свою очередь, параметры ультразвука, совокупный объем зерна и воды, производительность, а также время воздействия ультразвукового поля при конструктивном обосновании параметров установки должны перерасти в линейные размеры камеры озвучивания, количества и мощности источников ультразвукового излучения, их расположения. Учитывая разнообразие параметров влажности сырья, поступающего в переработку и необходимого транспортирующего зерно устройства в установке, что создаст возможность варьирования временем процесса обработки для получения необходимых помольных показателей зерна.

### **2.3.1 Обоснование условий распространения ультразвуковых волн в воде**

Анализом теории ультразвуковой акустической кавитации [28-30] установлено, что порог ее возникновения составляет  $1 \text{ Вт/см}^2$ . Анализ характера распространения и зависимость интенсивности ультразвукового поля от расстояния до обрабатываемого зерна ультразвукового источника, рассмотрен на схеме, приведенной на рисунке 15.

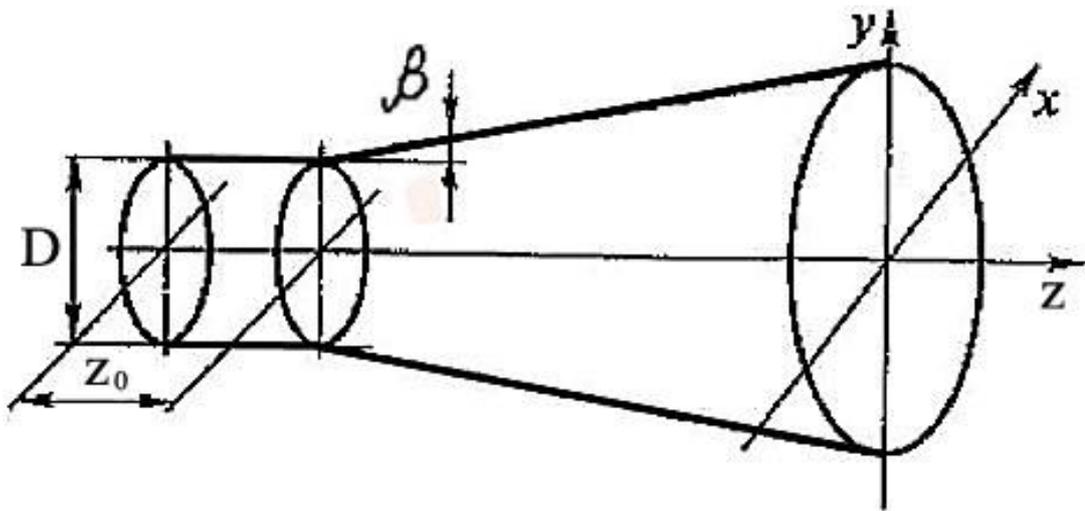


Рисунок 15 – Схема интенсивности распространения ультразвуковых колебаний от расстояния акустического источника излучения

Теоретически вблизи поверхности плоского высокочастотного излучателя ультразвуковое поле сосредоточено в цилиндрическом объеме диаметром  $D$  и длиной  $Z_0$ . Интенсивность ультразвука в данном объеме не убывает, что обуславливается закономерностями, протекающими в поле со сложным характером наложения волн, излучаемых отдельными участками поверхности излучателя. Поле конусообразно расширяется, тем самым изменяя интенсивность, начинается с расстояния  $Z_0$ , определяемого выражением:

$$Z_0 = D/4\lambda, \text{ м}, \quad (15)$$

где:  $D$  – диаметр источника ультразвука, м;

$\lambda$  – длина волны, м, определяемая выражением:

$$\lambda = C/f, \text{ м}, \quad (16)$$

где:  $C$  – скорость звука в воде, м/с;

$f$  – частота ультразвукового поля, Гц.

Расчетом выражений (15) и (16) для ультразвукового поля с принятой частотой ультразвуковых колебаний, составляющих 18 кГц, установлена длина волны и расстояние от стандартного источника диаметром 0,2 м, на котором необходимая интенсивность поля не убывает и равна 0,6 м.

Область, находящаяся на расстоянии большем  $Z_0$ , в нашем случае 0,6 м, характерна тем, что амплитуда давления в ней падает пропорционально расстоянию от излучателя. И начиная с расстояния в 0,6 м от излучателя ультразвуковой пучок рассеивается под углом  $\beta$  между направлением распространения ультразвуковой волны и образующей пучка, который определяется условием:

$$\sin\beta = \frac{A \cdot \lambda}{D}, \quad (16)$$

где:  $A$  – амплитуда колебаний, для круглой пластинки  $A = 1,22$  м;

$D$  – диаметр источника ультразвука, м;

$\lambda$  – длина волны, м.

Используя выражения (16) и (17) для определения угла рассеивания ультразвукового поля с частотой 18 кГц, создаваемого ультразвуковым преобразователем с диаметром излучающей головки 0,2 м, получено  $\sin\beta=30^0$ .

В ближней зоне, до рассеивания ультразвукового пучка, интенсивность имеет несколько максимумов. В дальней зоне, при рассеивании поля, интенсивность имеет один максимум, находящийся на границе начала рассеивания и монотонно падающего по мере удаления от оси пучка. Вдоль оси ультразвуковая волна в однородной среде затухает, в основном, в результате ее поглощения. Интенсивность ультразвука уменьшается при удалении от источника согласно уравнению:

$$I = I_0 e^{-2\alpha \cdot x}, \quad (18)$$

где:  $I_0$  – интенсивность ультразвука вблизи источника;

$\alpha$  – коэффициент поглощения;

$e$  – число Непера ( $e = 2,72$ );

$x$  – расстояние от границы рассеивания поля, м.

Коэффициент поглощения ультразвуковых волн в жидких средах пропорционален их вязкости и квадрату частоты колебаний:

$$\alpha = \frac{2\eta \cdot f^2}{3 \cdot \rho \cdot c^3}, \quad (19)$$

где:  $\eta$  – вязкость жидкости, Па·с;

$f$  – частота ультразвуковых колебаний, кГц;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – скорость звука в жидкости, м/с.

Исходя из выражения (19) получено значение коэффициента поглощения ультразвуковых волн в воде, что позволяет обеспечить конструктивные размеры установки с оптимальным распределением ультразвуковых волн  $\alpha = 64 \cdot 10^{-3}$ .

По выражению (18) рассчитывается оптимальная интенсивность ультразвукового поля с плотностью мощности 1 Вт/см<sup>2</sup> на расстоянии 1 и 0,1 м от начала его рассеивания  $I = 0,99$  Вт/см<sup>2</sup>.

Из расчетов следует, что в воде интенсивность ультразвукового поля с частотой 18 кГц, создаваемого источником диаметром 0,2 м на расстоянии от источника 0,6 м не изменяется, а при удалении на 0,7 м изменяется незначительно. И в этой связи в расчетах конструктивных параметров установки использовано расстояние в 0,6-0,7 м от источника ультразвука.

### 2.3.2 Обоснование расположения ультразвуковых преобразователей с учетом линейных размеров камеры озвучивания и производительности установки

Исходя из распространения в воде кумулятивных ультразвуковых колебаний с частотой 18 кГц, созданных источником диаметром 0,2 м, ультразвуковое поле сохраняет свою интенсивность на расстоянии 0,6-0,7 м от источника в пучке диаметром 0,2 м. Полученные данные стали определяющими для расчета конструктивных параметров установки для очистки и отволаживания зерна. Так как при обработке зерна не допускается неравномерное его увлажнения, то и в установке изменение интенсивности ультразвукового поля недопустимо. Исходя из этого, принято равномерное расположение пяти ультразвуковых преобразователей по периметру окружности с радиусом 0,2 м для покрытия части площади получившегося круга, удовлетворяющий процессу обработки. Обосновывается это тем, что длина хорды при делении окружности диаметром 0,2 м на шесть частей равна 209 мм, соответственно зона покрытия ультразвуковым полем от каждого источника  $\varnothing 200$  мм составит 99% от площади всего круга. От количества преобразователей вдоль камеры озвучивания зависит производительность установки. На рисунке 16 представлена схема расположения и зона воздействия ультразвуковых преобразователей в масштабе 1:20.

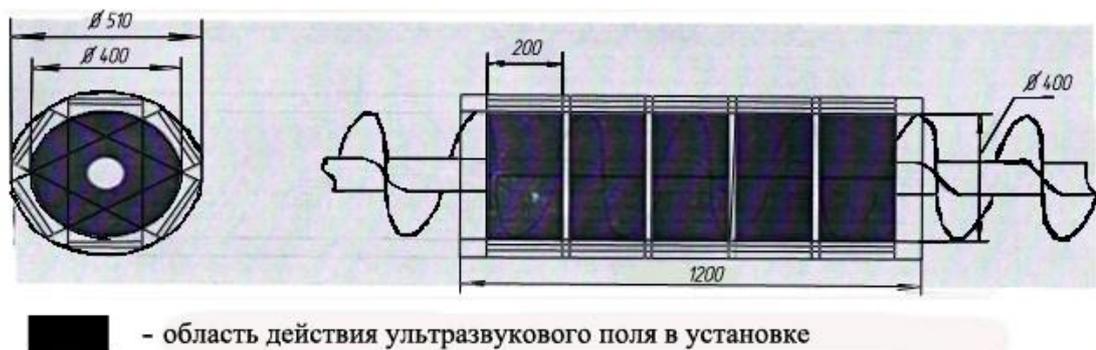


Рисунок 16 – Схема расположения ультразвуковых преобразователей в емкости установки

Исходя из принятой схемы камера озвучивания имеет форму цилиндра соответственно выражение, определяющее ее объем имеет вид:

$$V_k = \frac{\pi}{4} D_K^2 \cdot L, \text{ м}^3, \quad (20)$$

где:  $D_k$  – диаметр камеры, м;

$L$  – длина камеры озвучивания, м.

В свою очередь длина камеры озвучивания зависит от радиуса ультразвуковых преобразователей и расстояний между ними:

$$L = R_u \cdot n + S_u \cdot n, \text{ м}, \quad (21)$$

где:  $R_u$  – радиус ультразвукового источника, м;

$n$  – количество рядов источников вдоль камеры озвучивания, шт;

$S_u$  – расстояние между рядами преобразователей, м.

Для удобства сборки разработанной установки, а также возможности изменения количества рядов преобразователей, для варьирования ее производительностью, расстояние между ними принято равным 20 мм. Исходя из этого и установленных ранее размеров получены рациональные величины длины  $L = 1,1$  м и объема  $V_k = 0,138$  м<sup>3</sup> камеры озвучивания.

Производительность установки, исходя из времени обработки и принятых размеров камеры озвучивания, определяется параметрами транспортирующего шнека:

$$Q = \frac{E \cdot n \cdot \varphi \cdot \rho_n \cdot R \beta D}{0,275} = \frac{1 \cdot 8 \cdot 0,4 \cdot 0,92 \cdot 1 \cdot 0,4}{0,275} = 3,747 \text{ т/ч} \quad (22)$$

где:  $Q$  – расчетная производительность конвейера, т/ч;

$E$  – отношение шага винта шнека к его диаметру;

$N$  – частота вращения винта,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$\rho_n$  – насыпная плотность зерна,  $\text{т/м}^3$ ;

$R_\beta$  – коэффициент снижения производительности от наклона конвейера;

$\varphi$  – коэффициент заполнения емкости;

$D$  – диаметр винта, м.

### 2.3.3 Обоснование объема водно-зерновой смеси

Для определения общего объема водно-зерновой смеси в емкости установки необходимо установить пропорциональность отношения воды и зерна, при котором будет возможен проход ультразвуковой волны в воде через весь объем обрабатываемой водно-зерновой массы. Следовательно, нужно суммировать объем воздушного пространства в общем объеме зерна и количество влаги, поглотившееся зерном. Так же значимым является создание условий, при которых возникновение акустической кавитации, создаваемой кумулятивными ультразвуковыми волнами, будет одинаково возможно по всему объему полученной водно-зерновой смеси. В связи с этим введен коэффициент запаса кавитационной равномерности, характеризующий увеличение межзернового пространства. Таким образом, объем свободного пространства в обрабатываемом зерне и его поглощающую способность можно представить в виде:

$$V_{взс} = V_з + (V_{мн} + V_{вн}) \cdot \Omega, \text{ м}^3, \quad (23)$$

где:  $V_з$  – объем зерна,  $\text{м}^3$ ;

$V_{мн}$  – объем межзернового пространства,  $\text{м}^3$ ;

$V_{вн}$  – объем влаги, поглотившейся зерном,  $\text{м}^3$ ;

$\Omega$  – коэффициент запаса кавитационной равномерности.

Отношение объема межзернового пространства  $V_{mn}$  ко всему объему, занимаемому зерновой массой  $V_3$ , называют скважистостью. Этот показатель находится в пределах от 0,30 до 0,80. В расчетах использован максимально возможный параметр и следовательно:

$$V_{mn} = 0,8 \cdot V_3, \text{ м}^3. \quad (24)$$

Максимальный объем воды, который останется в зерне, предлагается рассчитывать исходя из наибольшей разницы во влажности исходного и обработанного зерна. Так, в исследованиях использовалось зерно с влажностью 12,5%, а максимально допустимая влажность зерна перед помолом составляет 17,5%, принята разность в 5%.

$$V_{en} = (V_3 - V_{mn}) \cdot 0,05, \text{ м}^3. \quad (25)$$

Произведя преобразования выражений (24) и (25) получим:

$$V_{en} = (V_3 - 0,8V_3) \cdot 0,5 = 0,01V_3, \text{ м}^3. \quad (26)$$

Коэффициент запаса кавитационной равномерности  $\Omega$ , учитывает необходимость единичного зерна быть окруженным водной пленкой, имеющей толщину не менее длины максимального радиуса кавитационного пузырька. Это может быть достигнуто только при увеличении межзернового пространства. Гипотетически при  $\Omega=1,5$  водное пространство между зернами будет превышать максимальный радиус кавитационного пузырька, равный 1,3 мм. Следовательно, формулу (23) можно представить в виде:

$$V_{гзс} = V_3 + (0,8V_3 + 0,01V_3) \cdot \Omega = 2,215V_3, \text{ мм}^3. \quad (27)$$

Из пропорции (27) установлен необходимый объем воды  $V_в$  для осуществления предлагаемой обработки.

$$V_г = 1,215V_3, \text{ м}^3. \quad (28)$$

Исходя из произведенных расчетов принимаем объем воды и зерна 2 к 3. Соответственно и расчет производительности установки по выходу обрабатываемого зерна примет вид:

$$Q_3 = Q/1,5 = 3,74/1,5 = 2,5 \text{ т/ч.} \quad (29)$$

Все установленные рациональные конструктивные параметры установки сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Сводные расчетные конструктивные параметры установки

№ п/п	Наименование параметра, ед.измерения	Показатель	№ п/п	Наименование параметра, ед.измерения	Показатель
1	Максимальный радиус кавитационной полости, $R_{\max}$ , м	0,00123	9	Направление распространения УЗ волн, $\beta$ , град.	30
2	Кавитационная область, $E_{\text{об}}$ , Дж	$0,77 \cdot 10^{-3}$	10	Длина установки, $h$ , м	1,1
3	Частота УЗ колебаний, $f$ , кГц	18	11	Диаметр камеры озвучивания, м	0,4
4	Длина волны, $\lambda$ , м	0,083	12	Объем камеры озвучивания, $V_k$ , м <sup>3</sup>	0,138
5	Амплитуда УЗ колебаний, $A$ , м	1,22	13	Диаметр источника УЗ, м	0,2
6	Расстояние от источника УЗ колебаний, м	0,6	14	Количество УЗ источников, шт	30
7	Коэффициент поглощения УЗ волн, $\alpha$	$64 \cdot 10^3$	15	Производительность установки, $Q$ , т/ч	2,5
8	Интенсивность УЗ волн, $I$ , м/с	0,99	16	Потребляемая мощность, кВт	5

## 2.4 Выводы

1. Установлено, что в воде при интенсивности ультразвукового поля не менее  $1 \text{ Вт/см}^2$  возникает эффект акустической кавитации, ее разрушающее воздействие, оказываемое на поверхность зерна максимально при использовании нижней границы ультразвука 18 кГц. При захлопывании кавитационного пузырька возникает давление до 100 МПа, которое превышает максимальное давление, необходимое для разрушения оболочки зерна, составляющее 31,6 МПа

и отрыва загрязненностей при 1 МПа. Следовательно, в акустической области будет происходить процесс очистки зерна от минеральных примесей, полное или частичное отделение оболочки от зерна;

2. Исследованиями режимных параметров процесса обработки водно-зерновой смеси в ультразвуковом поле установлено, что реакция гидролиза белка интенсифицируется за счет кавитационного давления. С физической точки зрения вода проходит через плодую и семенную оболочки, насыщая их водой до максимальной сорбционной емкости, затем перемещается из оболочек в алейроновый слой и зародыш зерна. Там, за счет действий анатомических частей зерна и энергии связи влаги ( $10^3 \dots 10^4$  кДж/моль·м), образуется высокий градиент влажности, повышающий поверхностное напряженное состояние зерна. Вследствие длительного воздействия избыточного давления эндосперм не выдерживает этого напряжения, что приводит к образованию микротрещин с диффузионным переносом воды в крахмалистую часть зерна. Интенсификация процесса также происходит за счет выделения из воды свободных гидроксильных групп, которые притягиваются к молекуле белка и занимают как свободные углеродные связи, так и способствующие разрыву полипептидной цепи, что позволяет сократить время отволаживания зерна до 30 секунд;

3. Генератор и пьезоэлектрические преобразователи ультразвуковых колебаний выбраны с частотными параметрами нижней границы ультразвука 18 кГц. Установлено, что при повышении частоты ультразвуковых колебаний происходит увеличение числа кавитационных полостей в воде, тем самым повышается и энергия, выделяемая при захлопывании единичной кавитационной полости. Определен температурный интервал обработки, составляющий  $20 \dots 40^\circ\text{C}$ .

### **3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Исходными данными для разработки программы исследований послужили цели и задачи исследований. В программу лабораторных исследований входило:

- анализ физико-механических свойств зерна до и после обработки в лабораторной установке;
- анализ установленных экспериментальных зависимостей и проверка выражений, аналитически описывающих процесс подготовки зерна к помолу;
- получение исчерпывающих данных для проектирования и расчета в компьютерных программах промышленного образца установки, осуществляющей подготовку зерна к помолу и установление ее рациональных режимов обработки.

#### **3.1 Общая методика экспериментальных исследований**

Экспериментальные исследования проводились поэтапно в следующей последовательности:

- выбор на основе теоретических исследований лабораторного образца машины (лабораторной установки);
- подготовка лабораторного оборудования и аппаратуры к работе;
- разработка частных методик экспериментальных исследований;
- проведение опытов и анализ результатов эксперимента;
- проработка конструктивных элементов системы на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований.

В основу методики положена логическая взаимосвязь, обеспечивающая возможность изучения влияния четырех таких исследуемых факторов как температура, частота ультразвуковых колебаний, интенсивность ультразвукового поля и время обработки на оценивающие показатели качества

обработанного зерна [147-149]. В качестве лабораторной установки была принята УЗУ4, рисунок 18, позволяющая варьировать частотой ультразвуковых колебаний от 18 до 19 кГц и температурой воды от 20 до 60 °С, что дает возможность определения рационального интервала режимных параметров обработки.

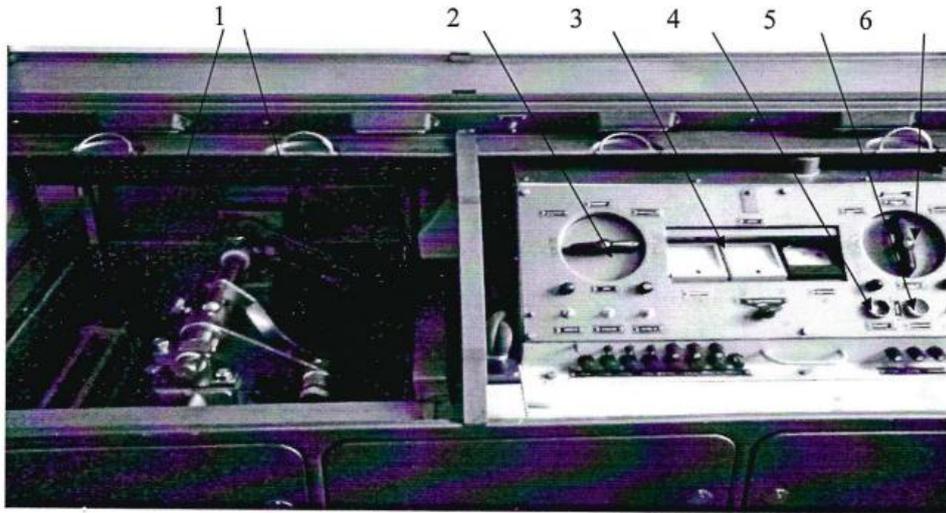


Рисунок 17 – Лабораторная установка УЗУ4

1-ультразвуковая ванна, 2-переключатель питания ультразвука между ваннами, 3-панель приборов, 4-кнопка пуск, 5-кнопка стоп, 6-переключатель питания ТЭНов левой и правой ванны.

За основные критерии оптимизации принимались: абсолютное количество минеральных загрязнений на поверхности зерна; показатель его зольности; влажности; содержание клейковины; белка; микротвердости эндосперма.

Определение количества повторений опытов осуществлялось с учетом заданной надежности опыта равной 0,95 и рассчитывалось по выражению: [151]

$$\Delta n(\alpha) = \pm 3\sigma, \quad (30)$$

где:  $\sigma$  – заданная надежность опыта.

Для нашего случая принята  $\Delta n(\alpha) = 2,85$ , то есть трехкратная повторяемость опыта.

### 3.2 Методика и средства лабораторных исследований

Лабораторные исследования проводились по классической схеме, фиксировались все факторы, влияющие на очистку от загрязнений и микронасекомых, увлажнение зерна, а также микротвердость эндосперма, процентное содержание белка и клейковины.

Для оценки качества очистки и отволаживания зерна в лабораторной установке выбирались пробы зерна до и после его обработки в установке. Ультразвуковая обработка зерна осуществлялась по переменным трем параметрам, температура воды, частоты ультразвуковых колебаний и времени их воздействия на зерно при постоянной интенсивности ультразвука, каждый из которых имел по четыре значения. В результате исследованию подверглись 48 образцов зерна, озвученных в разных режимных условиях.

Для упорядоченного получения экспериментальных данных, каждому образцу зерна был присвоен собственный шифр, соответствующий параметрам его обработки и результатам его анализа. В таблице 6-8, показано, как закреплен шифр ко всем исследуемым образцам зерна.

Таблица 6 – Присвоение шифра образцам

Время озвучивания зерна, с	Температуры воды, °С			
	20	25	30	40
	Шифр образца			
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 7 – Присвоение шифра образцам

Время озвучивания зерна, с	Частота ультразвука, кГц			
	18	18,15	18,3	18,5
	Шифр образца			
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 8 – Присвоение шифра образцам

Температуры воды, С	Частота ультразвука, кГц			
	18	18,15	18,3	18,5
Шифр образца				
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

Все контрольные замеры производились после прохода через установку и отжима зерна на центрифуге с максимальной скоростью вращения – 13500 мин<sup>-1</sup> в течение 30 секунд. Анализы проводились в отделе биохимии, биоконверсии и новых технологий ФГНУ РосНИИСК «Россорго», анализы влажности и площади поверхностных загрязнений зерна, проводились в лаборатории кафедры процессы и аппараты пищевых производств СГАУ имени Н.И. Вавилова.

При обработке и анализе результатов экспериментов статическими методиками использовалось современное программное обеспечение.

### **3.3 Методика лабораторных исследований физико-механических свойств зерна**

При экспериментальных исследованиях приняты к проверке те свойства зерна, которые прямым или косвенным путем характеризуют процесс подготовки зерна к помолу, влияют на его качественные и технологические характеристики и входят в аналитические зависимости, полученные во втором разделе. Все исследуемые свойства зерна определялись согласно общепринятым методам, при этом использовались ГОСТ [152-156].

#### **3.3.1 Методика определения зольности зерна**

Зольность зерна устанавливалась по ГОСТ 10847-74. Сущность метода заключается в сжигании навески зерна с последующим количественным

определением негоряемого остатка (оболочек). Зольность (X) в процентах каждой навески зерна в пересчете на сухое веществ рассчитывалось по формуле:

$$X = \frac{m_3 \times 100}{m_n(100 - W_p)}, \%, \quad (31)$$

где:  $m_3$  – масса золы, кг;

$m_n$  – масса навески размолотого зерна, кг;

$W_p$  – влажность размолотого зерна, %.

За окончательный результат принималось среднее арифметическое результатов трех параллельных проверок.

### 3.3.2 Методика определения влажности зерна

Установление процентного показателя содержания влаги в зерне велось в соответствии с ГОСТ 13586.5-93. Сущность метода заключается в обезвоживании навески измельченного зерна в воздушно-тепловом шкафу при фиксированных параметрах: температуры, продолжительности сушки и определения убыли ее массы.

Массовая доля влаги в испытуемом зерне (W) в процентах устанавливалось из выражения:

$$W = 20 \cdot (m_1 - m_2), \%, \quad (32)$$

где:  $m_1$  – масса зерна до высушивания, кг;

$m_2$  – масса зерна после высушивания, кг.

Конечный результат выражается как среднее арифметическое из трех параллельных определений.

### 3.3.3 Методика определения качества и количества клейковины

Определение качества и количества клейковины проводили в соответствии с ГОСТ 13586.1-68. Сущность метода определения массовой доли сырой клейковины в муке заключается в определении количества клейковины после отмывания ее из теста, замешанного из муки и воды при определенных условиях.

В итоге количество сырой клейковины выражалось в процентах к навеске муки массой  $25 \cdot 10^{-3}$  кг.

### 3.3.4 Методика определения микротвердости зерна

Определение микротвердости осуществлялось в соответствии с ГОСТ 22162-76. Метод основан на измерении диагонали отпечатка алмазной пирамиды, вдавливаемой в тело зерна под определенной, постоянной нагрузкой в течении одной минуты. Микротвердость единичного измерения ( $H_0$ ) в кг/мм<sup>2</sup> (9,8 МПа) вычислялось по выражению:

$$H_0 = \frac{92,7}{C}, \text{ кг/мм}^2, \quad (33)$$

где:  $C$  – диагональ отпечатка, мм.

Микротвердость одного зерна ( $H$ ) в кг/мм<sup>2</sup> вычислялась как среднее арифметическое результатов двадцати единичных измерений по формуле:

$$H = \frac{\sum H_0}{20}, \text{ кг/мм}^2. \quad (34)$$

### 3.3.5 Методика определения количества белка

Определение количества белка велось в соответствии с ГОСТ 10846-91. Настоящий стандарт распространяется на зерно и продукты его переработки и

устанавливается метод определения белка. Сущность метода заключается в минерализации органического вещества серной кислотой в присутствии катализатора с образованием сульфата аммония, разрушения сульфата аммония щелочью с выделением аммиака, отгонке аммиака водяным паром в раствор серной или борной кислоты с последующим титрованием.

### **3.4 Методика определения абсолютного количества минеральных загрязнений на поверхности зерна**

Данные исследования являются новыми и в связи с этим разработана частная методика фиксации площадей загрязнения. Размеры площадей загрязнений, используемые в расчетах, взяты с масштабированных микрофотографий бороздки и бородки зерна пшеницы, так как визуально на поверхности зерна зафиксировать загрязнения не представляется возможным. Снимки сделаны при помощи электронного микроскопа, при десятикратном увеличении, а площади загрязнений вычислены в программе компас V9 с соблюдением масштаба [157]. Общая площадь загрязнений, видимых в микроскоп и находящихся на поверхности рассматриваемых зерен, рассчитывалась по выражению:

$$S_{об.} = \sum_{i=1}^n S_i, \text{ мм}^2, \quad (35)$$

где:  $S_i$  – площадь  $i$ -х поверхностей частиц загрязнения,  $\text{мм}^2$ ;

$i$  – количество частиц загрязнений, шт.

При микроаналитическом исследовании загрязненности зерна пшеницы установлено, что практически все загрязнения находятся в бородке и бороздке зерна, а на остальной поверхности зерна они не наблюдаются. В связи с этим расчет общей загрязненности зерна осуществляется по формуле:

$$S_{об.} = S_{об.б.} + S_{бор.}, \text{ мм}^2, \quad (36)$$

где:  $S_{об.б.}$  – общая площадь минеральных частиц, находящихся в бороздке зерна, мм<sup>2</sup>;

$S_{бор.}$  – общая площадь минеральных частиц, находящихся в бороздке зерна, мм<sup>2</sup>.

В свою очередь общая площадь минеральных частиц в бороздке находится по выражению:

$$S_{(об.б.,бор)} = \sum_{i=1}^m S_i^j, \text{ мм}^2. \quad (37)$$

где:  $S_i^j$  – площади  $i$ -х поверхностей частиц загрязнения в бороздке и бороздке, мм<sup>2</sup>;

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

Для получения среднего значения суммарной площади всех видимых загрязнений на поверхности зерна исследовались 25 случайно выбранных зерен, что по закону Гаусса является достаточным количеством для нормального распределения вероятности. Тогда выражение для расчета среднего значения суммарной площади всех видимых загрязнений на поверхности исследуемого зерна примет вид:

$$S_{cp} = \frac{\sum_{z=1}^g S_z}{25}, \quad (38)$$

где:  $S_z$  – общая площадь частиц загрязнений, находящихся на поверхности  $z$ -х зерен, мм<sup>2</sup>.

Исходя из вышеописанного, площади загрязнений на зерне определялись по выражению:

$$P(S) = \sum_{i=0}^n P_i(S_i), \quad (39)$$

где:  $S_i$  – площади  $i$  – тых поверхностей частиц загрязнения, мм<sup>2</sup>;

$n$  – количество исследуемых зерен.

### **3.5 Методика определения связанной воды в зерне**

Влага содержится в зерне как в свободном, так и в связанном с коллоидными веществами виде. Содержание влаги в зерне колеблется в довольно широких пределах. Для определения связанной воды в зерне применялся метод ИК-спектроскопии [158]. Сущность метода заключается в высушивании клейковины, ее измельчении, измерении интенсивности диффузного отражения излучения в ближней инфракрасной области спектра от измельченной пробы с помощью спектрометра Infracum FT-806.

Методика определения связанной влаги заключается в снятии спектра испытуемой пробы. Вычислительное устройство спектрометра, используя заданные градуированные уравнения, рассчитывает содержание определяемых компонентов, значение которого высвечивается на экране. За окончательный результат принималось среднее арифметическое значение трех параллельных исследований.

### **3.6 Методика определения коэффициента внутреннего влагопереноса**

Коэффициент внутреннего влагопереноса зависит от размеров и вида зерна, коэффициента диффузии влаги в осушенной зоне (поверхностного влагосодержания и температуры), а также от глубины зоны испарения [159]

У пшеницы с относительно низким значением влагосодержания не обнаруживаются большие градиенты температуры в зерне при сушке, поэтому пользуются средним значением температуры зерна вместо температуры,

осушенной зоны. Отношение минимального влагосодержания к максимальному определяет глубину зоны испарения. Эмпирическое выражение для коэффициента внутреннего влагопереноса записывается следующим образом:

$$K = f\left(\frac{U}{U_0}\right), \quad (40)$$

где:  $U_0$  – внутреннее влагосодержание, %;

$U$  – поверхностное влагосодержание, %;

$f$  – коэффициент диффузии влаги.

### **3.7 Описание лабораторной установки: факторы, определяющие технологический процесс и уровни их варьирования**

Экспериментальные исследования процесса подготовки зерна к помолу проводились на лабораторной установке УЗУ4.

Из априорной информации о проведении поисковой серии опытов было установлено, что наиболее значительными факторами, влияющими на оценочные показатели технологического процесса, являются следующие управляемые параметры: частота создаваемых колебаний ультразвуковым пьезоэлектрическим преобразователем; температура воды и время обработки.

Частота кумулятивных ультразвуковых колебаний изменялась реостатом на ультразвуковом генераторе, таким образом, пьезоэлектрические преобразователи создавали ультразвуковое поле с частотным диапазоном от 18 до 19 кГц, при постоянной плотности мощности акустической кавитации.

Температура воды задавалась ТЭНом и контролировалась термометром, рисунок 18.

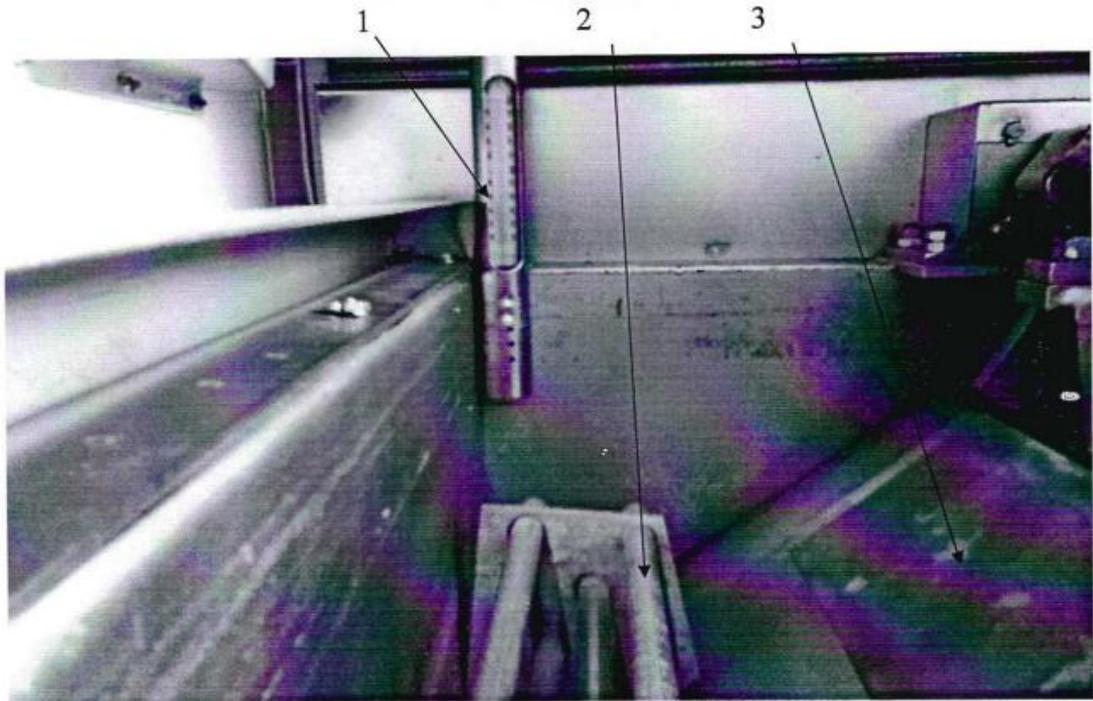


Рисунок 18 – Лабораторная ультразвуковая установка:  
1-термометр; 2- ТЭН; 3- пьезоэлектрический преобразователь.

### 3.8 Выводы

1. В работе при исследовании физико- химических свойств озвученного зерна приняты гостированные методики для установления и анализа показателей микротвердости, влажности, зольности, содержания белка и клейковины;

2. Исходя из принятой методики экспериментальных исследований была разработана частная методика определения абсолютного количества минеральных загрязнений на поверхности зерна, что позволяет контролировать качество очистки оболочки при обработке в УЗ;

3. Установлены контролируемые факторы, в качестве которых приняты: частота ультразвуковых колебаний, температура воды и время обработки.

## 4 КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ И ОТВОЛАЖИВАНИЯ ЗЕРНА И ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ

### 4.1 Обоснование конструкции установки

При проектировании конструкции установки использовались результаты исследований, проведённых на лабораторных устройствах, позволяющих устанавливать различные режимы обработки партий зерна.

Лабораторное оборудование подбиралось в зависимости от количества экспериментов с малой, средней и большой ёмкостями камер озвучивания. Всё лабораторное оборудование периодического действия.

На основе данных теоретического исследования начальные эксперименты велись на малогабаритной ультразвуковой установке с частотой в диапазоне 17-20 кГц и ёмкостью камеры озвучивания 196 см<sup>3</sup>, рисунок 20.



Рисунок 20 – Ультразвуковая установка

Целью данных исследований являлось определение приблизительных режимных показателей, которыми установлено, что наиболее результативным является частотный интервал 18–19 кГц. Не менее важным являлось определение

пропорции смеси зерна с водой в камере озвучивания. Малые габаритные размеры камеры позволили при небольших количествах зерна в объёме озвучиваемой камеры, равном  $196 \text{ см}^3$ , провести серию экспериментов.

Установлено оптимальное соотношение зерна с водой, равное 50х50%. Температура процесса была оптимальной и устанавливалась равной 30-40°C. Также принято решение о необходимости предусмотреть сменяемость загрязнённой воды.

В следующей установке, рисунок 21, снабжённой сливным краном проверялось качество отчистки в большем объёме озвучиваемой камеры, равном  $490 \text{ см}^3$ .



Рисунок 21 – Ультразвуковая ванна с регулируемой сменой воды

Установлено, что постоянная сменяемость воды ведёт к уменьшению её температуры и это ведёт к замедлению интенсивности очистки. На этом основании принято решение о том, что в конструкции установки необходимо предусмотреть систему поддержания температуры воды равной 40°C.

Распространение колебательных волн, в виде омывающих микротечениями очищаемое и отволаживаемое зерно, затруднено по причине его статичного состояния. Технически необходимо создание условий, когда зерно не слаживается и создаются условия для всестороннего омывания всей партии зёрен. Это возможно путём создания постоянного взвешенного состояния зерна

с водой. С этой целью при проведении экспериментальных исследований использовалась установка миксерного типа, рисунок 22.

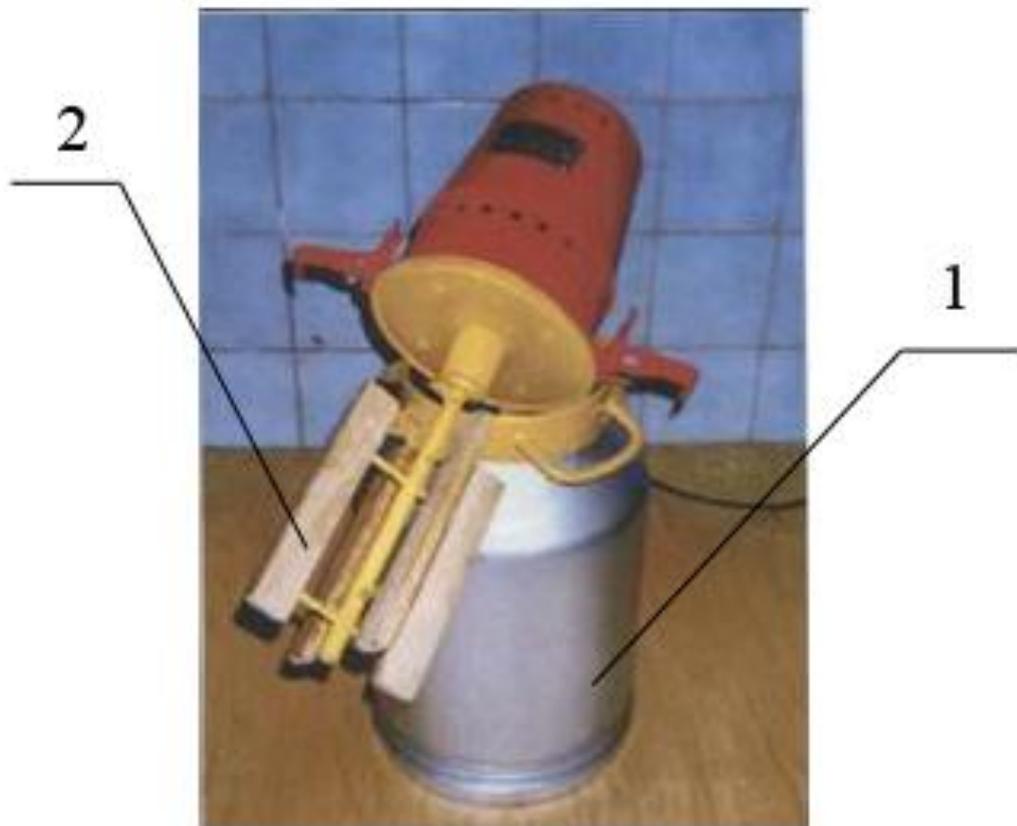


Рисунок 22 – Установка для ультразвуковой обработки зерна с перемешивающим устройством

Установка работает в следующей последовательности:

1. В камеру ёмкости 1, объёмом  $13000\text{см}^3$ , в пропорции 50х50% смеси зерна с водой устанавливается перемешивающее устройство 2;
2. Перемешивающее устройство изготовлено из деревянных брусков, с целью устранения травматизма зерна;
3. Фиксированная частота вращения полостей перемешивающего устройства, равная  $5,7\text{ мин}^{-1}$ , обеспечивается мотор-редуктором;
4. При вращении это образует взвешенную смесь зерна с водой.

Ультразвуковые элементы во время экспериментов монтируются на ёмкости. Постоянное перемешивание зерна позволяет омывать кумулятивными акустическими микропотоками всю поверхность зерна, находящегося в постоянном вращательном движении. Данными экспериментами установлено оптимальное соотношение массы зерна с водой, составляющее 60х40%.

Сериями испытаний, проведёнными на описанном лабораторном оборудовании, получены режимные параметры ультразвуковой обработки зерна. Комплексными исследованиями техпроцессов очистки и отволаживания зерна, проведёнными на установке, представленной на рисунке 23, установлены окончательные технологические режимы, оценивающие качество отчистки и отволаживания при ультразвуковой обработке.



Рисунок 23 – Многопозиционная лабораторная ультразвуковая установка для отчистки и отволаживания зерна

1-камера озвучивания;2-блок управления режимами ультразвуковых колебаний.

Камера озвучивания, рисунок 24, состоит из ёмкости 1, заполняемой смесью зерна с жидкостью в пропорции 60х40%, перемешивающего устройства 2 и

ТЭНов 3, позволяющих варьировать температурным режимом процесса очистки и отволаживания.

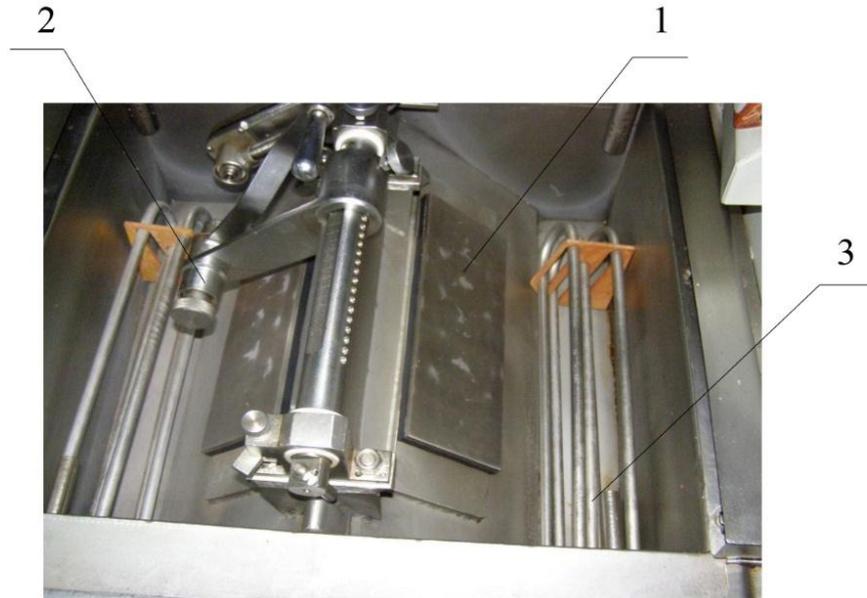


Рисунок 24 – Камера озвучивания установки:

1 - ёмкость; 2 - перемешивающее устройство; 3 - ТЭН.

На основе лабораторных исследований установлено, что ультразвуковая установка для подготовки зерна к помолу должна состоять из следующих конструктивных элементов, рисунок 25, опробованных в опытно-конструкторской установке.

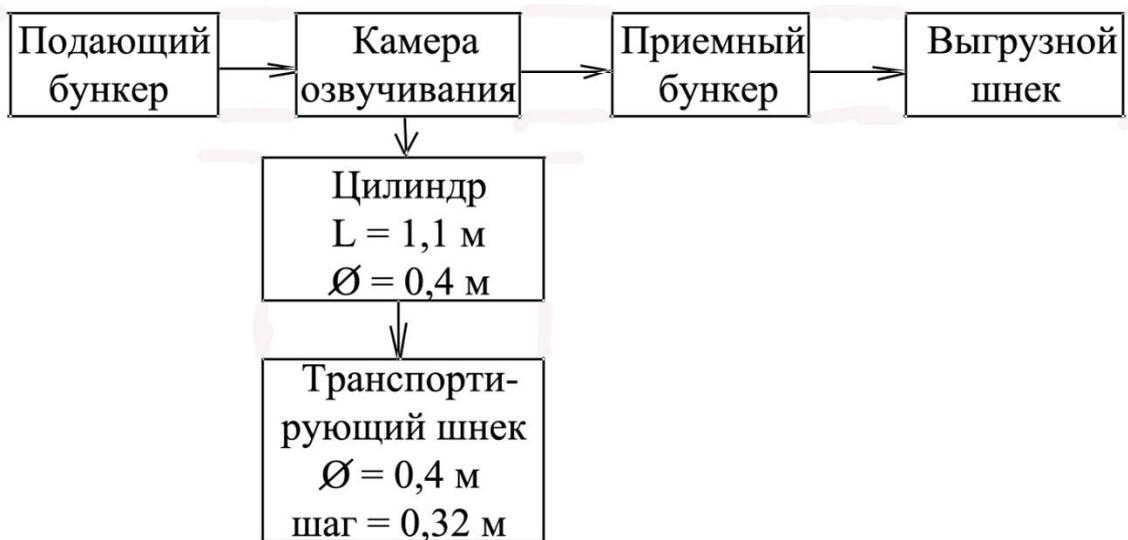


Рисунок 25 – Конструктивная схема УЗ установки для подготовки зерна к помолу

При проектировании установки для ультразвуковой установки руководствовались следующими принципами:

- учитывая непрерывный режим работы мукомольных предприятий установка должна легко вписываться в поточно-технологическую линию и обеспечивать непрерывность её работы;

- конструктивно установки должны быть нескольких модельных рядов, учитывающих различные производственные программы мукомольных предприятий;

- оптимальное время ультразвуковой обработки зерна должно обеспечиваться временем его нахождения в камере озвучивания, устанавливаемом размерами камеры и характеристиками подающего шнека;

- необходимые режимные составляющие установки должны обеспечиваться пьезоэлектрическими ультразвуковыми возбудителями с теоретически и экспериментально установленными параметрами озвучивания и регулируемой температуры процесса.

Исходя из вышесказанного разработана и опробована схема установки, представленная на рисунке 26.

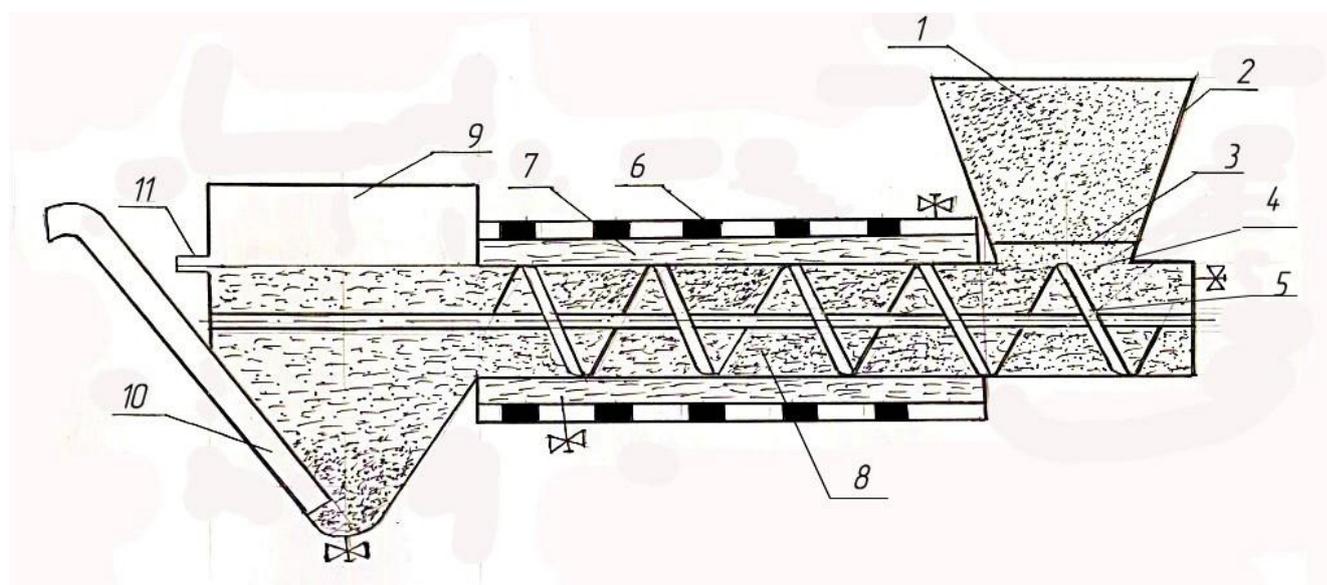


Рисунок 26 – Ультразвуковая установка для подготовки зерна к помолу

Зерно 1, подвергаемое обработке подаётся в бункер 2, величина подачи регулируется заслонкой 3, продвижение зерна в камере озвучивания 4 осуществляется шнеком 5, длина которого и шаг обеспечивают нужное время обработки зерна ультразвуковыми пьезоэлектрическими возбудителями 6. Температурный режим процесса поддерживается водяной рубашкой 7, заключённой в полый корпус установки. Обработанное зерно с водой 8 перемещается в выгрузной бункер 9 и в последующем выгрузным шнеком 10 перемещается на следующие технологические операции. Легкая взвесь в зерне всплывает на поверхность выгрузного бункера и через полость 11 сливается в отстойник.

#### 4.2 Расчёт конструктивных параметров транспортирующего шнека и мощности двигателя для привода шнекового конвейера

Для определения конструктивных параметров шнека исходными данными служат производительность конвейера, вид транспортируемого груза и длина перемещения. В рассматриваемой установке принят сплошной вид конструкции шнека, рисунок 27.

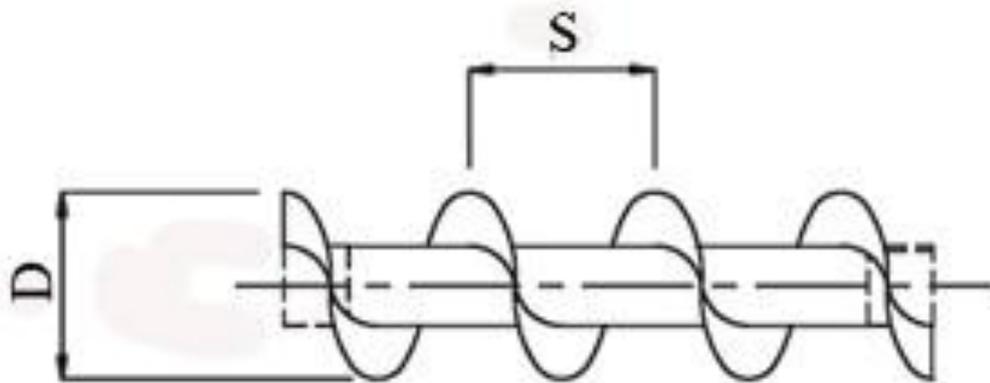


Рисунок 27 – Шнек сплошной

Шнек в установке для ультразвуковой очистки и отволаживания зерна является основным конструктивным элементом. Им осуществляется постоянное

перемешивание зерна с водой, его передвижение в камере озвучивания и, соответственно, время его ультразвуковой обработки. Исходя из этого и все объёмные конструктивные решения зависят от размеров базового элемента устройства.

Проектный расчёт параметров подающего шнека сводится к определению геометрических размеров винта, частоты его вращения и потребной мощности, что обеспечит продвижение водно-зерновой смеси в установке и время ее нахождения в камере озвучивания. Данные расчетов приведены в приложении А.

### **4.3 Исследование показателей зерна, прошедшего обработку в обоечной машине**

#### **4.3.1 Результаты микроаналитического исследования загрязнённости оболочки зерна**

При проведении экспериментальных исследований использовалось зерно сорта «Саратовская 29». Такой выбор был сделан в связи с большим распространением данного сорта в нашем регионе.

К исследованию было принято зерно со следующими общими физико-химическими свойствами: влажность 12,5%; зольность 1,9%; клейковина 24,5%; микротвёрдость эндосперма  $15 \cdot 9,80665$  МПа для удобства расчётов 15 кг/мм<sup>2</sup>; белок 11,5%.

В иллюстрациях, при четырёхкратном увеличении, представленных на рисунках 28 и 29 отчётливо видны минеральные загрязнения, присутствующие на поверхности необработанного зерна.

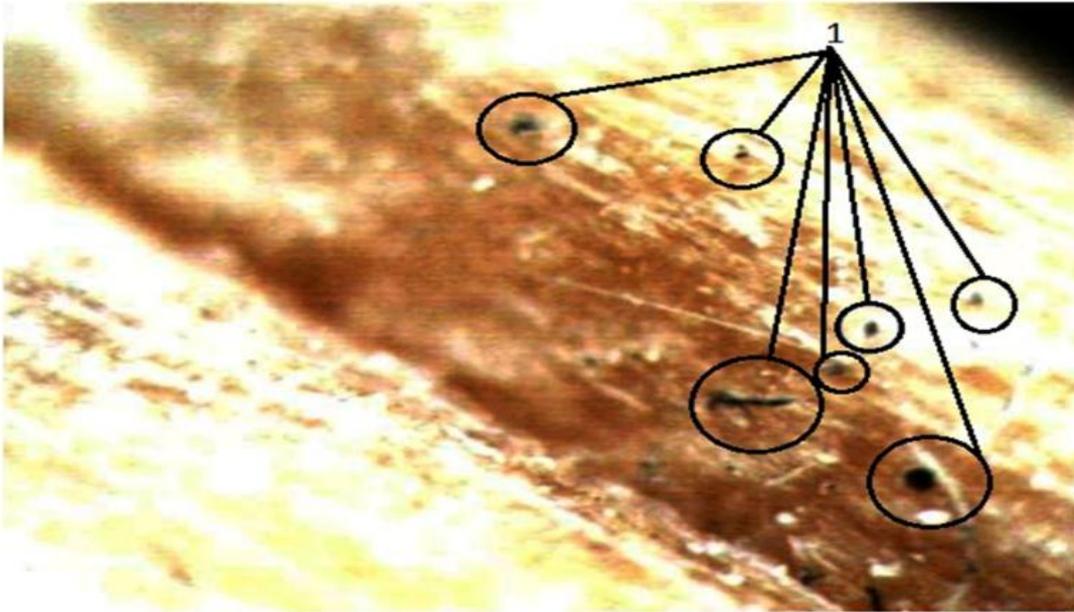


Рисунок 28 – Минеральные загрязнения в бороздке зерна(4х):

1 - единичные поверхности частиц минеральных примесей



Рисунок 29 – Частица загрязнения в бороздке зерна(10х)

Результаты расчетов площадей загрязнений приведены в приложении Б.

В соответствии с разработанной методикой оценки загрязненности зерна установлено, что у всей опытной партии, подобранной в случайном порядке и

прошедшей технологическую операцию сухого шелушения, при достаточно чистой поверхности оболочки присутствуют минеральные загрязнения, находящиеся в местах их наибольшей концентрации бородке и бороздке. Они обычными способами не выводятся с зерна и, следовательно, при простом обойном помоле переходят в муку.

Массив данных по расчёту площадей загрязнённости и заражённости зерна в бородке и бороздке даны в приложении В диссертации, на рисунке 30 представлены результаты анализа.

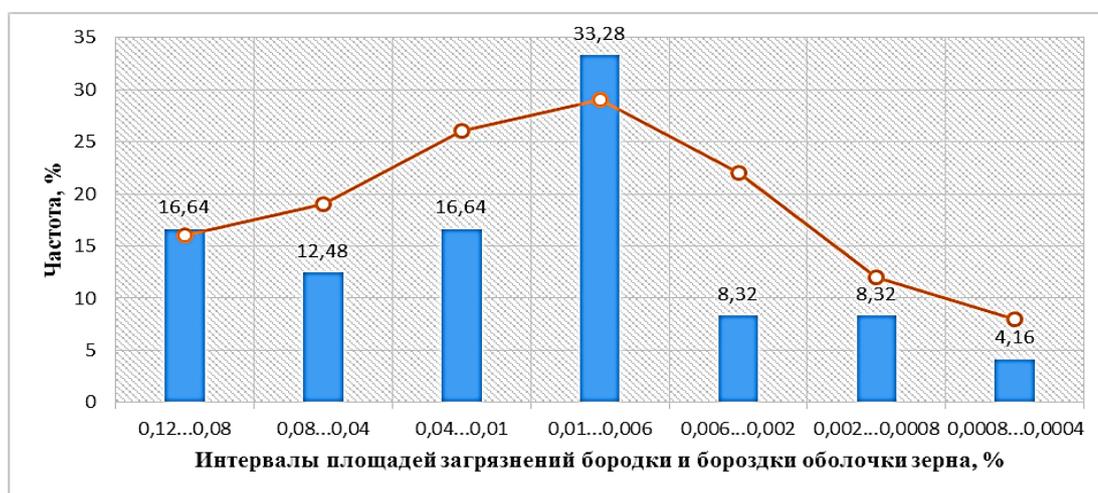


Рисунок 30 – Результаты анализа загрязнённости и заражённости зерна при подготовке зерна к простому помолу

Исходя из результатов микроаналитического анализа следует, что сверхнормативная остаточная загрязнённость зерна наблюдается у всего исследуемого массива наблюдений. Несомненно, что это должно в последующем, после размолла, привести к повышению зольности зерна и, соответственно, ухудшению качества муки.

#### 4.3.2 Результаты исследования зольности зерна

Процентное содержание зольности в зерновке зависит от их анатомических частей. В среднем в пшенице и ржи зольность составляет 1,5-2,3%, а в отдельно

взятой анатомической части оболочки 3,5-24,5%. Большая часть минеральных веществ, до 65%, содержится в поверхностном слое зерна. Известно, что количество биологически ценного вещества, к которым относятся белки, витамины и минеральные вещества, возрастает по мере продвижения от центра зерна к его периферии. Этим и обуславливается целесообразность съёма минимальной поверхности зерна, куда входят оболочка и алейроновый слой, при его подготовке к помолу.

В соответствии с условиями проведения эксперимента использовалось зерно одной партии сорта «Саратовская 29» в исходном состоянии в данном сорте зерна зольность составляет 1,5-2,2%. Проверкой зольности зерна, прошедшего отчистку в обоечной машине, установлено ее остаточное содержание в большом интервале разброса данных, составляющем 1,05-1,73%, массив данных проверок дан в приложении В.

Приведённые на рисунке 31 данные, подтверждают целесообразность более тщательной отчистки зерна перед помолом. Высокая концентрация загрязнений и заражений при подготовке зерна в обойной машине ведёт к сверхнормативной зольности.

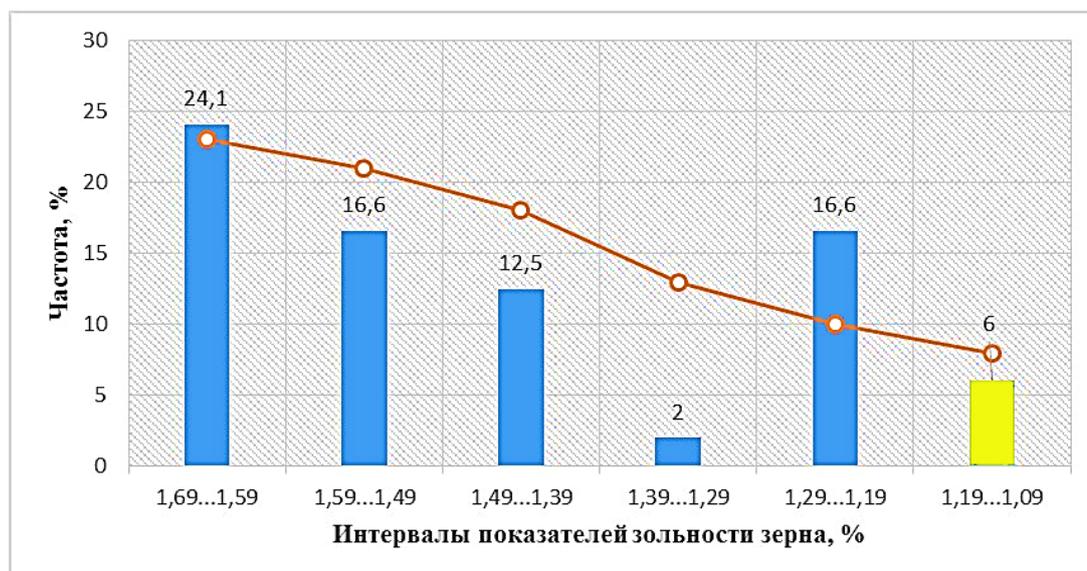


Рисунок 31 – Результаты анализа зольности зерна после отчистки в обойной машине

Это объясняется тем, что в соответствии с биологическим распределением на долю оболочки приходится 24,5% общего показателя зольности и,

соответственно, при некачественной её обработке достаточно большая часть переходит в муку. Всего у шести процентов зерна показатель зольности находится в пределах допустимого, применяемая технология не может довести подготовку зерна до требуемого уровня качества муки по типу (М45-23, М55-23, МК55-23, М-75, М100, М125, М145)[160].

### 4.3.3 Результаты исследований прочностных свойств зерна

Показатели прочности являются характеристическими для подготовки зерна к помолу. Они определяют расход энергии на измельчение и зависят от его влажности при сжатии. Технологически на прочность зерна воздействуют операцией увлажнения, при этом создаются условия для проявления его пластических свойств и последующего разрушения в соответствии с законом Гука. С повышением влажности зерна модуль его упругости, характеризуемый отношением предела прочности к относительной влажности:

$$E = \sigma/\varepsilon, \text{ МПа}, \quad (41)$$

заметно снижается вследствие возрастания его пластических свойств.

Для качественной подготовки зерна к помолу соблюдение оптимальных помольных показателей прочности имеет существенное значение. Это объясняется сопротивляемостью зерна измельчению. Переменность показателей прочности воздействует на динамический характер разрушения зерна: при высокой прочности на крупность муки и значительные энергетические расходы; при повышенной (свыше 15% влажности), к увеличению сопротивляемости разрушению; при нестабильных показателях влажности к разной крупности муки и снижению её сортности.

Исследованиями установлена микротвердость эндосперма зерна, она при обычной подготовке увлажнением различна и находится в интервале 11,8-21,3 МПа, приложение В.

На рисунке 32 явно проглядываются три зоны прочностного состояния зерна. Первая зона характеризуется 32% повышенной микротвёрдостью, что приводит к укрупнённой фракции зерна, вторая зона с 37,4% пониженной микротвёрдостью, мука с плохо разрыхлённым эндоспермом, и 33,3% третья зона с требуемыми показателями. Приведённое говорит о том, что получение качественной муки не представляется возможным.

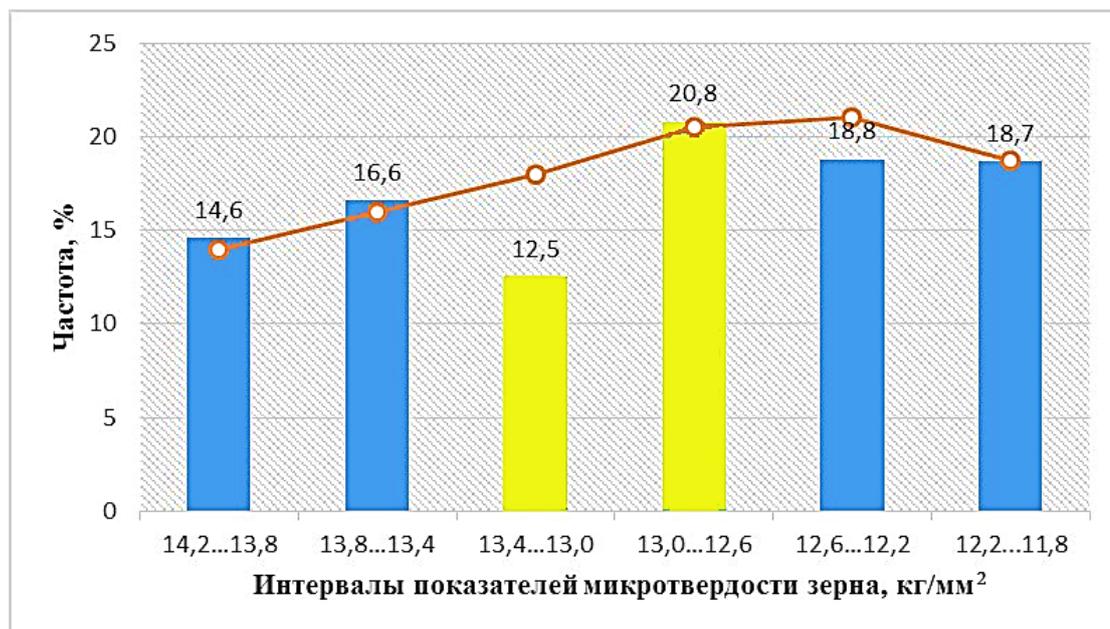


Рисунок 32 – Результаты анализа показателей микротвердости зерна

Данные анализа подтверждают также высокую нестабильность процесса увлажнения зерна при его подготовке к помолу.

#### 4.3.4 Результаты исследования показателей влажности зерна

Увлажнение зерна преследует цель создания в нём оптимальных с технологической позиции параметров. Со снижением плотности наблюдается набухание зерна и протекает расчленение эндосперма, сопровождаемое образованием микротрещин. Они развиваются вследствие возникающего диффузионного характера внутреннего влагопереноса в зерне.

Особую значимость при увлажнении приобретает интенсивность

образования микротрещин, она должна возрастать прямолинейно с увеличением степени увлажнения. При этом установлено, что трещинообразование наблюдается в интервале влажности 14,5-17%. В нижних значениях плотность зерна высока и напряжения разрушения недостаточны, а в высоких пластические свойства в эндосперме преобладают, что не позволяет разрушить его.

На практике для увлажнения зерна применяется гидротермическая обработка (ГТО). Существуют три варианта увлажнения это без ГТО, холодное и скоростное кондиционирование.

Вследствие того, что простой помол зерна осуществляется без операции ГТО мука имеет низкие показатели качества: выход муки/зольность-76,3/0,93; высший сорт/зольность-32,4/0,72; второй сорт/зольность-38,7/1,17.

В то время как у муки с холодным и скоростным кондиционированием показатели качества в 4-5 раз выше.

Таким образом очевидно, что для существенного повышения качества муки необходима более тщательная подготовка зерна к помолу. Экспериментально установлено, что кондиция зерна по параметру влажности без ГТО очень нестабильна и колеблется от 13,0% до 21,3%, приложение В. И это обуславливает необходимость стабилизации процесса увлажнения с обеспечением показателя влажности 14,5...17%.

Исследованиями показателя влажности зерна, проведённого по обычной схеме увлажнения, установлен интервал влажности, находящийся в интервале 13,0-21,0%, приложение В. На рисунке 33 представлены данные показателей влажности, характеризующие также высокой нестабильностью.

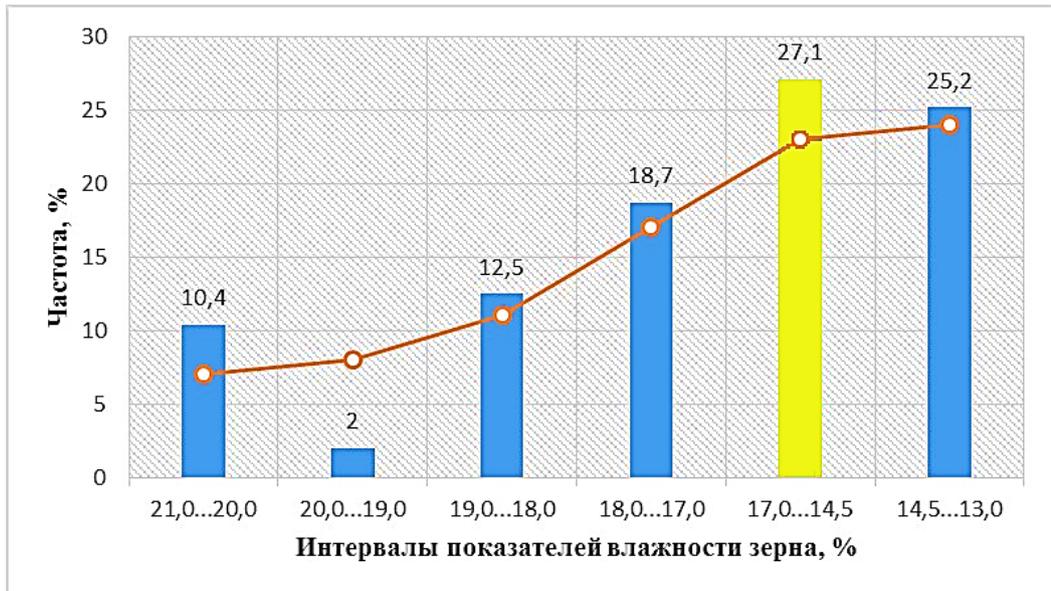


Рисунок 33 – Результаты анализа показателя влажности зерна при его подготовке к помолу

Сверхнормативными показателями влажности обладает 43,3% зерна, предназначенного к помолу, 29,2% ниже установленного нормативами и лишь 27,1% соответствуют требованиям. Данные анализа ещё раз подтверждают необходимость стабилизации процесса увлажнения.

#### 4.3.5 Результаты исследования показателей клейковины в зерне

Белки являются важной составляющей пищевой ценности зерна и продуктов его переработки. Они обладают гидрофильными свойствами, т.е. связывают воду. При увлажнении зерна белки набухают и создают студни или гели. Сильно гидратированный гель называется пшеничной клейковиной. Свойства клейковины в значительной степени складываются из наличия в макромолекулах белков дисульфидных связей и сульфгидрильных групп. В мукомольном производстве при подготовке зерна воздействуют на эти связи путём ГТО зерна. В зависимости от режимов ГТО и её интенсивности возможно укрепление клейковины от 2,8 в исходном состоянии зерна до 4,6 МК.экв/г после обработки. Это ведёт к повышению эластичности клейковины, что свидетельствует о переходе слабой клейковины в удовлетворительную, тем самым повышая мукомольные свойства зерна.

По этой причине важным, практически итоговым показателем, характеризующим качество подготовки зерна к помолу, является клейковина. Путём сравнения состояния клейковины при подготовке зерна к помолу без ГТО с интенсификацией увлажнения при ультразвуковой обработке можно установить истинную эффективность предлагаемых решений.

Обработкой массива проверок, представленных в приложении В, установлены интервалы содержания клейковины для зерна не прошедшего ГТО, находящихся в пределах 27,7-26,2%.

Анализом состояния клейковины, рисунок 34, установлен идентичный для всех исследованных показателей неудовлетворительный процесс подготовки зерна к простому помолу.



Рисунок 34 – Результат анализа показателей клейковины зерна

Клейковину можно характеризовать как неудовлетворительную, требующую общего выравнивания и усиления. Это достижимо путём стабилизации процесса увлажнения.

#### **4.4 Исследование рабочего процесса и обоснование режимов работы ультразвуковой установки**

Исследование рабочего процесса очистки и увлажнения зерна в

ультразвуковой установке предназначены для установления режимов, позволяющих определить технологическую эффективность предлагаемого технического решения. Оптимизация режимных показателей осуществлялась исследованиями переменных параметров частоты ультразвука, времени озвучивания, температуры процесса и их воздействия на качество подготовки зерна к помолу. При исследованиях использовались ранее определенные интервалы: температура воды – 20; 25; 30; 40°С; частота ультразвука – 18; 18,15; 18,3; 18,5 кГц; время озвучивания – 20; 40; 60; 80 с.

#### 4.4.1 Исследование изменения суммарной площади загрязненности оболочки зерна

Гидротермическая обработка зерна в ультразвуковой установке с интенсификацией процесса кумулятивными акустическими потоками позволяет значительно улучшить картину загрязненности зерна, рисунок 35, приложение Г.

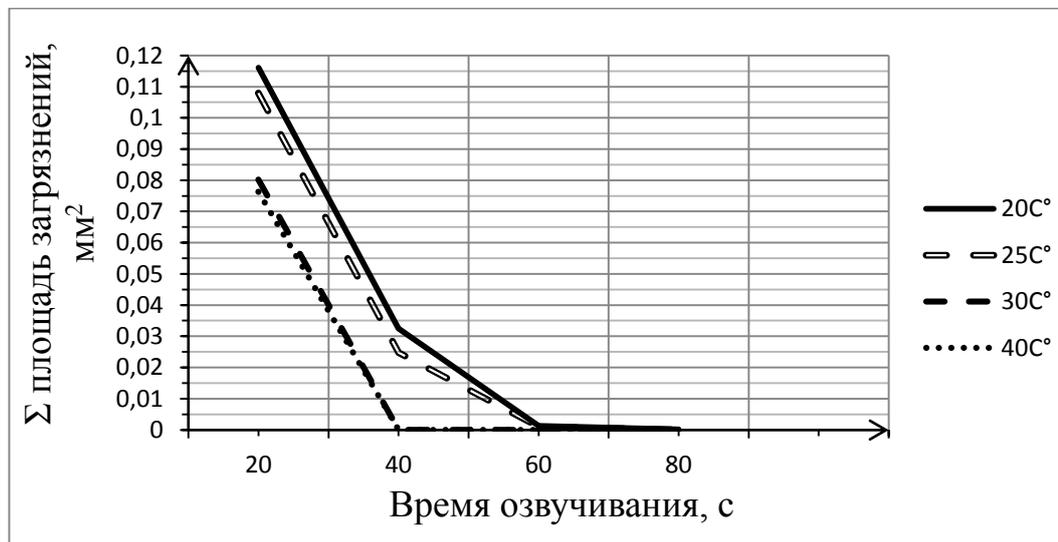


Рисунок 35– График зависимости изменения суммарной площади загрязненности поверхности зерна от времени обработки и температуры воды с частотой ультразвуковых колебаний 18 кГц

Установлена зависимость температуры нагрева воды со временем озвучивания при постоянной частоте колебаний 18кГц. Хорошее качество

очистки зерна наблюдается уже при температуре нагрева воды до 30°C и очисткой его в течении 40 секунд. Дальнейшее снижение температуры влечет за собой необходимость повышения времени озвучивания, что по производственным причинам не целесообразно.

В следующем эксперименте исследовалась режимная переменная частоты колебательных движений при установленной оптимальной температуре нагрева воды, рисунок 36.

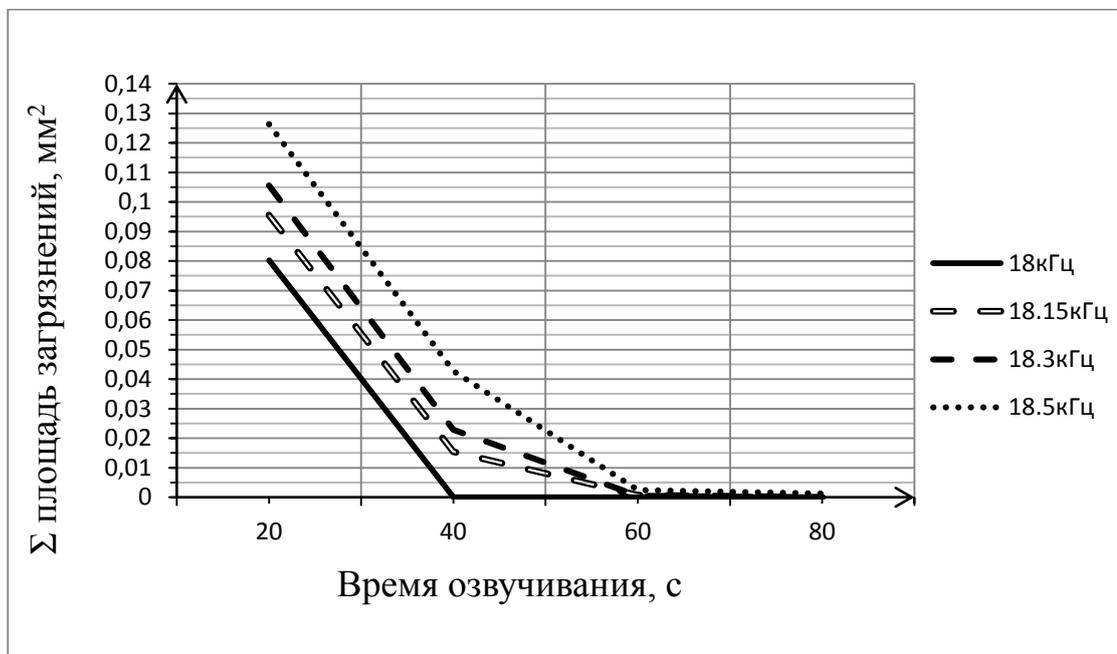


Рисунок 36 – График зависимости суммарной площади загрязнений зерна от переменных времени его обработки и частоты ультразвуковых колебаний при температуре его обработки 30°C

Исходя из данных, представленных на рисунке 36, установлено, что уровень загрязненности оболочки зерна зависит от частоты ультразвуковых колебаний и времени его обработки. При увеличении времени обработки и снижении частоты загрязненность снижается. И с этих позиций установлены рациональные

режимы: температура воды 30<sup>0</sup>С; время обработки 20...35 с; частота колебаний 18 кГц.

В следующем исследовании проверялась загрязненность оболочки зерна при постоянной частоте ультразвука, составляющей 18 кГц и переменных: температуры воды и времени обработки, данные представлены на рисунке 37.

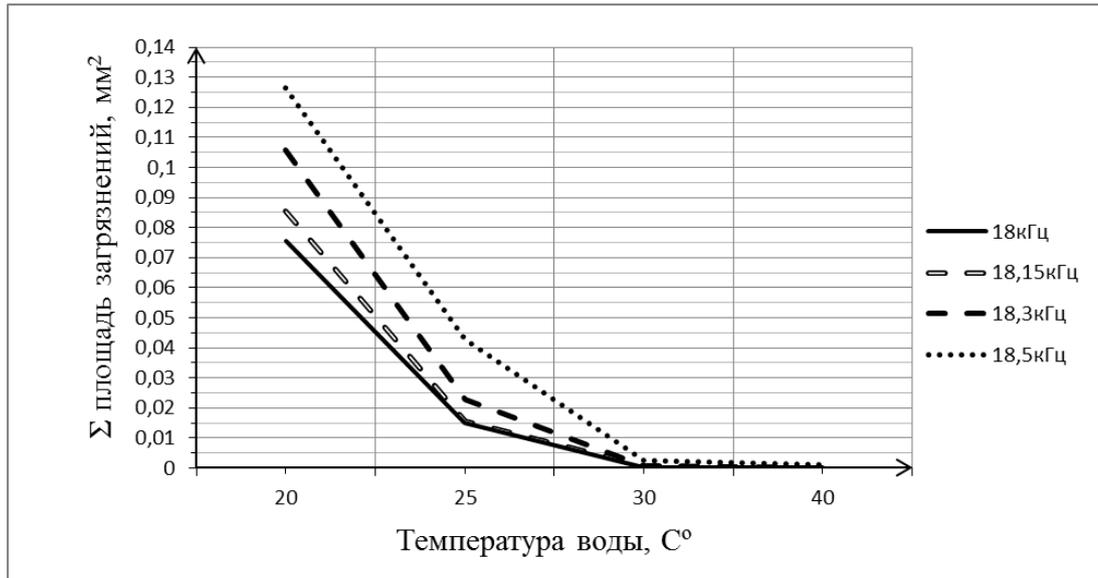


Рисунок 37 – График зависимости качества очистки от частоты ультразвуковых колебаний и температуры воды

Исследованиями установлены оптимальные интервалы частоты ультразвуковых колебаний, составляющих 18 кГц при установленном ранее времени озвучивания, составляющем 40 секунд.

В последующем подтверждена рациональная температура нагрева воды при переменных частотах ультразвуковых колебаний, составляющая 30<sup>0</sup>С.

Окончательно, путем перекрестных исследований основных режимных показателей – частоты ультразвуковых колебаний, времени озвучивания и температуры нагрева воды установлены их оптимальные показатели для качественной очистки поверхности оболочки зерна, составляющие:

- частота ультразвуковых колебаний – 18 кГц;
- время озвучивания – 40 секунд;
- температура нагрева воды – 30<sup>0</sup>С.

#### 4.4.2 Исследование физико-химических свойств зерна, прошедшего ультразвуковую обработку

В работе проводились сравнительные исследования основных качественных показателей зерна, прошедшего ультразвуковую обработку. Анализу подвергались показатели зольности, влажности, клейковины, микротвердости эндосперма и содержание белка и исходя из этого осуществлялось сравнение и устанавливалась достоверность теоретических и экспериментальных данных.

Качественные показатели зерна от воздействия на зерно режимных переменных, представленных в подразделе 4.1.1 даны в последующих графиках.

Показатель зольности зерна представлены на рисунках 38, 39 и 40, приложение Д.

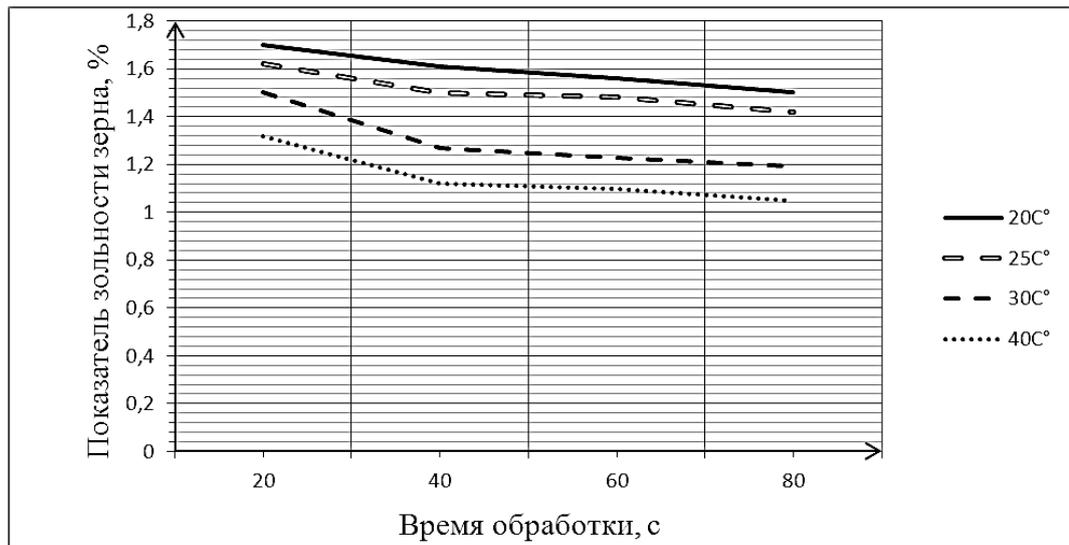


Рисунок 38 – Зависимость зольности зерна от температуры воды и времени его обработки ультразвуком с частотой 18 кГц

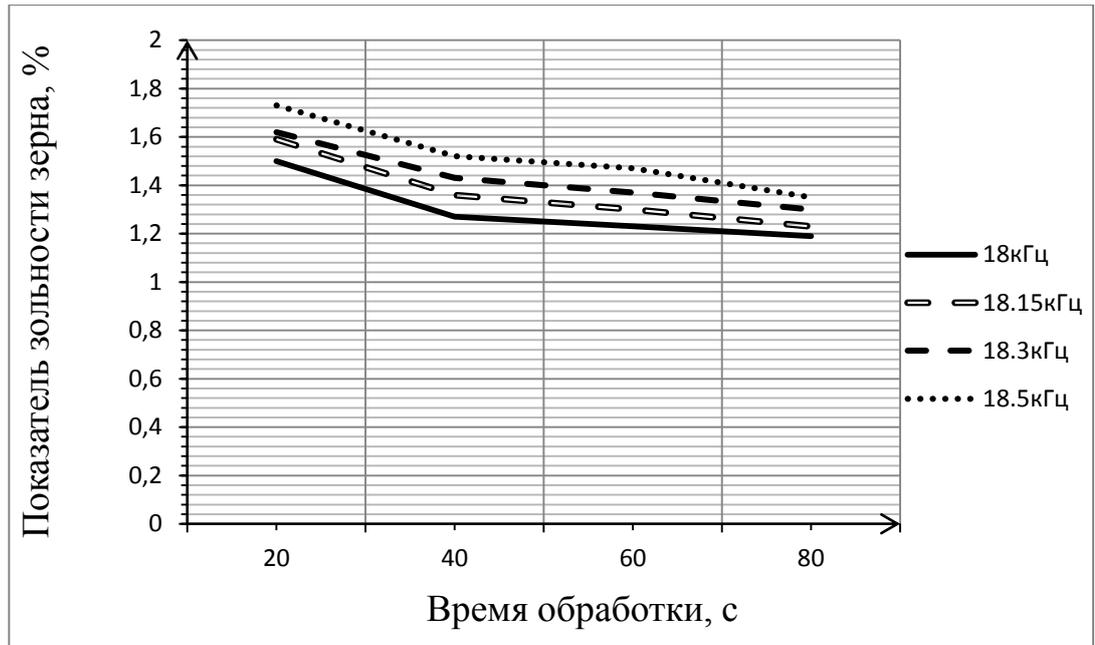


Рисунок 39 – Зависимость зольности зерна от частоты ультразвуковых колебаний и времени его обработки

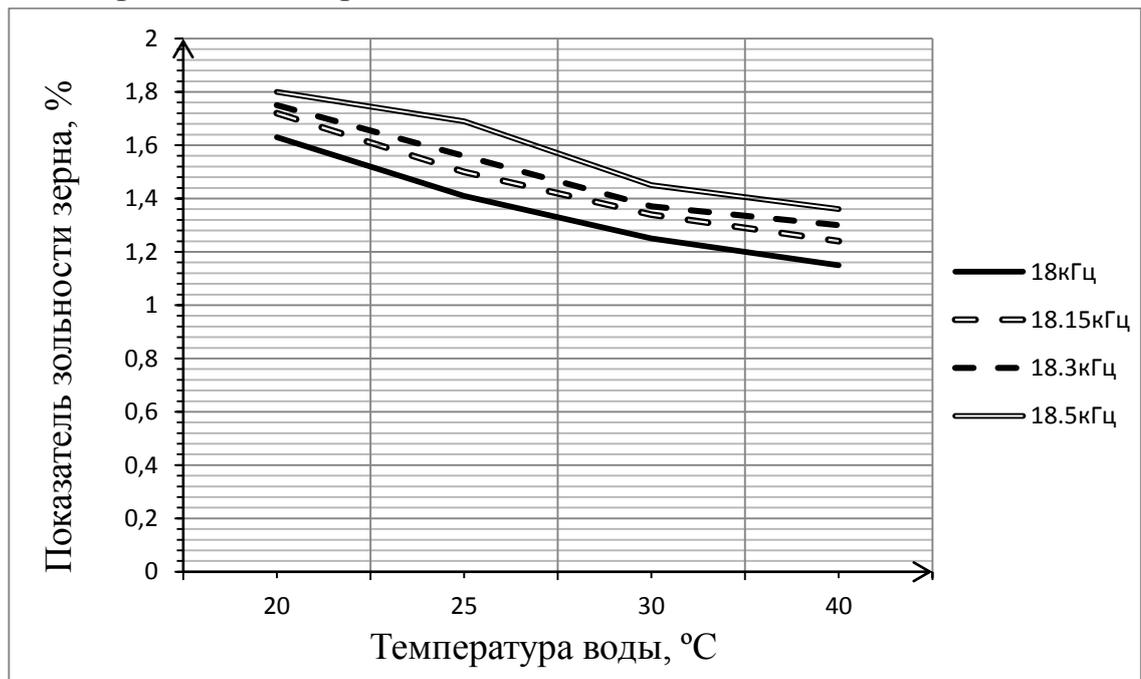


Рисунок 40 – Зависимость показателя зольности зерна от частоты ультразвуковых колебаний и температуры воды

Исходя из результатов экспериментов следует, что показатель зольности зерна находится в прямой зависимости от качества очистки оболочки, от минеральных отложений и зараженности. В соответствии с графиками, рисунок 36, наилучшие показатели уменьшения содержания зольности получены при обработке зерна ультразвуком частотой 18 кГц с нагревом воды до температуры

40°C. Показатель зольности при этом в сравнении с данными рисунка 30 уменьшается на 60...70% и стабилизируется на уровне 1,16%. Данный показатель характеризует процесс подготовки зерна к помолу высокоэффективным.

Дальнейшие исследования с переменными показателями, частоты ультразвуковых колебаний и времени обработки, рисунок 38, и частоты ультразвуковых колебаний и температуры нагрева воды, рисунок 39, подтвердили ранее полученные рациональные режимы, приведенные в подразделе 4.4.1.

В следующем этапе анализу подвергался процесс увлажнения зерна при ультразвуковой обработке. Как и в случае оценки показателя зольности принималось сочетание тройных проверок, рисунки 41, 42, 43, приложение Е.

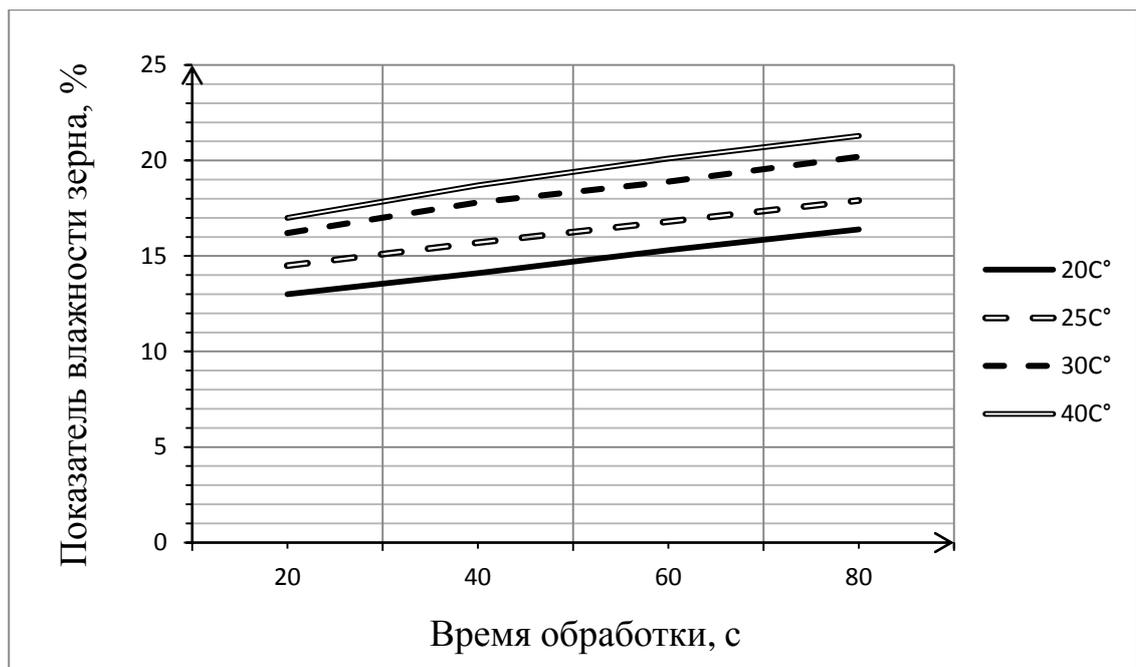


Рисунок 41 – Зависимость показателя влажности зерна от температуры воды и времени его обработки ультразвуком с частотой 18 кГц

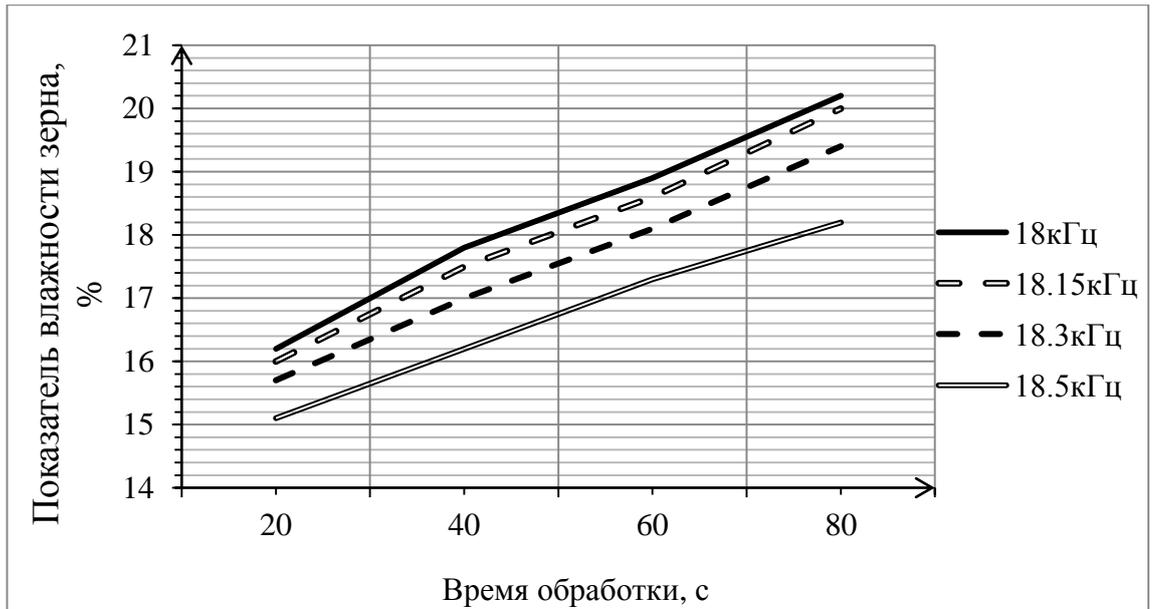


Рисунок 42 – Зависимость показателя влажности зерна от времени его обработки частоты ультразвуковых колебаний при постоянной температуре

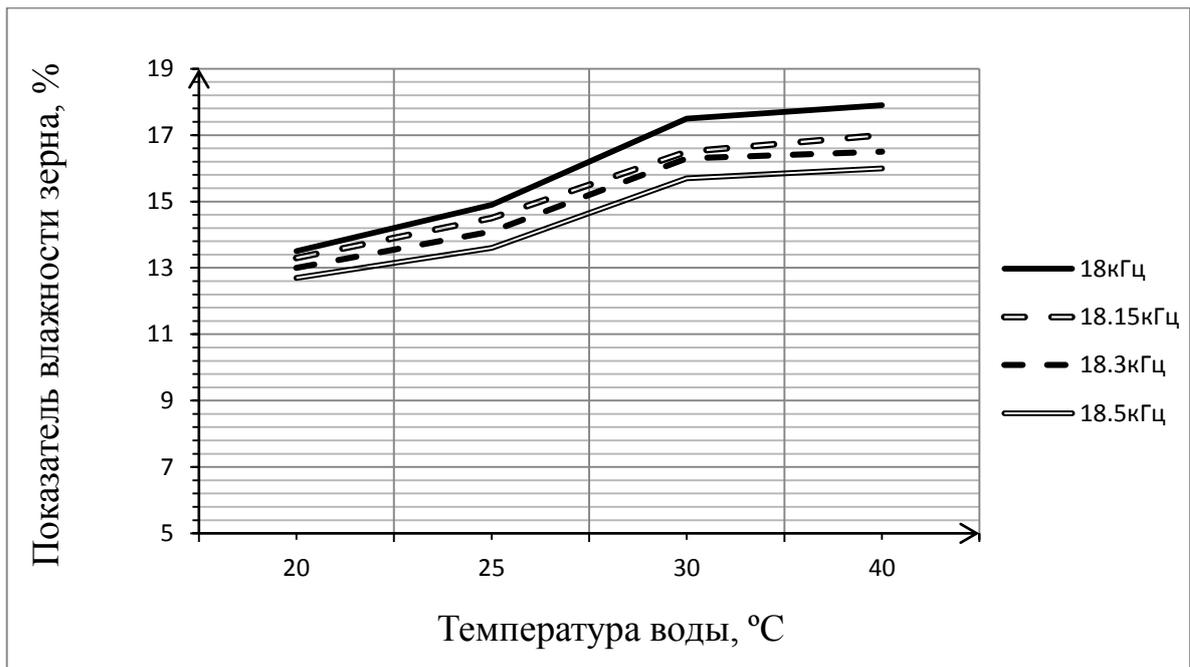


Рисунок 43 – Зависимость показателя влажности зерна от частоты ультразвуковых колебаний и температуры воды при времени его обработки 30 с

В соответствии с графиком, представленным на рисунке 33, показатель влажности зерна при простом помоле нестабилен, при этом 43,3% находится в

низком, а 29,2% в высоком интервалах. Только у 27,1% зерна влажность находится на технологически требуемом уровне.

При ультразвуковой обработке зерна процесс его увлажнения стабилизируется. Требуемые показатели влажности зерна, рисунки 40, 41 и 42, обуславливаются необходимостью поддержания рабочих режимов процесса с частотой ультразвуковых колебаний 18,0-18,15 кГц, температурой воды 30-40°C и временем обработки 20-30 секунд. Выход за приведенные режимные пределы приведет к недоувлажнению или переувлажнению зерна с последующим ухудшением качества муки.

Микротвердость эндосперма, как показали данные графиков, представленные на рисунке 32, при подготовке зерна к помолу, характеризует технологическое состояние зерна в плане его готовности к размолу. Она зависит от увлажненности зерна, рисунок 33, графики схожи и можно здесь выделить только тот факт, что всего 33,3% зерна подготовлены для получения качественной муки.

После ультразвуковой обработки зерна микротвердость эндосперма меняется, улучшая тем самым размольные характеристики, рисунки 44, 45, 46, приложение Ж.

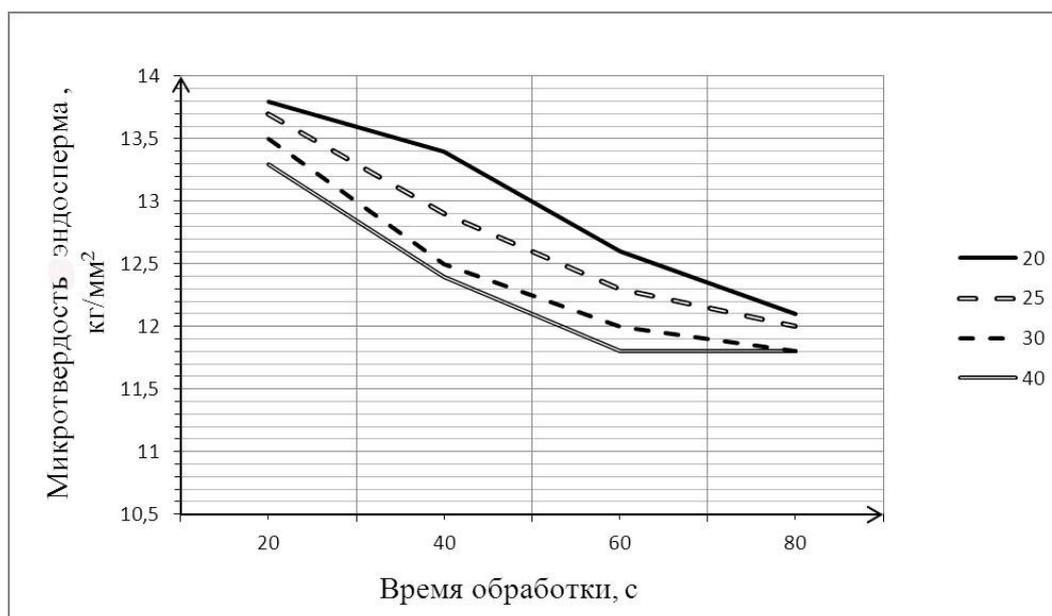


Рисунок 44 – Зависимость показателя микротвердости эндосперма от переменных температуры воды и времени обработки зерна при частоте 18 кГц

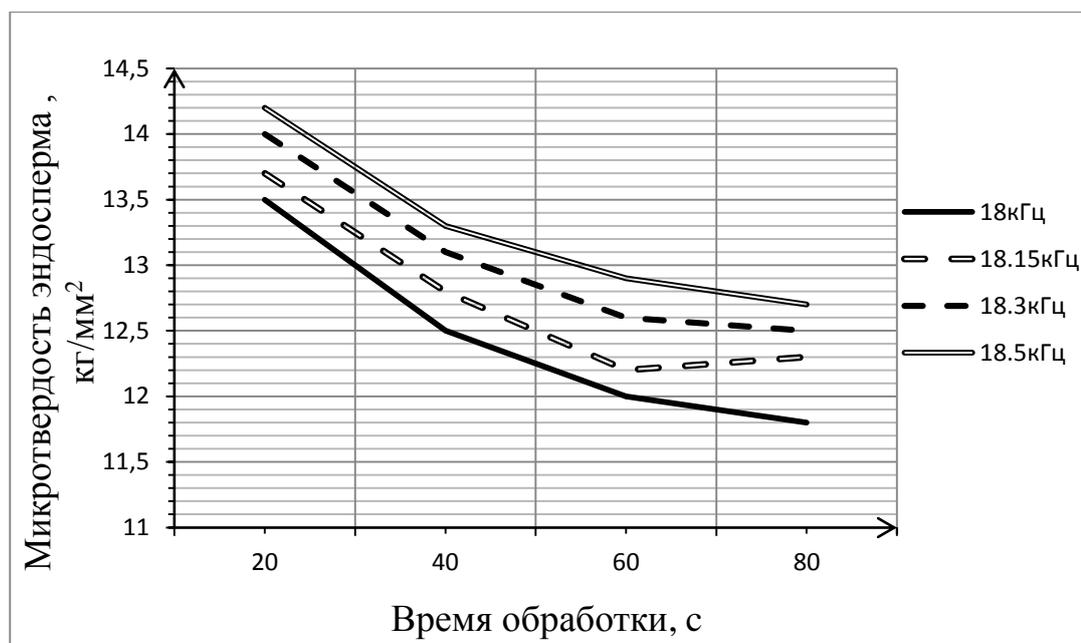


Рисунок 45 – Зависимость показателя микротвердости эндосперма от частоты ультразвука и времени очистки зерна при температуре 30°C

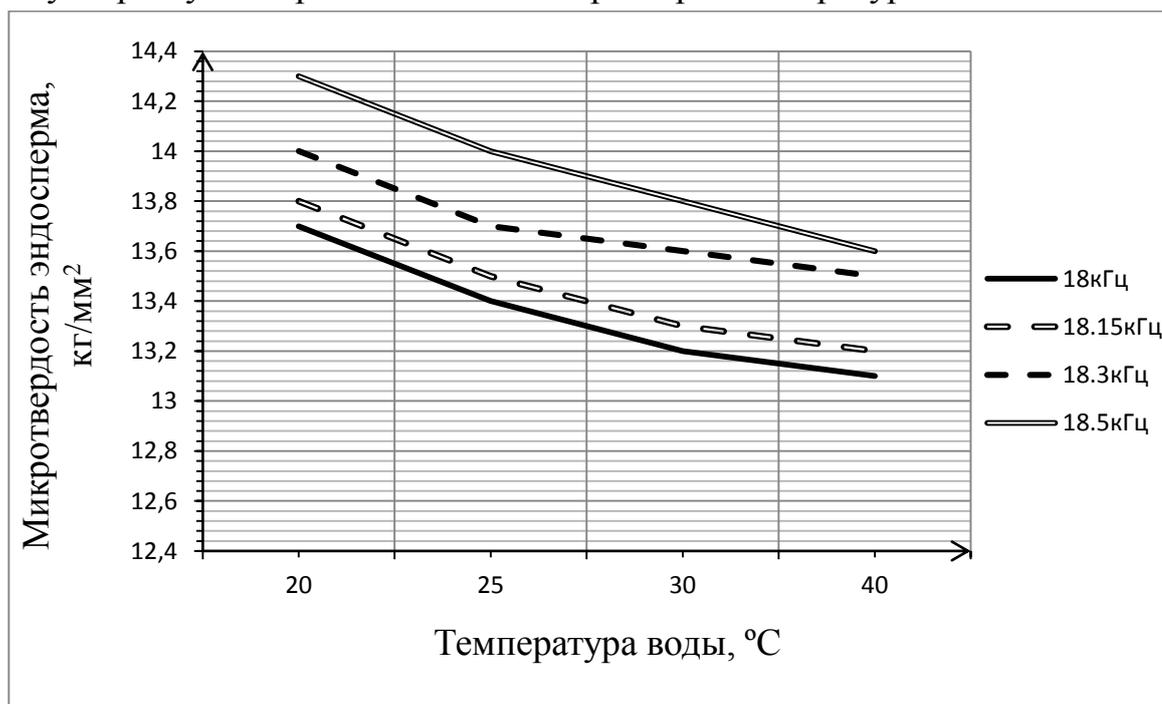


Рисунок 46 – Зависимость показателя микротвердости эндосперма зерна от частоты ультразвуковых колебаний и температуры смеси

После обработки зерна ультразвуком в анализируемом режимном диапазоне установлено, что закономерности изменения и улучшения прочностных показателей зерна идентичны предыдущим. Микротвердость стабилизируется и достигает оптимальных технологических свойств 13,4...13,0 кг/мм<sup>2</sup> при частоте

ультразвуковых колебаний 18,0-18,15 кГц, температура нагрева воды 30...40°C и времени обработки 30...40 секунд. При установленных режимах обработки зерна достигается 100% подготовленность зерна к размолу по обоим основным технологическим параметрам.

Клейковина – биологический показатель качества, она различается по сортовым показателям, однако известно, что при применении эффективных гидротермических операций ее можно укрепить, что ведет к повышению хлебопекарных свойств муки.

На рисунках 47, 48, 49 представлены результаты исследований клейковины зерна после ультразвуковой обработки, приложение 3.

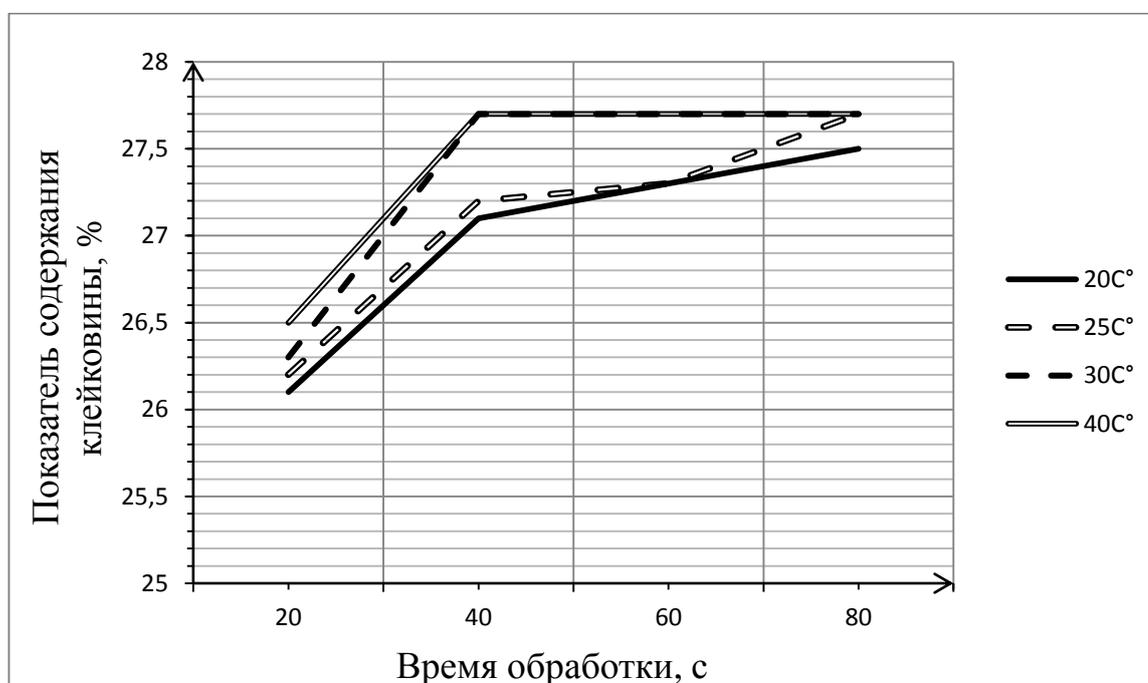


Рисунок 47 – Зависимость показателей клейковины зерна от переменных времени его обработки и температуры воды при постоянной частоте ультразвуковых колебаний 18 кГц

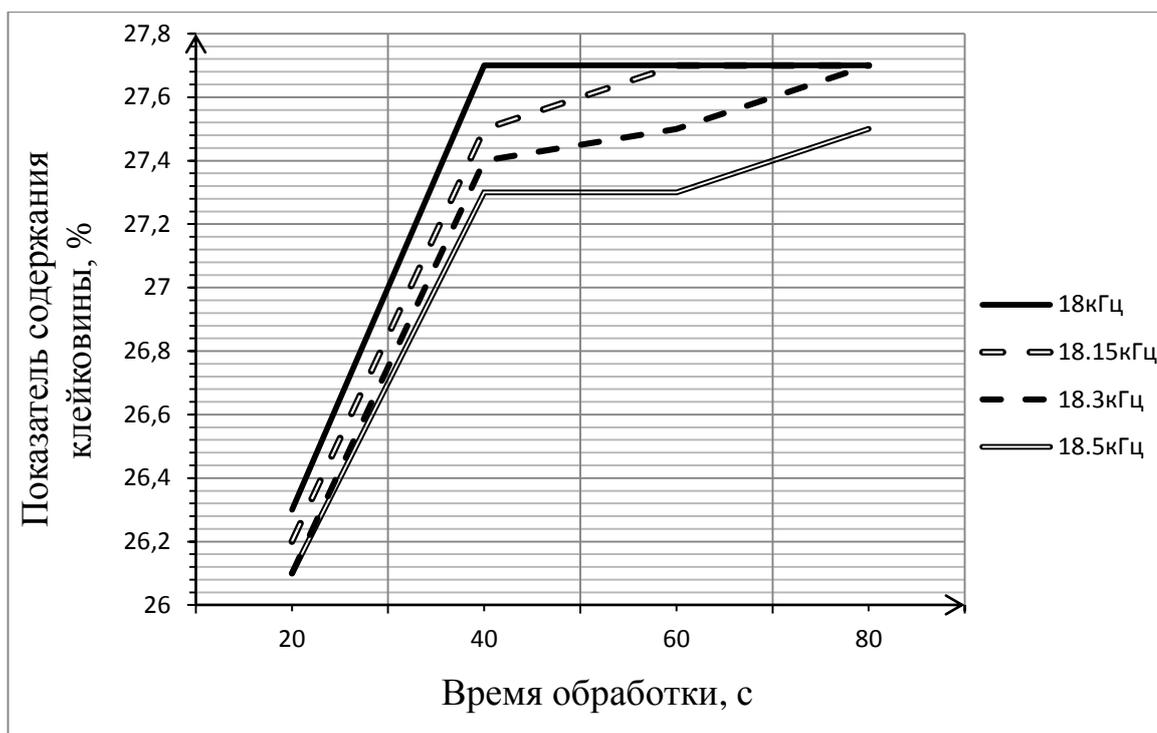


Рисунок 48 – Зависимость показателей содержания клейковины от частоты ультразвука и времени очистки зерна

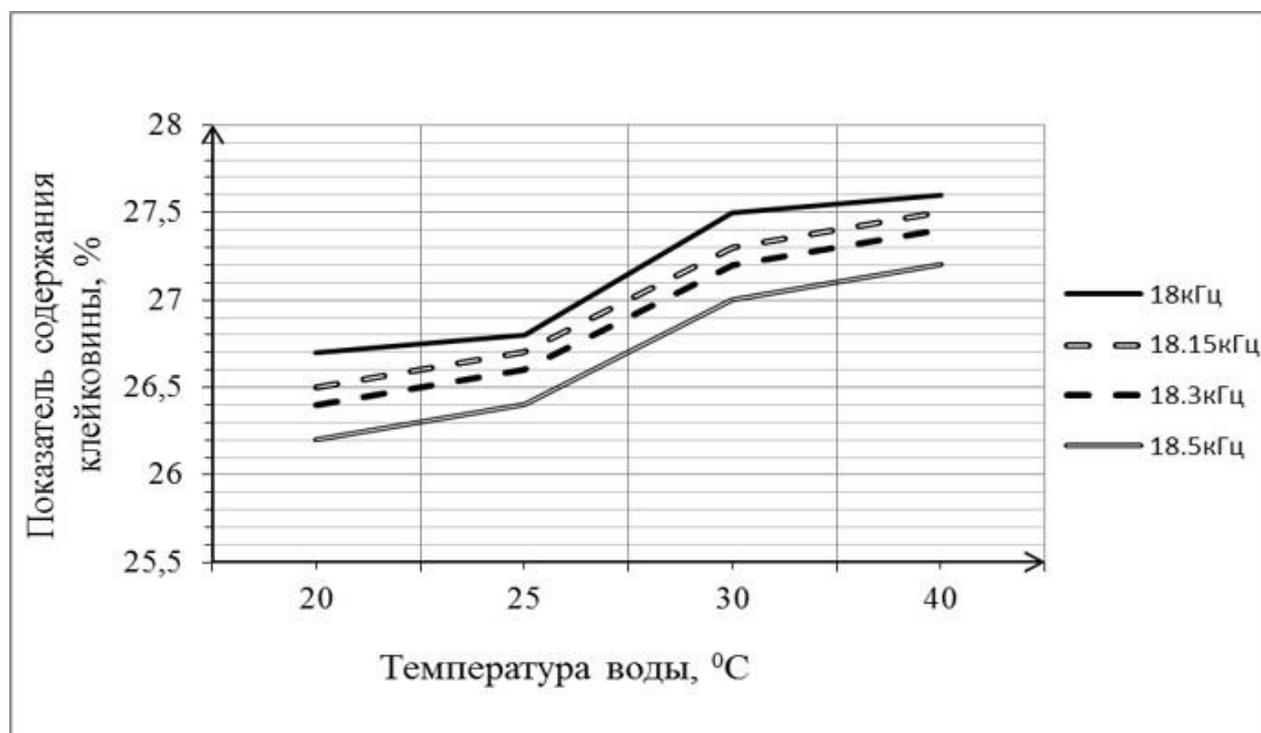


Рисунок 49 – Зависимость содержания клейковины от частоты ультразвука и температуры воды

Технологические параметры муки абсолютно зависимы от состояния клейковины. При этом установлено, что массовая доля клейковины колеблется в значительных интервалах и является определяющей сортности муки. В ранее представленных на рисунке 33 данных установлено, что клейковина муки из зерна, подготовленного для простого помола колеблется в значительном интервале от 27,7 до 26,2%. Хотя в своем среднем показателе это и удовлетворительно, но на партиях выпечек хлеба из-за своей неуровновешенности ведет к нестабильности всех операций подготовки теста к процессу выпечки хлеба.

Гидротермическая обработка зерна, осуществляемая при воздействии на него акустических микропотоков, интенсивна и за счет этого процессы влагопереноса ускоряются по времени и по стабильности насыщения влагой. Исходя из графика, представленного на рисунке 48, максимальное содержание клейковины наблюдается при ультразвуковой обработке зерна частотой 18,0...18,15 кГц, температуре нагрева воды 30...40°C и времени протекания гидротермического процесса порядка 40 секунд. При этом содержание клейковины в зерне находится в интервале 27,3...27,5%, а по-традиционному увлажнению 26,2...27,7%. Данное обстоятельство позволит стабилизировать операции подготовки теста и выпечку хлеба.

Данными графика также подтверждается стабилизация показателя содержания белка. Его содержание оптимально при установленных предыдущими исследованиями режимах – частоте 18 кГц, времени обработки 40 с и температуре нагрева 40°C.

И последним исследовался показатель содержания белка, рисунок 50, приложение И.

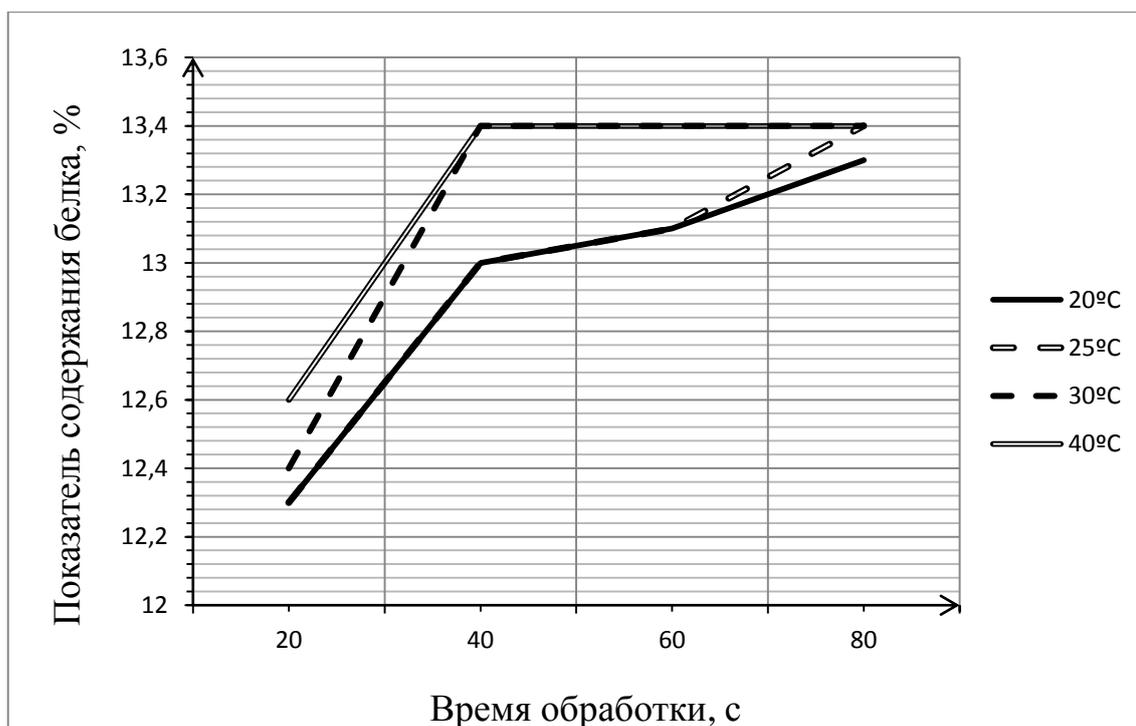


Рисунок 50 – Зависимость содержания белка от температуры и времени обработки зерна ультразвуком с частотой 18 кГц

На основании экспериментальных данных установлены окончательные режимные показатели ультразвуковой установки:

- плотность мощности ультразвука  $P_w = 1 \text{ Вт/см}^2$ ;
- интенсивность ультразвука  $I = 0,99 \text{ Вт/см}^2$ ;
- длина ультразвуковой волны  $\lambda = 0,083 \text{ м}$ ;
- частота ультразвука  $f = 18 \dots 18,3 \text{ кГц}$ ;
- амплитуда ультразвуковых колебаний  $A = 1,22 \text{ м}$ ;
- температура водно-зерновой смеси  $T = 40^\circ\text{C}$ ;
- время обработки  $t_{об} = 30 \dots 40 \text{ с}$ .

Исходя из нормативных показателей, установленных для подготовленного к простому помолу зерна и ГОСТ 52189-2003. Мука пшеничная. Общие технические требования с экспериментальными данными обработки зерна в ультразвуковой установке получены сравнительные данные, представленные на рисунке 51.

Зольность	Влажность	Микро- твердость	Клейковина	Белок
< 1,97%	14,5...17,0%	12,6...13,4 кг/мм <sup>2</sup>	> 25%	> 12,5%
1 1,05...1,73	1 13,0...21,3	1 11,8...13,4	1 26,2...27,0	1 12,2...12,4
2 1,16	2 16,3...16,5	2 13,0...13,4	2 27,3...27,4	2 12,5...13,3

Рисунок 51 – Сравнительные оценочные показатели подготовленного к простому помолу зерна по принятой «1» и разработанной «2» технологиям

Данные, представленные на рисунке 51, говорят о получении высоких качественных показателей зольности, влажности, микротвердости эндосперма, клейковины и белка при обработке зерна в ультразвуковой установке. Сужение интервальных разбросов данных свидетельствует о стабильности технологического процесса, что скажется положительно на качестве муки и, соответственно, хлеба. Наряду с этим интенсификация процессов очистки зерна и влагопереноса при его отволаживании приведет к сокращению временных затрат с 6 часов до нескольких минут с учетом производства подготовительно-заключительных работ.

#### 4.5 Продуктовая эффективность предлагаемого способа подготовки зерна к помолу

Большое многообразие хлебобулочных изделий не имеет никаких взаимосвязей с их качеством. По мнению академика РАН, заведующего лабораторией органической химии РАН А. Терентьева современный хлеб все больше напоминает изделие химической промышленности.

На стадии производства муки улучшаются вкус, цвет и текстура и при этом используются химические составляющие. В соответствии с принятой градацией, хлебобулочные изделия подразделяются в зависимости от сортности муки. В этой связи наблюдается следующая зависимость – чем выше сорт, тем вкуснее

хлеб, но тем менее он полезен. В низших сортах муки, в отличие от высшего и первого, сохраняются витамины В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, Е и РР, минеральные соли кальция, фосфора, железа, магния. Определяющим показателем качества хлеба является помол. Высший и первый сорт муки производится тонким помолом и для нее используется только внутренняя часть зерна – эндосперм, в нем много крахмала и клейковины и практически нет клетчатки. Второй сорт и обойная мука изготавливаются грубым помолом, используется при этом все зерно, во всех его составляющих много белка, витаминов и прочих полезных веществ.

Качественная мука по биологическим признакам зерна не может быть кристально белого цвета – она цвета слоновой кости, любая мука при выпекании хлеба темнеет. И чтобы отбелить муку применяют химические модификаторы, в частности бромат калия, двуокись хлора. Хлеб с их применением обладает высокими визуальными показателями пышности и свежести. Двуокись хлора используется в виде газа, убивающего в муке полезные составляющие. После окисления в муке остается хлор в составе хлорированных соединений, а они гепатотоксичны. Используется также и бензолпероксид в виде порошка, при нагревании и после разложения он превращается в бензол.

В этой связи потребители начинают осознавать, что полезны те сорта хлеба, которые производятся из муки грубого помола всего зерна с включением в него отрубей, он по предположению не может быть сильно белым, обязательно должен присутствовать коричневый оттенок.

В этой связи особую значимость приобретают технологии исключаящие использование вредных химических составляющих в виде инумена, эмульгатора Е482, стабилизатора (карбонат кальция), регулятора кислотности Е270 и Е327, антиокислителя (аскорбиновая кислота), улучшителя Е920, водного раствора бета-каротина.

Всеми этими достоинствами обладают разработанные и изложенные в диссертационной работе ультразвуковая установка и технология подготовки зерна к помолу без использования дополнительных химически активных веществ. Интенсивная очистка оболочки зерна от минеральных загрязнений и зараженности наряду с оптимальной гидротермической обработкой обеспечивают высококачественную кондицию зерна. Снижается зольность, улучшается и стабилизируется клейковина и обеспечиваются нужные параметры увлажненности зерна, что в комплексе позволяет повысить качество востребованной производством и потребителями муки.

Анализируя механизм установлено, что преобладающую роль в очистке поверхностей играют пульсирующие кавитационные пузырьки. На поверхности загрязнений пульсирующие пузырьки совершают интенсивные колебания и при захлопывании порождают давление до 100МПа, преодолевая силу сцепления загрязнений ( $10^2$  до  $10^3$  Па) с поверхностью зерна, проникают под них, разрывают и отслаивают их, рисунок 6.

Многokратные гидравлические кумулятивные удары, возникающие при захлопывании кавитационных пузырьков, отделяют от зерна загрязнители и зараженности, а также вызывают разрушение оболочки зерна и частичное её отделение от алейронового слоя, что значительно сокращает время и энергозатраты на её полное отделение в последующем. На рисунке 52 показаны образцы до и после акустической обработки.

Данная иллюстрация показывает на начало процесса отделения оболочки от алейронового слоя, так как заметны места вспученности на поверхности зерна (рисунок 52 а), что не наблюдается на поверхности необработанного зерна (рисунок 52 б).



а)

б)

Рисунок 52 – Поверхностное состояние зерна (4x):

а) – обработанного акустической кавитацией; б) – необработанного

В процессе озвучивания зерна, повышение эффективности, с позиций качества и затрат времени, оценивалось анализом удаления загрязнений с его поверхности из бородки и бороздки, а также разрыхления эндосперма с образованием микротрещин, возникающих вследствие проникновения влаги в алейроновый слой и зародыш зерна, что фактически и приводит к отделению его оболочки. Установлено, что для достижения данного эффекта необходимо, чтобы вода прошла через плодую и семенную оболочки, насытила их до максимальной сорбционной ёмкости, затем переместилась из оболочек в алейроновый слой и зародыш зерна. Там, за счёт действий анатомических частей зерна и энергии связи влаги ( $10^3 \dots 10^4$  кДж/моль·м), образуется высокий градиент влажности, повышающий поверхностное напряженное состояние. Вследствие длительного воздействия избыточного давления эндосперм не выдерживает этого напряжения, что приводит к образованию микротрещин с диффузионным переносом воды в крахмалистую часть зерна.

В процессе отделения оболочки от алейронового слоя акустические микропотоки проникают за плодую оболочку, и под воздействием ударных

волн разрушают целостность алейронового слоя, тем самым технологический процесс насыщения влаги алейронового слоя не успевает начаться, а действие ударных волн продолжается на эндосперме, с образованием микротрещин на его поверхности.

Окончание воздействия акустической кавитации на зерно приводит к образованию в нем микротрещин, которые заполняет вода. Первым признаком насыщения водой зерна, является его набухание, что проиллюстрировано на рисунке 53. Это и обеспечивает интенсификацию и стабильность процесса увлажнения зерна.



Рисунок 53 – Набухание зерна обработанного акустической кавитацией в течение 30 сек, (4 х)

Исходя из исследований установлено, что зерно после озвучивания не содержит в своей массе никаких примесей и теряет до 10% оболочки. По предлагаемому способу в процессе действия акустической кавитации происходит расщепление радикалов воды, при этом высвободившаяся гидроксильная группа, вступая в связь с аминной группой аминокислот, превращает их из гидрофобных (не растворимые в воде) в гидрофильные (легко растворимые в воде). Это доказывает то, что замедленный процесс диффузии в зерне можно интенсифицировать с использованием мощной акустической кавитации.

Частичное отделение оболочки от зерна, а также разрыхление эндосперма от действия направленной на зерно акустической кавитации представлено на рисунке 54.



Рисунок 54 – Частично отделенная плодовая оболочка, разрыхление эндосперма (4х)

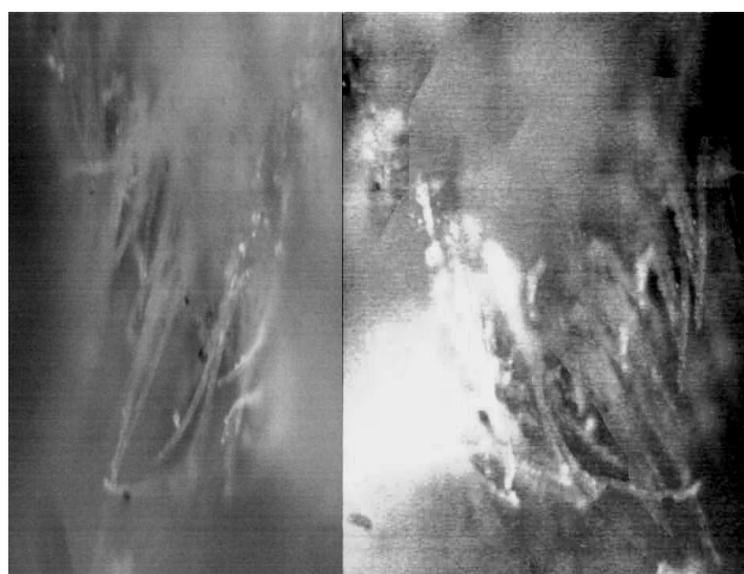
Радиационное давление и звукокапиллярный эффект способствуют проникновению пульсирующих пузырьков в микропоры, в неровности и, самое важное, в бороздку и бороздку зерна. Акустические микротечения осуществляют ускоренное удаление загрязнений с поверхности зерна. Таким образом, происходит процесс очистки зерна, рисунок 55.



Рисунок 55 – Очищенная бороздка зерна (10х)

Механический процесс отделения плодовой оболочки под действием пульсирующих пузырьков приводит к положительному эффекту. Разрушение целостности оболочек, а также их отслоение происходит от действия

захлопывающихся кавитационных пузырьков, создающих микроударное воздействие на поверхность, далее происходит диспергирование отделившихся частей оболочек. Ультразвуковое диспергирование – тонкое размельчение твердых веществ в жидкости, т.е. переход веществ в дисперсное состояние под действием ультразвуковых колебаний. Диспергирование в акустическом поле определяется в основном микроударным воздействием при захлопывании кавитационных пузырьков и возникающими при их пульсациях акустическими микропотоками. Кавитационные пузырьки концентрируются на поверхности оболочки преимущественно в бородке и бороздке, а также в микротрещинах, на мельчайших твердых частицах и газовых пузырьках в жидкости. Многократные гидравлические удары, возникающие при захлопывании, вызывают локальное разрушение поверхности. После этого под действием акустических микропотоков жидкость проникает внутрь образовавшихся углублений, где разрушающее действие микроударных волн становится более эффективным и разрушение распространяется все глубже. Таким образом, происходит разрушение целостности зерна, а также более эффективная очистка и увлажнение, рисунок 56.



а)

б)

Рисунок 56 – Сравнение бородки зерна пшеницы (10х):

а) – не обработанного; б) – обработанного в ультразвуком поле

Приведенный материал и иллюстрации состояния зерна при его подготовке к помолу ультразвуковой обработкой подтверждают высокую технологическую

эффективность процесса. Зерно не содержит никаких минеральных примесей, что говорит о высоком качестве его очистки. Следовательно, теоретические исследования способов очистки зерна, конструктивных параметров установки и технологических режимов обработки полностью подтверждаются данными экспериментальных испытаний.

Экспериментальные исследования технологических режимов дали результаты обладающие 90% сходимостью с теоретическими обоснованиями этих режимов. Исходя из аналитических и экспериментальных исследований наиболее рациональными следует считать следующие технологические параметры, представленные в таблице 9.

Таблица 9 – Режимные параметры подготовки зерна пшеницы

№п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Величина параметра
1	Температура воды	°С	30
2	Продолжительность обработки	секунда	30-40
3	Частота ультразвуковых колебаний	кГц	18-18,3
4	Интенсивность ультразвукового поля	Вт/см <sup>2</sup>	1

#### **4.6 Математическое моделирование процесса подготовки зерна к помолу**

Рассмотренные процессы отволаживания и очистки зерна связаны с изменением показателей белка, клейковины, микротвердости и зольности имеют затухающий характер в связи с чем, основываясь на физике такого рода процессов, построены математические модели с помощью уравнений экспоненциального тренда [1111], [161]. Коэффициенты уравнений подобраны по экспериментальным данным методом наименьших квадратов. В большинстве случаев удалось линеаризовать модель и получить конечные формулы. В том случае, когда это сделать не представлялось возможным был использован макрос

«поиск решений» в программе Excel [1111], позволяющий находить экстремумы функций многих переменных методом градиентного спуска.

Физический смысл процесса повышения влажности зерна заключается в диффузии молекул воды в зерно, где происходит их распределение и постепенное выравнивание. Любая диффузия в замкнутом объеме это затухающий процесс, следовательно, для описания этого процесса необходима затухающая зависимость, приближающаяся к горизонтальной асимптоте. Поэтому использование экспоненты с отрицательным показателем ее степени для аппроксимации кривых, полученных по экспериментальным данным, является единственно верным решением.

На рисунке 57 представлена математическая модель, отражающая изменение показателя влажности зерна от переменной времени обработки, при этом частота колебаний находится на экспериментально установленных нижних границах ультразвукового диапазона в 18 кГц и температуре обработки в 30<sup>0</sup>С.

Выбор постоянных показателей режимных параметров основывается на полученных при исследованиях экспериментальных данных и теоретических заключений и принят из условия, что максимальная эффективность обработки зерна в ультразвуковом поле достигается при частотном диапазоне ультразвука порядка 18кГц. Так как сохранить эффект акустической кавитации при частоте ниже 18кГц не представляется возможным. Температура процесса выбрана по максимальной интенсивности влагопереноса в зерне, так как дальнейшее ее повышение практически не влияет на процесс отволаживания. Рассматриваемая технология подразумевает использование соотношения объемов зерна и воды три к двум, следовательно, нагревание даже на 1<sup>0</sup>С будет требовать значительных энергетических затрат. При всем этом учитывалось также то, что в стандартных условиях акустическая кавитация в воде, сопровождается самопроизвольным повышением температуры до 25-30 <sup>0</sup>С.

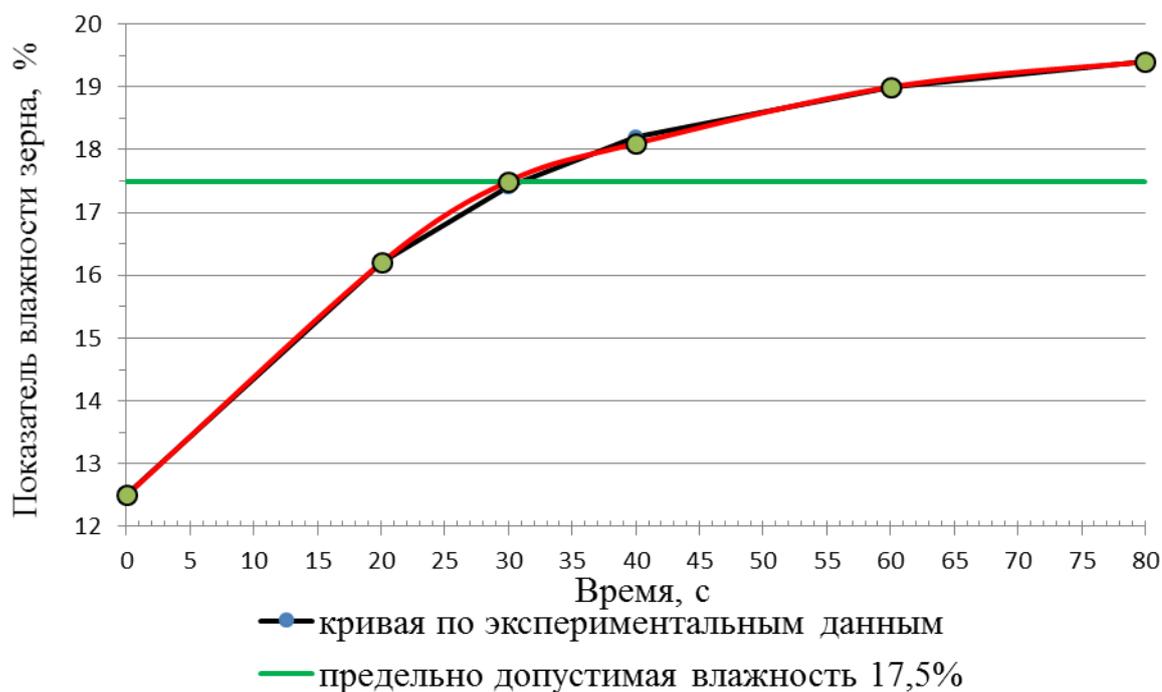


Рисунок 57 – Математическая зависимость оптимизации времени процесса отволаживания

На рисунке 58 представлена математическая модель, отражающая изменение влажности зерна в зависимости от температуры нагрева воды.

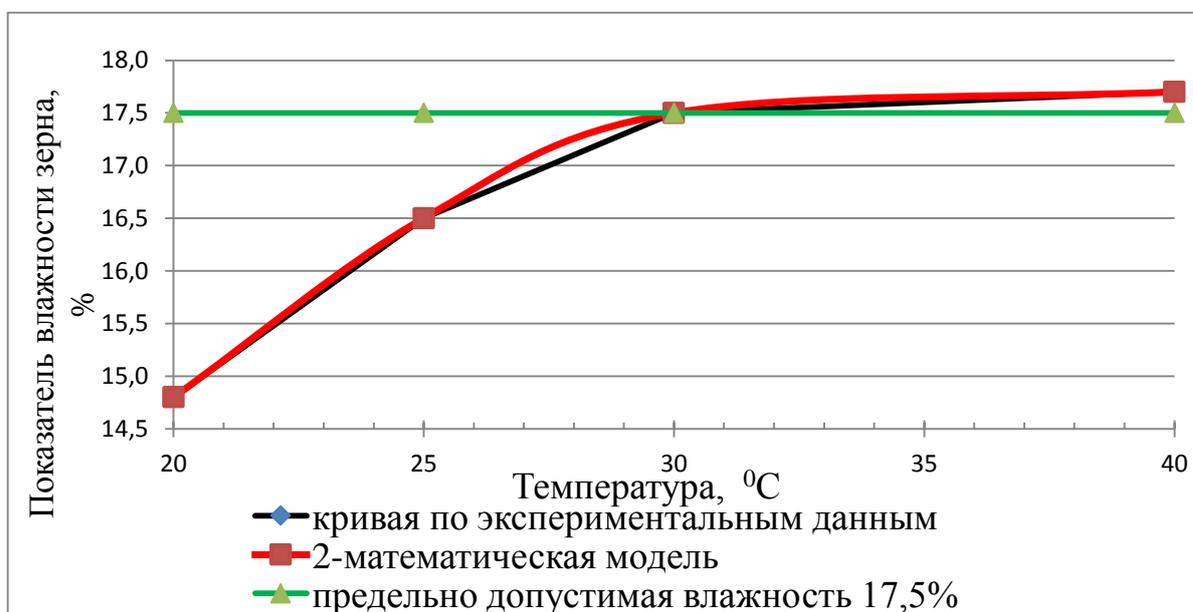


Рисунок 58 – Математическая зависимость оптимизации температуры процесса отволаживания

Представленные на рисунках 57 и 58 математические модели выражены функцией:

$$y = a \cdot e^{-b \cdot t} + d, \quad (42)$$

где:  $a$  – исходная влажность зерна 12,5%;  
 $b$  – коэффициент характеризующий скорость процесса влагопереноса;  
 $t$  – в первом случае время, во втором температура процесса;  
 $d$  – разность между максимальной, экспериментально полученной и исходной влажностью.

Для определения коэффициентов  $b$  и  $t$  был использован метод наименьших квадратов и линеаризация уравнений. При  $a = e^c$  формула (42) имеет вид:

$$y - d = e^c \cdot e^{-b \cdot t};$$

или  $y - d = e^{c - b \cdot t}.$  (43)

Прологарифмировав выражение (43), получим:

$$\ln(y - d) = c - b \cdot t;$$

или

$$\ln(y - d) - c = -b \cdot t. \quad (44)$$

При коэффициенте  $z_i = \ln(y - d) - c$ , тогда сумма квадратов отклонений  $n$  исходных данных от значений, сглаженных в соответствии с уравнением (43) примет вид:

$$S(b) = \sum_{i=1}^n (-b \cdot t_i - z_i)^2; \quad (45)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 0; \quad (46)$$

$$\sum_{i=1}^n 2(-b \cdot t_i - z_i) \cdot (-t_i) = 0;$$

или

$$b \cdot \sum_{i=1}^n t_i \cdot t_i + \sum_{i=1}^n t_i \cdot z_i = 0. \quad (47)$$

Средние значения (статистические моменты 1-го порядка) определены путем деления полученных выражений (47) на  $n$ :

$$b \cdot (\overline{t \cdot t}) = -\overline{t \cdot z}, \quad (48)$$

Из уравнения (48) выражается коэффициент  $b$ :

$$b = -\frac{\overline{t \cdot z}}{\overline{t \cdot t}}. \quad (49)$$

Получены значения для искоемых коэффициентов для математической модели по времени и температуре процесса  $b = - 0,0347$  и  $b = - 0,0299$  соответственно. При их помощи, методом табуляции построены моделируемые кривые, представленные на рисунках 57 и 58. При заданном показателе влажности равном 17,5% решением уравнения (49) для первой модели является 30,07, а для второй 29,9. Исходя из этого установлено, что для достижения максимального эффекта отволаживания для достижения 17-17,5% поверхностной влажности зерна с температурой процесса 29,9<sup>0</sup>С необходимо его озвучивание в течение 25,5...30,7 секунд или 30,7 секунды в диапазоне температур 26,9-29,9<sup>0</sup>С. В связи с тем, что температура процесса в стандартных условиях принята равной 30<sup>0</sup>С, а превышение поверхностной влажности 17,5% отрицательно влияет на операцию помола зерна, установлены следующие режимные параметры обработки: температура процесса 30<sup>0</sup>С; временной

интервал 25,5...30 секунд; частота ультразвуковых колебаний 18 кГц. Из расчета математических моделей по всем полученным экспериментальным данным, исходя из принятого диапазона режимных параметров, установлены показатели озвученного зерна такие как: суммарная площадь поверхностных загрязнений – 0,07-0,03 мм<sup>2</sup>; зольность – 1,43-1,37%; влажность 17-17,5%; клейковина – 27,1-27,5%; микротвердость эндосперма – 13,1-12,9кг/мм<sup>2</sup>; содержание белка – 12,8-13,3%. При этом установлена 98% сходимость теоретических данных с экспериментальными.

#### 4.7 Выводы

1. На основании данных, полученных в теоретическом разделе и испытаний процессов очистки и отволаживания зерна в лабораторных установках различной производительности и ультразвуковых режимных показателей обоснованы и рассчитаны основные элементы установки: конструкция емкости; конструкция подающего шнека; количество и расположение ультразвуковых пьезоэлектрических возбуждателей;
2. Установлены технические характеристики, составляющие:
  - производительность – 3,75 т/ч;
  - выход обработанного зерна – 2,5 т/ч;
  - шнек – однозаходный Ø 400 мм, шаг 320 мм; частота вращения шнека – 7 мин<sup>-1</sup>;
  - осевая скорость перемещения водно – зерновой смеси – 0,0333 м/с;
  - мощность на валу шнека – 0,838 кВт.
3. На основании проведенного анализа качества подготовки зерна к простому помолу установлена: 100-процентная остаточная его загрязненность, находящаяся в интервале 0,0004...0,32%; высокая зольность (всего 6% зерна соответствует нормативному); микротвердость характеризуется большим разбросом, что дает пониженную и повышенную пластичность, ведущую к получению муки низкого качества; всего у 27% зерна обеспечивается нужная влажность; наблюдается нестабильная клейковина, не отвечающая уровню

удовлетворительной. Всё перечисленное свидетельствует о необходимости повышения эффективности подготовки зерна к помолу.

4. Перекрестными исследованиями технологических режимов очистки и отволаживания зерна установлены оптимальные рабочие показатели, составляющие:

- частота ультразвуковых колебаний – 18...18,15 кГц;
- время обработки – 40 секунд;
- температура процесса – 30<sup>0</sup>С.

Зерно при этом удовлетворяет всем кондиционным требованиям:

- загрязнения – отсутствуют;
- зольность – уменьшается на 60...70% и стабилизируется на уровне 1,16%;
- влажность – стабилизируется на уровне 14,5...17%;
- микротвердость эндосперма – 13,4...13,0 кг/мм<sup>2</sup>;
- клейковина – удовлетворительная 27,3...27,5%.

## 5 ТЕХНИКО – ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Технико-экономическая эффективность оценивалась в соответствие с источниками [162-167].

При этом исходные данные брались из конструктивного расчета установки, в котором были установлены следующие показатели:

- производительность установки 2,5 т/ч;
- потребляемая мощность 5 кВт;
- выводимое из поточно-технологической линии оборудование: куколеотборник, овсюгоотборник, магнитный сепаратор, водораспыляющая установка, машина мокрого шелушения, энтолейтор, аспиратор и бункера для отволаживания.

Цена проектируемой установки определена суммарными затратами на материалы, агрегаты и узлы, входящие в состав конструкции с учетом трудозатрат на ее сборку:

$$C_{ПУ} = M_3 + C_3, \text{ руб.} \quad (50)$$

где:  $M_3$  – затраты на материалы, узлы и агрегаты, руб;

$C_3$  – стоимость сборки установки, руб.

В свою очередь в конструктивном расчете установки установлены габариты камеры озвучивания, выбраны шнеки, подшипники и электродвигатели для транспортировки зерна, установлено количество, размер и мощность источников ультразвука, учитываемых в расчетной формуле:

$$M_3 = C_T + C_{Ш} + C_{П} + C_{Э} + C_{И} + C_{Г}, \text{ руб.} \quad (51)$$

где:  $C_T$  – цена листа нержавеющей стали, руб;

$C_{ш}$  – стоимость шнеков, руб;

$C_{п}$  – цена подшипников, руб.;

$C_{э}$  – стоимость электродвигателей, руб;

$C_{и}$  – цена источников ультразвука, руб;

$C_{г}$  – стоимость генератора ультразвука, руб.

Выражения для определения стоимости сборки установки имеет вид:

$$C_3 = P_{и} + P_{э} + A_0 + Z_{п}, \text{ руб.} \quad (52)$$

где:  $P_{и}$  – расходы на инструмент, руб;

$P_{э}$  – расходы на электроэнергию, руб;

$A_0$  – амортизационные отчисления на оборудование, руб;

$Z_{п}$  – заработная плата работникам, руб.

Используя часовую тарифную ставку ремонтно-механического участка ЗАО «Элеваторхолдинг» от 01.01.2013г. учитывающую: расходы на инструмент, электроэнергию, амортизационные отчисления на оборудование, заработную плату работникам, согласно нормам времени на выполнение токарных, сварочных и слесарных работ, а также для сборки установки получены данные, представленные в таблице 10.

Таблица 10 – Стоимость работ ремонтно-механического цеха

№ п/п	Наименование работ	Нормы времени, час	Часовая ставка, руб/час	Основная зарплата, руб.
1	токарные	30	100	3000
2	сварочные	20	90	1800
3	слесарные	50	60	3000

Эксплуатационные затраты определяются по формуле:

$$И_э = З + А + Р + Э + П, \text{ руб.} \quad (53)$$

где:  $Z$  – затраты на заработную плату рабочих, руб;

$A$  – амортизационные отчисления, руб;

$P$  – отчисления на ремонт и техобслуживание установки, руб;

$\mathcal{E}$  – затраты на расходуемую электроэнергию, руб;

$\Pi$  – прочие эксплуатационные затраты, руб.

Затраты на заработную плату рабочих, занятых на выполнении механизированного процесса обработки зерна рассчитаны по выражению:

$$Z = D \cdot t \cdot n \cdot L \cdot C_m, \text{ руб}, \quad (54)$$

где:  $D$  – кол-во дней работы машины в году;

$t$  – сменная продолжительность работы на выполнении производственного процесса в часах;

$n$  – число смен в день;

$L$  – кол-во рабочих, занятых на выполнении процесса, чел;

$C_m$  – часовая тарифная ставка с дополнительными начислениями и отчислениями на социальные нужды (соц. страхование, мед. страхование, фонд занятости, пенсионный фонд) по данным предприятия, руб.

$$Z = 290 \cdot 8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 47,61 = 110455,2 \text{ руб.}$$

Амортизация машины рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{B \cdot N_a}{100}, \text{ руб}, \quad (55)$$

где:  $B$  – балансовая стоимость установки, руб;

$N_a$  – норма ежегодных амортизационных отчислений 10% от балансовой стоимости.

$$A = \frac{450000 \cdot 10}{100} = 45000 \text{ руб.}$$

Затраты на ремонт и техническое обслуживание установки:

$$P = \frac{B \cdot H_p}{100}, \text{ руб.} \quad (56)$$

где:  $H_p$  – норма ежегодных отчислений на ремонт и техническое обслуживание, % (по данным предприятия)

$$P = \frac{450000 \cdot 10}{100} = 45000 \text{ руб.}$$

Затраты на расходуемую электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$\mathcal{E} = F_2 \cdot Z_{\mathcal{E}}, \text{ руб.} \quad (57)$$

где:  $F_2$  – годовое потребление эл. энергии, кВт/ч;

$Z_{\mathcal{E}}$  – стоимость кВт/ч эл. энергии, руб.

Годовой расход электроэнергии на технологические нужды рассчитывается по формуле:

$$F = \frac{N \cdot t \cdot n \cdot D \cdot K_3 \cdot K_0}{K_c \cdot K_{пд}}, \text{ кВт/ч.} \quad (58)$$

где:  $N$  – потребляемая мощность установленного оборудования, кВт;

$t$  – продолжительность смены, час;

$n$  – число смен работы оборудования в день;

$D$  – число дней работы оборудования в году;

$K_3$  – коэффициент загрузки оборудования,  $K_3 = 0,85$ ;

$K_0$  – коэффициент одновременности работы оборудования,  $K_0 = 0,6..0,7$ ;

$K_c$  – коэффициент учитывающий потери сети,  $K_c = 0,96$ ;

$K_{пд}$  – коэффициент полезного действия электродвигателей,  $0,85 \dots 0,90$ .

$$F = \frac{5,0 \cdot 8 \cdot 1 \cdot 290 \cdot 0,85 \cdot 0,65}{0,96 \cdot 0,90} = 7417,8 \text{ кВт/ч}$$

тогда:

$$\mathcal{E} = 7417,8 \cdot 4,50 = 33380, \text{ руб.}$$

Прочие эксплуатационные затраты планируются в размере 3-5% от суммы эксплуатационных затрат.

Общая сумма годовых эксплуатационных затрат с учетом прочих рассчитывается по формуле:

$$И_{\mathcal{E}} = (З + А + Р + \mathcal{E}) \cdot 1,05 \quad (59)$$

$$И_{\mathcal{E}} = (110455,2 + 45000 + 45000 + 33380) \cdot 1,05 = 456004,92 \text{ руб}$$

Удельные эксплуатационные затраты определяются по формуле:

$$И_{\text{уд}} = \frac{И_{\mathcal{E}}}{W}, \text{ руб/т,} \quad (60)$$

где:  $W$  – годовая производительность машины, т.

$$W = 3,747 \cdot 8 \cdot 290 = 8693 \text{ т/год.}$$

$$И_{\text{уд}} = \frac{456004,92}{8693} = 52,45 \text{ руб/т.}$$

## 5.1 Показатели использования труда и его производительности

Для экономической оценки машин принято брать в расчет только прямые затраты труда, то есть затраты труда рабочих, занятых непосредственно на выполнении механизированных работ.

Трудоемкость процесса на единицу выполнения работы рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{уд}} = \frac{\sum T}{W}, \text{ чел.ч/т} \quad (61)$$

где:  $\Sigma T$  – суммарные затраты труда рабочих, обслуживающих машину за год, чел.

Суммарные затраты труда рабочих, обслуживающих машину определяются по формуле:

$$\Sigma T = D \cdot t \cdot n \cdot h, \text{ чел.ч.}, \quad (62)$$

где:  $h$  – количество рабочих обслуживающих машину, чел;

$t$  – продолжительность смены, час;

$n$  – число смен работы оборудования в день;

$D$  – число дней работы оборудования в году.

$$\Sigma T = \Sigma T_{\text{ПР}} = 290 \cdot 8 \cdot 1 \cdot 1 = 2320 \text{ чел.ч.}$$

$$T_{\text{уд}} = \frac{2320}{8693} = 0,27 \text{ чел.ч/т}$$

Экономия труда ( $\mathcal{E}_{me}$ ) на единицу работы определяется как разность в затратах труда на машины, заменяемые проектируемой установкой и обслуживанием предложенного оборудования с одинаковой производительностью:

$$\mathcal{E}_{\text{ТВ}} = T_{\text{уд}}^{\text{исх}} - T_{\text{уд}}^{\text{ПР}}, \text{ чел.ч/т.} \quad (63)$$

$$\mathcal{E}_{me} = 2,84 - 0,27 = 2,57 \text{ чел.ч/т.}$$

Годовая экономия труда, зависит от масштаба применения сравниваемых машин и определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{m.\text{год}} = \mathcal{E}_{m.e} W_{\text{ПР}}, \text{ чел.ч.}, \quad (64)$$

где:  $W_{\text{ПР}}$  – годовая производительность машины в проектируемом варианте, т.

$$\mathcal{E}_{\text{m.год}} = 2,57 \cdot 8693 = 22341,01 \text{ чел.ч.}$$

Степень снижения затрат труда определяется по формуле:

$$C_{\text{Т}} = \frac{T_{\text{уд}}^{\text{исх}} - T_{\text{уд}}^{\text{ПР}}}{T_{\text{уд}}^{\text{исх}}} \cdot 100 (\%) \quad (65)$$

$$C_{\text{Т}} = \frac{2,84 - 0,27}{2,84} \cdot 100 = 90,4\%$$

Производительность труда ( $\Pi_{\text{Т}}$ ) на операции определена по формуле:

$$\Pi_{\text{Т}} = \frac{W}{\Sigma T}, m / \text{чел.ч.}, \quad (66)$$

$$\Pi_{\text{Т}}^{\text{исх}} = \frac{8693}{6960} = 1,25 m / \text{чел.ч.};$$

$$\Pi_{\text{Т}}^{\text{ПР}} = \frac{8693}{2320} = 3,75 m / \text{чел.ч.}$$

Рост производительности труда:

$$\Pi_{\text{рост}} = \frac{\Pi_{\text{Т}}^{\text{ПР}}}{\Pi_{\text{Т}}^{\text{исх}}}; \quad (67)$$

$$\Pi_{\text{рост}} = \frac{3,75}{1,25} = 3.$$

## 5.2 Ожидаемый экономический эффект от применения ультразвуковой установки для подготовки зерна к помолу

Экономическая эффективность внедрения установки выражается экономией затрат, которые определяются путем сопоставления эксплуатационных издержек. Так как в данном конкретном случае высвобождаются производственные площади, то добавляется и экономия от них (Э<sub>п.п.</sub>):

$$\mathcal{E}_Г = (I_{уд}^{исх} - I_{уд}^{пр}) \cdot W_{пр} + \mathcal{E}_{п.п.}, \text{руб}, \quad (68)$$

где  $I_{уд}$  – удельные эксплуатационные затраты, руб/т;

$W_{пр}$  – годовая производительность в проектируемом варианте, т;

$\mathcal{E}_{п.п.}$  – дополнительный эффект за счет сокращения производственных площадей 10000, руб.

$$\mathcal{E}_Г = (100 - 52,45) \cdot 8693 + 10000 = 423352,15 \text{ руб.}$$

Степень снижения затрат ( $C_c$ ) определяется по формуле:

$$C_c = \frac{T_{уд}^{исх} - T_{уд}^{пр}}{T_{уд}^{исх}} \cdot 100 (\%) \quad (69)$$

$$C_c = \frac{100 - 52,45}{100} \cdot 100 = 47,55\%$$

Приведенные затраты до и после внедрения установки:

$$Пз = I_{уд} + K_{уд} \cdot E_n, \text{руб/т}, \quad (70)$$

где:  $K_{уд}$  – удельные капиталовложения, руб/т;

$E_n$  – 0,15 нормативный коэффициент окупаемости капиталовложений.

Удельные капиталовложения определены выражением:

$$K_{уд} = \frac{B}{W}, \text{ руб/т,} \quad (71)$$

где: Б - балансовая стоимость оборудования, руб.

$$K_{уд}^{ИСХ} = \frac{500000}{8693} = 57,51 \text{ руб / т;}$$

$$K_{уд}^{ПП} = \frac{450000}{8693} = 51,76 \text{ руб / т,}$$

тогда:

$$\Pi_3^{ИСХ} = 100 + 57,51 \cdot 0,15 = 23,62 \text{ руб / т;}$$

$$\Pi_3^{ПП} = 52,75 + 51,76 \cdot 0,15 = 15,68 \text{ руб / т.}$$

В свою очередь годовой экономический эффект по приведенным суммарным затратам определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{ГП} = (\Pi_3^{ИСХ} - \Pi_3^{ПП}) \cdot W_{ПП} \quad (72)$$

$$\mathcal{E}_{ГП} = (23,62 - 15,68) \cdot 8693 = 69022,42 \text{ руб.}$$

### 5.3 Выводы

Технико-экономическими исследованиями установлена экономическая эффективность от внедрения разработанной установки в производство, составляющая 423352,15 руб. при производительности предприятия 8693т/год. Срок окупаемости составит 1,06 года. Расчетные данные представлены в таблице 11:

Таблица 11 – Данные технико-экономической эффективности

Наименование показателей	Значение показателей до и после внедрения	
	Исходные	Проектируемые
Производительность, т.	8693	8693
Затраты труда, чел/т.	2,84	0,27
Эксплуатационные затраты, руб./т.	100	52,45
Приведенные затраты, руб./т.	23,62	15,68
Экономическая эффективность, руб./год.	-	423352,15
Срок окупаемости, год.	-	1,06
Годовой экономический эффект по приведенным затратам, руб.	-	69022,42
Капиталовложения, руб.	500000	450000
Степень снижения эксплуатационных затрат, %.	-	47,55
Годовая экономия труда, чел.ч.	-	22341,01

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе решена актуальная научно-производственная задача повышения эффективности подготовки зерна к помолу путем влажной очистки его поверхности от загрязнений и микронасекомых и достижения оптимальных помольных кондиционных показателей с интенсификацией процесса ультразвуковыми колебаниями;

2. Результаты физико-химического анализа установлено, что зерно, подготовленное к простому помолу по принятой технологии сухой очистки и холодного кондиционирования обладает неудовлетворительными нормативными параметрами и поступает на размол с низкими показателями: зольности – соответствует 6%; влажности – соответствует 27%; микротвердости эндосперма – соответствует 28,3%; клейковины – находится в интервале 26,2...27,7%. Данное обстоятельство технологически не обеспечивает качественный размол зерна и существенно снижает потребительские свойства муки;

3. Теоретически исследованы и рассчитаны технологические параметры влажной обработки зерна, протекающие за счет интенсивного насыщения анатомических его частей водой акустическими микропотоками до максимальной сорбционной емкости с энергией связи  $10^3 \dots 10^4$  кДж/мол·м. Напряжения, возникающие при высоких градиентах влажности, образуют в зерне микротрещины с диффузионным переносом воды в эндосперм, а также гидроксильные группы, разрывающие полипептидную цепь, что ускоряет и стабилизирует процесс увлажнения;

4. Аналитически и экспериментально исследованы и установлены конструктивно-режимные параметры ультразвуковой установки и технологии, обеспечивающие высокую степень очистки и увлажнения зерна, составляющие: низкочастотный диапазон ультразвуковых колебаний – 18,0...18,15 кГц; температура процесса – 30...40<sup>0</sup>С; время обработки – 30 – 40 с; плотность мощности – 1 Вт/см<sup>2</sup>;

5. Исследованиями влияния параметров технологического процесса на изменение физико-химического состояния обрабатываемого в ультразвуковой установке зерна установлено, что за счет кумулятивной акустики остаточные загрязнения на поверхности и в зонах бородки и бороздки зерна отсутствуют; показатели зольности уменьшаются на 60...70% и стабилизируются на уровне 1,16%; показатели влажности зерна выравниваются и стабилизируются на уровне 14,5...17%; микротвердость эндосперма устанавливается на требуемом уровне 13,4...13,0 кг/мм<sup>2</sup>; неудовлетворительная на 45,8% клейковина достигает параметров удовлетворительной в интервале 27,3...27%;

6. Математическим моделированием технологического процесса установлена высокая 98% сходимость теоретических данных с экспериментальными. За счет снижения энерго- и трудозатрат, а также потребных площадей для отволаживания и сокращения времени обработки при установленной производительности 9 тыс. тонн годовой экономический эффект составит порядка 420 тыс.рублей со сроком окупаемости 1,06 года.

### **Рекомендации производству**

Для снижения энерго- и трудозатрат при подготовке зерна к простому помолу рекомендуется применять разработанную технологию и ультразвуковую установку, обеспечивающих достижение нормированных кондиционных показателей для получения обойной муки высокого качества.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

С целью возможности использования технологического процесса на предприятиях различной мощности разработать промышленные образцы модульных ультразвуковых установок очистки и увлажнения зерна для предприятий с малыми и средними объемами производства.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ГОСТ 9353 – 90. Пшеница. Требования при заготовках и поставках. – М.: Госстандарт, 1997.
2. Казаков, Е.Д. Основные сведения о зерне/Е.Д.Казаков. – М.: Зерновой союз, 1997. –144с.
3. Беркутова, Н.С. Технологические свойства пшеницы и качество продуктов ее переработки. / Н.С. Беркутова, И.А. Швецова. –М.: Колос, 1984. -208с.
4. Бутковский, В.А. Мукомольное производство/В.А.Бутковский. – М.: Колос, 1983. -286с.
5. Вашкевич, В.В. Техника и технология производства муки/ В.В. Вашкевич, О.Б. Горная, Г.Н. Ильичев. –Барнаул: 2000. -209с.
6. Гамецкий, Р.Р. Оборудование зерноперерабатывающих предприятий/Р.Р. Гамецкий, Т.З. Рудай. - М.: Колос, 1978. – 245с.
7. Галкина, Л.С. Техника и технология производства муки на комплектном оборудовании/Л.С. Галкина, В.А. Бутковский, Г.Е. Птушкина. –М.: Агропромиздат, 1987. -324с.
8. Кулак, В.Г. Мукомольные заводы на комплектном оборудовании/В.Г. Кулак, Б.М. Максимчук, А.П. Чакар. –М.: Колос, 1984. -224с.
9. Панфилов, В.А. Технологические линии пищевых производств / В.А. Панфилов, О.А. Чураков. –М.: Пищевая промышленность. 1996, - 47с.
10. Егоров, Г.А. Управление технологическими свойствами зерна/ Г.А. Егоров. –Воронеж: Изд. ВГУ, 2000. -348с.
11. Егоров, Г.А. Технология муки. Технология крупы/Г.А.Егоров. – М.: Колос, 2005. -303с.
12. Егоров, Г.А. Гидротермическая обработка зерна/Г.А.Егоров. - М.: Колос, 1968. - 96с.
13. Щербаков, В.Г. Биохимия растительного сырья/В.Г.Щербаков. – М.: Колос, 1999. -376с.

14. Наумов, И.А. Совершенствование кондиционирования и измельчения пшеницы и ржи/И.А.Наумов. – М.: Колос, 1975. -312с.
15. Казаков, Е.Д. Биохимия зерна и хлебопродуктов/Е.Д.Казаков, Г.П. Карпиленко. – С.-Пб.: ГИОРД, 2005. -510с.
16. Крестович, В.Л. Биохимия зерна/В.Л.Крестович - М.: Наука, 1981. -484с.
17. Cook, S.S. Erosion by water hammer. Proceedings of the Royal Society of London, 1928, ser.A, v.119, iss. 783, 481-488.
18. Parson, C.A. Cook S.S. Investigations into the causes of corrosion or erosion of propellers. Engineering, 1919, v.107, 501, 515-519.
19. Kornfeld M., Suvorov L., On the destructive action of cavitations. Journal of Applied Physics, 1944, v.15, n.3, 495-497.
20. Engel B. Hydraulic fluids: research and practice. Engineering, 1962, n.5033, 459-460.
21. Haller P. Untersuchung von Korrosion durch Kavitation. Schweizerische Bauzeitung (Switzerland),1933, Bd. 101, n.21-22, 243-246, 264-266.
22. Фрид, А.М. К вопросу о физической сущности кавитационного разрушения материалов./А.М.Фрид. Известия ВУЗов, авиационная техника. -1963. -№1. - С. 126-130.
23. 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.
24. Остроумов, Г.А. О механизме кавитационного разрушения. Акустический журнал//Г.А.Остроумов. -1963, т.9, в.2. – С.198-204.
25. Константинов, В.А. Вопросы физической природы кавитации и эрозии/В.В.Константинов. Известия А.Н. СССР, ОТН. -1947. -№6. – С. 657-667.
26. 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.

27. Патент 2481160 Российская Федерация, МПК ВО5В17/06. Ультразвуковой распылитель/В.Н. Хлеслев, А.В. Шалунов, Д.В. Генне. - №2011146974/05, заявл.18.11.2011; опубл. 10.05.2013.
28. Флин, Г. Физика акустической кавитации в жидкости. Физическая акустика/Пер. с англ. под ред. У. Мэзона. Т.3. -Челябинск –М.: Мир, 1967. – 452с.
29. Домчук, И.С. Ультразвуковая интенсификация технологических процессов/И.С.Домчук. – М.: Масшгиз, 1960. -90с.
30. Акопян, В.Б. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами/Б.В. Акопян, Ю.А. Ершов. –М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. -224с.
31. Рудик, Ф.Я. Разработка технологии очистки подсолнечного масла на стадии его хранения/Ф.Я. Рудик, И.В. Симакова, И.Н. Крелина, А.М. Погосян//Хранение и переработка сельхозсырья. -2009. -№3. – С.14-17.
32. Рудик, Ф.Я. Инновационные методы очистки растительных масел/Ф.Я. Рудик, И.В. Симакова. –Саратов ФГОУ ВПО. Саратовский ГАУ. 2012. -64с.
33. Цвелев, Н.Н. Пшеница — *Triticum L.* / Н.Н. Цвелев // Злаки СССР. -Л.: Наука, 1976. - С. 160-170.
34. Козьмина, Н.П. Зерно./ Н.П. Козьмина. – М.: Колос, 1969. – 368с.
35. Рудик, Ф.Я. Особенности технологического процесса подготовки зерна к помолу. Мат. VIII Межд. н.-пр.конф. «Технология продуктов здорового питания» / Ф.Я. Рудик, Н.А. Семилет. – Саратов: ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ». 2014. – С.295-299.
36. Козьмина, Н.П. Биохимия зерна и продуктов его переработки/Н.П.Козьмина. –М.: Колос, 1976. -216с.
37. Справочник по качеству зерна / Под редак. Жемела Г.П. –М.: Урожай, 1988. -216с.
38. Зверев, С.В. Физические свойства зерна и продуктов его переработки / С.В. Зверев, Н.С. Зверева. –М.: ДеЛи принт, 1999. -176с.

39. Плешков, Б.П. Биохимия сельскохозяйственных растений/Б.П.Плешков. – М.: Агропромиздат, 1987. - 494с.
40. Технология переработки продукции растениеводства/ Под редак. Н.М.Личко. –М.: Колос, 2000. -112с.
41. Оценка качества зерна: Справочник/Сост. И.И. Василенко, В.И. Комаров. – М.: Агропромиздат, 1987. -208с.
42. Мерко, И.Т. Технология мукомольного и крупяного производства/И.Т.Мерко. –М.: Агропромиздат, 1985. -288с.
43. Щербаков, В.Г. Биохимия растительного сырья/ В.Г. Щербаков, В.Г. Лобанов и др. –М.: Колос, 1999. -376с.
44. Егоров. С.А. Управление технологическими свойствами зерна. –М.: Колос, 2005. -364с.
45. Галицкий, Р.Р. Оборудование зерноперерабатывающих предприятий / Р.Р. Галицкий. –М.: Агропромиздат, 1990. -272с.
46. Патент 2611176 Российская Федерация, МПК А 01 F 12/00. Универсальная зерноочистительная машина/Гиевский А.М., Тарасенок А.П., Оробинский В.И., Чернышов А.В., Баскатов И.В., - № 2015156629. заявл. 28.12.2015; опубл. 21.02.2017. бюл. №6
47. Оробинский, В.И. Оценка качества очистки зерна на семяочистительной линии фирмы LMC./В.И. Оробинский, А.П. Тарасенко, А.В. Чернышов, Н.Е. Буравлев, М.К. Харитонов// Вестник Воронежского госагроуниверситета. 2015. - №4(47). - С. 93-97.
48. Тарасенко, А.П. Совершенствование технологии получения качественных семян и продовольственного зерна/А.П. Тарасенко, В.И. Оробинский, М.Э. Мерчалова, Н.Н. Сорокин//Лесотехнический журнал. 2014. т.4. - №3(15). -. С. 36-40.
49. Казаков, Е.Д. Биохимия зерна и хлебопродуктов / Е.Д. Казаков, Г.П. Карпиленко. – СПб.: ГИОРД, 2005. -511с.

50. Оспанов, А. Моделирование процесса увлажнения зерна при гидротермической обработке/ А. Оспанов, А. Румянцев, Н. Борзов// Хлебопродукты. -2008. -№4. – С.35.
51. Патент 2436631 Российская Федерация, МПК В02В1/00. Способ гидротермической обработки зерна пшеницы/ Анисимова Н.И., Хомутов А.И., Козьмин Ф.О. -№2008135568/12; заявл. 02.09.2008; опубл. 20.12.2011.
52. 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.
53. Правила организации и ведения технологического процесса на мельницах. –М.: ЦИНТО Госкомзаг, 1967. – С.21-30.
54. Подготовка пшеницы к помолу с отделением плодовых оболочек. Сообщения и рефераты. –М.: ВНИИЗ, 1952, вып.1. – С. 8-12.
55. Паньковский, Г.А. Метод интенсивного кондиционирования/ Г.А. Паньковский// Хлебопродукты. -2001.-№7. – С.34-35.
56. Егоров, В.А. Влияние параметров гидротермической обработки на внутренний перенос влаги в зерне/ В.А.Егоров//Труды ВНИИЗ. -1967, вып. 61-62. – С. 77-82..
57. Гинзбург, А.С. Гигроскопические свойства зерна различных культур / А.С. Гинзбург, В.И. Анискин, Г.С. Окунь, А.Г. Чижиков. –М.: ЦИНТИ Госкомзаго, 1967. -194с.
58. Гинзбург, А.С. Влага в зерне/ А.С. Гинзбург, В.П. Дубровский и др. –М.: Колос, 1969. -237с.
59. Гончарова, З.Д. Исследование влияния гидротермической обработки зерна на изменение его структурно-механических свойств/ З.Д. Гончарова // Мукомольная промышленность. -1964. -№5.
60. Патент 2455048 Российская Федерация, МПК В02В1/08. Способ увлажнения зерна перед помолом / Краснов И.Н., Удовкин А.И., Кравченко И.А., Перекрест Ф.О. -№20111088001-13; заявл. 09.03.2011; опубл. 7.10.2012.

61. Сушенкова, О.Н. Гидротермическая обработка и микрофлора зерна / О.Н. Сушенкова, А.В. Кочеткова, Л.Г. Шабурова // Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность. -1986. -№5. – С.46-47.
62. 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.
63. Кулак, В.Г. Технология производства муки / В.Г. Кулак, Б.М. Максимчук. –М.: Агропромиздат, -1991. -224с.
64. Патент 2220001 Российская Федерация, МПК В02В1/04. Способ подготовки муки к помолу / Бурау В.А., Шалатов Б.Г. -№2002104146/13; заявл. 14.02.2001; опубл. 27.12.2003.
65. Айзикович, Л.Е. Физико-химические основы технологии производства муки. – М.: Колос. 1975. -197с.
66. Щербаков, В.Г. Биохимия растительного сырья / В.Г. Щербаков, В.Г. Лобанов, Т.Н. Прудникова и др. –М.: Колос, 1999. -376с.
67. Клеев, И.А. Значение температуры при хранении зерна / И.А. Клеев. –М: Заготиздат, 1977. -25с.
68. Лыков, А.В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах / А.В. Лыков. – М.: – Л.: ГИТЛ, 1954. -97с.
69. Патент 2133141 Российская Федерация, МПК В02В01/04. Способ гидротермической обработки зерна перед помолом. – «2000133141/13; заявл. 28.12.2000; опубл. 27.12.2002.
70. Пол. Мод. 42768 Российская Федерация, МПК В02В1/08. Устройство для кондиционирования зерна / Кофейникова Е.В., Черепанов В.Г. -№2004106930/22; заявл. 09.03.2004; опубл. 20.12.2004.
71. Патент 2192926 Российская Федерация, МПК В02В3/Галузин В.А., Сергеев С.В. –№2001104985/13; заявл. 23.02.2001; опубл. 20.11.2002.
72. Фердман, Д.А. Биохимия / Д.А. Фердман. –М.: Агропромиздат. 1991. -224с.
73. Бергман, Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – М: ИИЛ, 1956. -726с.

74. Акуличев, В.А. Пульсация кавитационных полостей. Физика и техника мощного ультразвука / В.А. Акуличев. –М.: Наука, 1968. -256с.
75. Розенберг, Л.Д. Кавитационная область / Л.Д. Розенберг. –М.: Наука, 1968. -256с.
76. Флинн, Г. Физика акустической кавитации в жидкостях. Методы и приборы ультразвуковых исследований/ Г. Флинн. –М.: Мир, 1967. -362с.
77. Патент 2471557 Российская Федерация, МПК В02В01/00. Увлажнительная машина для зерна/Краснов И.Н., Удовкин А.И., Кравченко И.А. - №2011116868/13; заявл. 13.27.2011; опубл. 10.01.2013.
78. Василенко, И.И. Оценка качества зерна: Справочник/И.И. Василенко, В.И. Комаров. –М.: Агропромиздат, 1989.-208с.
79. Беркутова, Н.С., Технологические свойства зерна пшеницы/Н.С. Беркутова, Н.Давыдов и др. // Хлебопродукты. -2006. -№8. – С.42-44.
80. Казаков, Е.Д. Биохимия зерна и продуктов его переработки/Е.Д. Казаков, В.Л. Кретович. –М.: Агропромиздат, 1989. -368с.
81. Кишинидев, М.И. Биохимия пшеницы/М.И. Кишинидев. –М.:–Л.: Сельхозиздат, 1951. -312с.
82. Вашкевич, В.В. Техника и технология производства муки/В.В. Вашкевич, О.Б. Горец, Г.Н. Ильичев. –Барнаул: 2000. -245с.
83. Гамецкий, Р.Р. Оборудование зерноперерабатывающих предприятий/ Р.Р. Гамецкий, Т.З. Рудай. –М.: Колос,1978. -245с.
84. Бутковский, В.А. Технология зерноперерабатывающих производств. –М.: Иптограф сервис, 1999. -472с.
85. Пономарев, В.А. Учебник мастера мукомольного производства / В.А. Пономарев, А.К. Терещенко. –М.: Высшая школа, 1972. -408с.
86. Патент № 2244595 Российская Федерация, МПК В 02В1/04. Установка для мойки зерна/Игонин В.Н., Артемьев В.Г. и др. - №2003104091/12; заявл. 11.02.2003; опубл. 20.01.2005; Бюл. №24.

87. Пол. Мод. 130519 Российская Федерация, МПК В 02В1/04, А23Н17/00. Устройство для обработки зерна/Рудик Ф.Я., Моргунова Н.Л., Кодацкий Ю.А. - №2013112532, заявл. 20.03.2013г.; опубл. 27.07.2013.
88. Патент пол. мод. 84094 Российская Федерация, МПК К26В 11/02/Гафин М.М., Кудрямов В.И., Губейдулин Х.Х. - №2008152574/22; заявл. 29.12.2008; опубл. 27.06.2009; Бюл. №18.
89. Ольшанский, Н.А. Применение ультразвука в сварочной технике. Тезисы докладов научного совещания по применению ультразвука в сварке. –М.: 1959. – С.32-41.
90. Коган, М.Г. Очистка деталей от жировых загрязнений, полировальных и притирочных паст, защитных эмалей и наклеочных смол с воздействием ультразвука. Доклады на III Всесоюзном совещании по электрическим и ультразвуковым методам обработки. –Л.: Машгиз, 1958. – С.32-41.
91. Домчук, И.С. Ультразвуковая интенсификация технологических процессов. –М.: Машгиз, 1960, -90с.
92. Архипова, Г.Н. Прогрессивные способы переработки плодов и овощей с помощью ультразвука/ Г.Н. Архипова, С.Н. Хабаров, Н.К. Шелковская, Н.В. Крылова// Вестник Российской академии с.х. наук. - 2007. - №2. – С.90-91.
93. 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.
94. Патент 2473674 Российская Федерация, МПК С11В3/00, С11В3/10. Способ очистки фритюрного жира/Рудик Ф.Я., Богатырев С.А., Симакова И.В. и др. – №20111313284/13; заявл. 26.07.2011; опубл. 27.01.2013.
95. Колер, О.К. Ультразвуковая очистка/О.К.Колер, Г.С. Кратыш, Г.Д. Лубяницкий. – Л.: Машиностроение, 1977. -184с.
96. Башкиров, В.И. Определение производительности ультразвуковой очистки. –М.: Ультразвуковые технологические процессы, оборудование и приборы контроля. ЛДНТП. 1975. – С.14-17.

97. Зарембо, Л.К. Введение в нелинейную акустику/Л.К. Зарембо, В.А. Красников. –М.: Наука, 1966. -519с.
98. Рудик, Ф.Я. Повышение кормовой ценности зерна сои глубокой влажной обработкой / Ф.Я. Рудик, Ю.А. Кодацкий // Хранение и переработка сельхозсырья. - 2012. -№1. – С.41-42.
99. Рудик, Ф.Я. Интенсификация процесса очистки растительных масел от первичных продуктов окисления в ультразвуковом поле. / Ф.Я. Рудик, И.В. Симакова, Л.Ю. Скрябина, Г.Г. Гумаров, М.С. Тулиева // Научное обозрение. - 2011. - №5. – С.15-18.
100. Рудик, Ф.Я. Регенерация нерафинированного подсолнечного масла при хранении / Ф.Я. Рудик, И.В. Симакова, Л.Ю. Скрябина, Г.С. Гумаров, М.С. Тулиева // Хранение и переработка сельхозсырья. -2011. –№12. – С.22-23.
101. Рудик, Ф.Я. Закономерность распределения акустических колебаний в среде растительного масла при его очистке / Ф.Я. Рудик, Н.Л. Моргунова, М.С. Тулиева, А.К. Гумарова. // Вестник СГАУ. -2013. -№8. – С.75-77.
102. Патент 2473674 Российская Федерация, МПК С11В3/00. Способ очистки фритюрного жира/Рудик Ф.Я., Богатырев С.А., Симакова И.В., Скрябина Л.Ю., Тулиева М.С. - № 2011131328/13. заявл. 26.07.11, опубл. 27.01.2013, бюл. 3.
103. Пол. Мод. 130519 Российская Федерация, МПК Устройство для обработки зерна / Рудик Ф.Я., Моргунова Н.Л., Кодацкий Ю.А. - № 2013112532/13, заявл. 20.03.2013, опубл. 27.07.2013
104. Стретт, Д. У. (лорд Рэлей) Теория звука. — М.: ГИТТЛ, 1955. — 503 с.
105. Cook S.S. Erosion by water hammer. Proceedings of the Royal Society of London, 1928, ser.A, v.119, iss. 783, 481-488.
106. Parson C.A. Cook S.S. Investigations into the causes of corrosion or erosion of propellers. Engineering, 1919, v.107, 501, 515-519.
107. Kornfeld M. Suvorov L. On the destructive action of cavitations. Journal of Applied Physics, 1944, v.15, n.3, 495-497.

108. Корнфельд, М. Упругость и прочность жидкостей/М.корнфельд. ГИТТЛ, 1951, - 107с.
109. Engel B. Hydraulic fluids: research and practice. Engineering, 1962, n.5033, 459-460.
110. Haller P. Untersuchung von Korrosion durch Kavitation. Schweizerische Bauzeitung (Switzerland),1933, Bd. 101, n.21-22, 243-246, 264-266.
111. Thoma D. Experimental research in the field of water power. Transaction First World Power Conference, London, 1924, v.2, 536-551.
112. Haller P. Cavitation damage and correlation with mechanical and fluid properties. Transaction of the ASME, ser.D, 1967, v.89, n.4, 753-763.
113. Poulter T.C.The mechanism of cavitation erosion. Journal of Applied Mechanics, 1942, v.9, n.1, 31-37.
114. Фрид, А.М. К вопросу о физической сущности кавитационного разрушения материалов/А.М.Фрид.//Известия высших учебных заведений, авиационная техника. - 1963. - №1.-С. 126-130.
115. Smith F.D. On the destructive mechanical effects of the gas bubbles liberated by the passage of intense sound through a liquid. Philosophical Magazin, 1935, s7, v.119, 1147-1151.
116. Козырев, С.П. Кавитация в гидроабразивном потоке и кавитационное абразивное изнашивание/С.П.Козырев.// Известия АН СССР, ОТН, - 1962. - №2. - С. 65-74.
117. Howkins S.D. Solid erosion in low-amplitude sound fields. Journal of the Acoustical Society of America, 1966, v.39, n.1, 55-61.
118. Hasmukh P. On the collapse of a Hemispherical Cavity seated on a surface. Journal of Applied Mechanics, 1947, v.14, n.1, 39-42.
119. Node, S.F. Ellis, A.T. К механизму кавитационного разрушения несферическими пузырьками, захлопывающимися в контакте с твердой поверхностью. Trans. ASME, E, J. Appl. Mech. (USA)// Труды американского общества Инженеров механиков (русский перевод), серия E. Техническая механика. 1961, №4,- с.204-212.

120. Шатлер, Н.Д и Меслер, Р.Б. Исследование с помощью фотосъемки динамики и разрушающей способности газовых пузырьков, смыкающихся вблизи твердой стенки. Trans. ASME, D, J. Basic Eng. (USA)// Труды американского общества Инженеров механиков (русский перевод) серия Д.- 1965. - №2.-С. 290-298.
121. Семерчан, А.А. К вопросу о теории разрушающего действия кавитации./А.А.Верещагин,Л.Ф.Верещагин,А.А.Семерчан.//Инженерно-Физический журнал. - 1960, т.7. - №3.- С. 87-90.
122. Marinesco N. Deflagration of explosive substances by ultrasonic waves. Comptes Rendus Academie Sciences, Paris, 1935, v.201, 1187-1199.
123. Кружилин, В.Г. О кавитации в некоторых узлах авиационных двигателей./В.Г.Кружилин,Б.А.Савельев.//Труды Московского авиационного института. - 1956, вып.64.
124. Гавранек, В.В. Тепловое и механическое воздействие кавитационной зоны на поверхность/В.В.Гавранек,Д.Н.Большуткин,В.И.Зельдович.// Физика ультразвука.- 1960, том 10. - №2.-С. 262-268.
125. Nolting В.Е. Neppiras E.A. Cavitation produced by ultrasonic. Proceedings of the Physical Society, 1950, v.63B, 674-685.
126. Knapp R.T. Recent investigation of mechanics of cavitation and cavitation damage.Transaction of the ASME, ser.D, 1955, v.77, n.7, 1045-1054.
127. Остроумов,Г.А. О механизме кавитационного разрушения / Г.А.Остроумов. //Акустический журнал, 1963. - т.9, в.2,-С. 198-204.
128. Wheeler W.H. Indentation of mettals by cavitation. Transaction of the ASME, ser. D, 1960, v.82, n.1, 184-194.
129. Brooke Benjamin T. Pressure waves from collapsing cavities. Second Semposium on naval hydrodynamics, Washington, 1958. Proceedings National Academy of Science (ed.R.D.Cooper), 515, 207-233.
130. Hickling R. Plesset M.S. Collapse and rebound of a spherical bubbles in water. Physical Flyids, 1964, v.7, n.1, 7-14.

131. Айвени Хэмит. Численный анализ явления захлопывания кавитационного пузырька в вязкой сжимаемой жидкости. Trans. ASME, D, J. Basic Eng. (USA),//Труды американского общества Инженеров механиков, Теоретические основы инженерных расчетов (русский перевод), сер.Д. – 1965. - №4,-С. 140-150.
132. Sutton G.W. A photoelastic study of strain waves caused by cavitation Journal of Applied Mechanics, 1957, v.24, 340-348.
133. Jones J.R. Edwards D.N. An experimental study of the forces generated by the collapse of transient cavities in water. Journal of Fluids Mechanics, 1960, v.7, part 4, 596-609.
134. Нумачи, Ф. Экспериментальное исследование кавитации, возбуждаемой ультразвуком. Trans. ASME, D, J. Basic Eng. (USA)// Труды американского общества Инженеров механиков, Теоретические основы инженерных расчетов (русский перевод), сер.Д. - 1965. - №4.-С. 128-139.
135. Константинов, В.А. Вопросы физической природы кавитации и эрозии/В.А.Константинов.//Известия АН СССР, ОТН. - 1947. - №6.-С. 657-667.
136. Френкель, Я.И. Об электрических явлениях, связанных с кавитацией, обусловленной ультразвуковыми колебаниями в жидкости/ Я.И.Френкель.// Журнал физической химии. - 1940, т.14, вып.3.-С. 305-308.
137. Эльпинер, М.Е. О механизме химического действия ультразвуковых волн//М.Е.Эпильнер. Акустический журнал. - 1955, т.5. - №2. -С. 133-145.
138. Натансон, Т.Л. О величине электрического поля в полостях, образуемых при кавитации жидкости ультразвуком//Т.Л.Натансон Доклады Академии наук СССР. – 1948. т.59. - №1.- С. 83-87.
139. Лазаренко, Б.Р. К вопросу о кавитации и вызываемой ею эрозии/Б.Р.Лазаренко, М.К.Болога, Ю.Н. Пауков.// Известия АН Молд. ССР, сер. физ-техн. и матем. наук . - 1964, т.5. - №3.-С. 3-20.
140. Якубке, Х.-Д. Физико-химические свойства // Аминокислоты, пептиды, белки//Х.-Д. Якубке, Х.Г. Ешкайт – М.: Мир, 1985. - С. 356-363.

141. Белки//Химическая энциклопедия. — М.: Советская энциклопедия, 1988.
142. Привалов, П.Л. Стабильность белков и гидрофобные взаимодействия /П.Л.Привалов.// Биофизика. - 1987. - В. 5. - Т. 32. - С. 742-760.
143. Страйер, Л. Биохимия в 3 томах. — М.: Мир, 1984.
144. Пригожин, И. Химическая термодинамика / И. Пригожин, Р. Дерей. – Новосибирск: Наука, 1966, -332с.
145. Коробейников, В.П. Еще о кавитационном разрушении/ В.П. Коробейников, Г.А.Остроумов//Акустический журнал. – 1965, т.11. в.4. – С. 458-462.
146. N. H. Barton, D. E. G. Briggs, J. A. Eisen Evolution. — Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2007. — С. 38.Erdman-Jonitzer F.
147. Медведев, П.В. Новые методы оценки технорлогических свойств зерна пшеницы с использованием информационных технологий/П.В. Медведев, В.А. Федотов, И.А. Бочкарев//Хлебопродукты. 2017. - №1. – С. 60-63.
148. Медведев, П.В. Комплексная оценка потребительских свойств зерна и продуктов его переработки/ П.В. Медведев, В.А. Федотов, И.А. Бочкарев//Междун. н. – иссл. журнал. 2015. - №7. – С. 81-83.
149. Медведев, П.В. Управление качеством продуктов переработки зерна пшеницы/ П.В. Медведев, В.А. Федотов, И.А. Бочкарев//Научный журнал НИУ ИТМО. 2016. -№1. – С.61-69.
150. Майстров, Л. Е. Развитие понятия о вероятности/Л.Е.Майстров. — М.: Наука, 1980.
151. ГОСТ 10847-74. Зерно. Методы определения зольности.
152. ГОСТ 13586.5-93. Зерно. Метод определения влажности.
153. ГОСТ 13586.1-68. Зерно. Методы определения количества и качества клейковины в пшенице.
154. ГОСТ 22162-76. Зерно. Метод определения микротвердости.
155. ГОСТ 10846-91. Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка.

156. Рудик, Ф.Я. Микроаналитический метод исследования загрязненности зерна/Ф.Я.Рудик, А.А. Морозов, М.С. Марадудин, Н.А.Семилет//Аграрный научный журнал. -2016. -№1. – С.59-61.
157. Талапай, П.Г. Компас-3D V9-10 на примерах. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. -529с.
158. Бондарь, В.К. Техника СВЧ влагометрии/В.К.Бондарь. -Минск : Высшая школа, 1974.-223 с.
159. Птицин, С.Д./О механизме перемещения влаги в зерновке пшеницы при сушке и увлажнении/С.Д.Птицин, В.Ф.Кабанов//Научно-технический бюллетень ВИМа, 1974, вып.24. - С.30-33.
160. ГОСТ Р 52189-2003 Мука пшеничная. Общие технические условия
161. Веденяпин, В.Г. Общая методика экспериментальных исследований и обработка опытных данных. – М.: Колос, 1981. – 136 с.
162. Булатов, А.С. Экономика/А.С.Булатов. -М.: БЕК, 1996, - 632с.
163. Коваленко, Н.А Экономика сельского хозяйства/Н.А.Коваленко. -М.: Колос, 1999.
164. Экономическое законодательство. – М.: 1998. – 448с.
165. Райзберг, Б.А. Курс экономики. Учебник - 3-е изд., доп. /Б.А.Райзберг. - М.: ИНФРА-М, 2001-716с.
166. Васильев, Г. А. Техничко-экономические расчеты новой техники / Г. А. Васильев. - М. : Машиностроение, 1977.-276с.
167. Волков, О.И Экономика предприятия/О.И. Волков, В.К.Скляренко –М.: ИНФРА-М, 1978.-325с.

# **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## Приложение А

### Расчет шнека

Диаметр шнека определяется выражением:

$$D = 0,275 \frac{Q}{E \cdot n \cdot \varphi \cdot \rho_n \cdot R_\beta}, \text{ м}, \quad (1)$$

где:  $Q$  – расчетная производительность конвейера, т/ч;

$E$  - отношение шага винта к диаметру винта;

$n$  – частота вращения винта, мин<sup>-1</sup>;

$\rho_n$  - насыпная плотность груза, т/м<sup>3</sup>;

$R_\beta$  - коэффициент уменьшения производительности от наклона конвейера, выбирается по таблице 1;

$\varphi$  - коэффициент заполнения желоба, выбирается по таблице 2.

Таблица 1 – Значения коэффициента уменьшения производительности от наклона конвейера, где  $\beta$  – угол наклона конвейера

$\beta^*$	0	5	10	15	20
$R_\beta$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6

Таблица 2 – Значения коэффициентов заполнения желоба и сопротивления перемещению груза

Группа грузов	$\varphi$	$\omega$
Легкие неабразивные	0,4	1,2
Легкие малоабразивные	0,32	1,6
Тяжелые малоабразивные	0,25	2,5
Тяжелые абразивные	0,125	4,0

После проведенных расчетов диаметр винта согласуется с рекомендуемыми параметрами, представленными в таблице 3.

Таблица 3 – Отношение диаметра к шагу винта

Диаметр, мм	100	125	160	200	250	320	400	500	650	800
Шаг, мм	100 80	125 100	160 125	200 160	250 200	320 250	400 320	500 400	650 500	800 650

Частота вращения вала не должна превышать максимально допустимую, для ленточных конвейеров по перемещению зерна пшеницы  $60 \text{ мин}^{-1}$ , а также обеспечивать время нахождения единичного зерна в камере озвучивания в течение 30 секунд. В связи с этим расчёт частоты вращения шнека вёлся по формуле:

$$n = 2 \cdot L_{\text{ш}} / S < 60, \text{ мин}^{-1}, \quad (2)$$

где:  $L_{\text{ш}}$  – длина шнека, м;

$S$  – шаг шнека, м.

Данный расчёт гарантирует, что время прохода обрабатываемой водно-зерновой смеси через всю длину шнека и, соответственно, камеры озвучивания составит не менее 30 секунд. Мощность, которую необходимо приложить к валу винта определяли по выражению:

$$N_0 = \frac{Q}{367} (L_{\Gamma} \cdot \omega \pm H) + 0,02 \cdot R \cdot g_{\text{к}} \cdot L_{\Gamma} \cdot \omega_{\text{е}}, \text{ кВт}, \quad (3)$$

где:  $L_{\Gamma}$  – горизонтальная проекция длины конвейера, м;

$H$  – высота подъема (+) или опускания (-) груза, м;

$\omega$  – коэффициент сопротивления перемещению груза;

$R=0,2$  – коэффициент, учитывающий характер перемещения винта;

$g_{\text{к}}$  – погонная масса вращающихся частей конвейера;  $g_{\text{к}}=80D$ , кг/м;

$\omega_{\text{е}}$  – коэффициент сопротивления движению вращающихся частей

конвейера: при подшипниках качения  $\omega_{\epsilon} = 0,01$ , скольжения  $\omega_{\epsilon} = 0,16$ .

Осевая скорость движения перемещаемой водно-зерновой смеси  $v$  определяется выражением:

$$v = S \cdot n, \text{ м/с}, \quad (4)$$

где:  $S$  – шаг винта, м выбирается по таблице 3, для хорошо сыпучих материалов из первого ряда, а для других из второго.

Мощность двигателя для привода шнекового конвейера определяется по формуле:

$$N = \frac{K \cdot N_0}{\eta}, \text{ кВт}, \quad (5)$$

где:  $K$  – коэффициент запаса мощности;

$\eta$  – КПД привода (0,6-0,85).

Насыпная плотность, исходя из пропорционального соотношения воды и зерна 1 к 1, определялась по выражению:

$$\rho_n = (\rho_v + \rho_z) / 2 = (1000 + 800) / 2 = 900 \text{ кг/м}^3, \quad (6)$$

где:  $\rho_v$  – плотность воды,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\rho_z$  – плотность зерна,  $\text{кг/м}^3$ .

Далее из стандартного ряда по таблице 3 выбран диаметр и шаг шнека, соответственно равные  $D = 400$  мм и  $S = 320$  мм и рассчитана частота вращения вала шнека:

$$n = 2 \cdot L_{\text{ш}}/S = 2 \cdot 1100/320 = 7 \text{ мин}^{-1} \quad (7)$$

Частота вращения выбрана допустимая и в последующем уточняется производительность шнека:

$$Q = \frac{E \cdot n \cdot \varphi \cdot \rho_{\text{н}} \cdot R_{\text{в}} \cdot D}{0,275}, \text{ кг.} \quad (8)$$

Таким образом, выход очищенного зерна составит  $3,75/1,5=2,5$  т/ч.

Мощность на валу винта определяется по формуле:

$$N_0 = \frac{Q}{367} (L_{\Gamma} \cdot \omega \pm H) + 0,02 \cdot R \cdot g_K \cdot L_{\Gamma} \cdot \omega_e = \frac{3,351}{367} \cdot (1,1 \cdot 1,2 + 0) + 0,02 \cdot 0,2 \cdot 32 \cdot 1 \cdot 0,16 = 0,0109 + 0,8273 = 0,8382 \text{ кВт.} \quad (9)$$

$$\text{где: } L_{\Gamma} = 1,11 \text{ м; } H = 0 \text{ м; } \omega = 1,2; R = 0,2; g_K = 80 \cdot 0,4 = 32 \text{ кг/м; } \omega_e = 0,16. \quad (10)$$

Определение осевой скорости перемещаемой водно-зерновой смеси осуществлялось по выражению:

$$v = S \cdot n = 0,25 \cdot 8 = 2 \text{ м/мин} = 0,0333 \text{ м/с.} \quad (11)$$

Мощность двигателя определялась формулой:

$$N = \frac{K \cdot N_0}{\eta} = \frac{1,25 \cdot 0,8382}{0,85} = 1,233 \text{ кВт.} \quad (12)$$

Исходя из проведённых расчётов основными конструктивными параметрами приняты:

- производительность установки – 45 т/12 часов (3,75 т/ч);
- выход обработанного зерна – 30 т/12 часов (2,5 т/ч);

- винт - однозаходный;
- число подшипниковых опор – 2 концевые;
- тип подшипников – подшипники скольжения;
- длина установки – 1,1 м;
- угол наклона –  $0^\circ$ ;
- диаметр винта – 400 мм;
- шаг винта – 320 мм;
- частота вращения винта –  $7 \text{ мин}^{-1}$ ;
- осевая скорость движения зерна –  $0,0333 \text{ м/с}$ ;
- высота подъема – 0 м;
- мощность на валу винта – 0,838 кВт;
- мощность приводного двигателя – 1,5 кВт;
- режим работы конвейера – 12 часовая смена

На основании проведенных конструктивных расчетов установлены основные параметры установки для ультразвуковой обработки зерна при его подготовке к помолу.

## Приложение Б

### Расчет остаточной загрязненности оболочки зерна

Размеры площадей взяты с микрофотографий бороздки и бороздки зерна пшеницы, так как при визуальном осмотре на поверхности зерна загрязнений зафиксировать не удалось. Площади загрязнений вычислены в программе компас V9 с соблюдением масштаба [151]. Установлено, что средняя площадь видимой частицы минерального загрязнения, рисунок 28, составляет 0,008434 мм<sup>2</sup>. Общая площадь загрязнений, находящихся на бороздке первого из рассматриваемых зёрен, рассчитана следующим образом:

$$S_{\text{об.б.}} = \sum_{i=1}^{53} S_i = 0,475 \text{ мм}^2, \quad (1)$$

где:  $S_i$ - площади поверхностей минеральных частиц на бороздке зерна.

Аналогично вычислена площадь примесей, находящихся в бороздке:

$$S_{\text{бор}} = \sum_{n=1}^{74} S_n = 0,7178 \text{ мм}^2, \quad (2)$$

где:  $S_n$  – площади минеральных частиц в бороздке.

Таким образом, площадь всех имеющихся загрязнений на зерне определяется по выражению:

$$S_{\text{об.}} = S_{\text{об.б.}} + S_{\text{бор.}} = 0,475 + 0,7178 = 1,1928 \text{ мм}^2. \quad (3)$$

Средняя площадь поверхностей загрязнений на зерне рассчитана по

следующему выражению:

$$S_{срр} = \sum_{p=1}^m S_p / 25, мм^2, \quad (4)$$

где:  $S_p$  – суммарные площади всех видимых загрязнений, мм<sup>2</sup>.

$S_{ср.р.} = 1,273 мм^2$ , что составляет 2,982-3,976% от площади всей поверхности зерна. Этот интервал возникает от отличий площадей поверхности исследуемых зёрен, находящихся в пределах 30-40мм<sup>2</sup>.

## Приложение В

Таблица 1 – Результаты физико-химических исследований зерна, подготовленного к простому помолу на обоечной машине без ГТО

№ п/п	Шифр образца	Суммарная площадь поверхностей загрязнений, мм <sup>2</sup>	Зола, %	Микротвердость эндосперма, кг/мм <sup>2</sup>	Влажность, %	Белок, %	Клейковина количество, %
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0,116108	1,7	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	1,8	14,3	12,7	12,3	26,2
37	9,1	0,014846	1,41	13,3	14,9	12,8	26,8
38	9,2	0,015382	1,5	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 Г

На основании принятой методики исследований суммарная площадь загрязнений проверялась по переменным параметрам, характеризующими в различной интерпретации:

- время озвучивания;
- температуру процесса;
- частоты ультразвука.

Результаты исследований сведены в таблицы 1,2 и 3.

Таблица 1 – Изменение суммарной площади загрязнений от переменных времени озвучивания и температуры процесса при постоянной частоте ультразвука, равной 18кГц

Время озвучивания зерна, сек.	Температура воды, °С			
	20	25	30	40
	Суммарная площадь загрязнений, мм <sup>2</sup>			
20	0.116108	0.107940	0.080198	0.076316
40	0.032531	0.024814	0.000000	0.000000
60	0.001293	0.000981	0.000000	0.000000
80	0.000116	0.000000	0.000000	0.000000

Таблица 2 – Изменение суммарной площади загрязнений от переменных времени озвучивания и частоты ультразвука при постоянной температуре процесса, равной 30°С

Время озвучивания зерна, сек.	Частота ультразвука, кГц			
	18,00	18,15	18,30	18,50
	Суммарная площадь загрязнений, мм <sup>2</sup>			
20	0.080198	0.095521	0.105607	0.126309
40	0.000000	0.015382	0.022846	0.042754
60	0.000000	0.000675	0.000541	0.002463
80	0.000000	0.000000	0.000000	0.001212

Таблица 3 – Изменение суммарной площади загрязнений от переменных температуры процесса и частоты ультразвука при постоянном времени озвучивания, равной 30 сек

Температура воды, °С	Частота ультразвука, кГц			
	18,00	18,15	18,30	18,50
	Суммарная площадь загрязнений, мм <sup>2</sup>			
20	0.075607	0.085521	0.105607	0.126309
25	0.014846	0.015382	0.022846	0.042754
30	0.000000	0.000675	0.000541	0.002463
40	0.000000	0.000000	0.000000	0.001212

## Приложение Д

На основании принятой методики исследований показатель зольности проверялся по переменным параметрам, характеризующимися в различной интерпретации:

- время озвучивания;
- температуру процесса;
- частоты ультразвука.

Результаты исследований сведены в таблицы 1,2 и 3.

Таблица 1 – Изменение зольности от переменных времени озвучивания и температуры процесса при постоянной частоте ультразвука, равной 18кГц

Время озвучивания зерна, сек.	Температура воды, °С			
	20	25	30	40
	Показатель зольности зерна, %			
20	1.71	1.62	1.50	1.32
40	1.61	1.50	1.27	1.12
60	1.56	1.48	1.23	1.10
80	1.50	1.42	1.19	1.05

Таблица 2 – Изменение зольности от переменных времени озвучивания и частоты ультразвука при постоянной температуре процесса, равной 30°С

Время озвучивания зерна, сек.	Частота ультразвука, кГц			
	18,00	18,15	18,30	18,50
	Показатель зольности зерна, %			
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 3 – Изменение зольности от переменных температуры процесса и частоты ультразвука при постоянном времени озвучивания, равной 30 сек

Температура воды, °С	Частота ультразвука, кГц			
	18,00	18,15	18,30	18,50
	Показатель зольности зерна, %			
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

## Приложение Е

На основании принятой методики исследований микротвердость эндосперма проверялась по переменным параметрам, характеризующимися в различной интерпретации:

- время озвучивания;
- температуру процесса;
- частоты ультразвука.

Результаты исследований сведены в таблицы 1,2 и 3.

Таблица 1 – Изменение микротвердости эндосперма от переменных времени озвучивания и температуры процесса при постоянной частоте ультразвука, равной 18кГц

Время озвучивания зерна, сек.	Температура воды, °С			
	20	25	30	40
	Микротвердость эндосперма, кг/мм <sup>2</sup>			
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 2 – Изменение микротвердости эндосперма от переменных времени озвучивания и частоты ультразвука при постоянной температуре процесса, равной 30°С

Время озвучивания зерна, сек.	Частота ультразвука, кГц			
	18,00	18,15	18,30	18,50
	Микротвердость эндосперма, кг/мм <sup>2</sup>			
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

Таблица 3 – Изменение микротвердости эндосперма от переменных температуры процесса и частоты ультразвука при постоянном времени озвучивания, равной 30 сек

Температура воды, °С	Частота ультразвука, кГц			
	18,00	18,15	18,30	18,50
	Микротвердость эндосперма, кг/мм <sup>2</sup>			
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

## Приложение Ж

На основании принятой методики исследований влажность зерна проверялась по переменным параметрам, характеризующимися в различной интерпретации:

- время озвучивания;
- температуру процесса;
- частоты ультразвука.

Результаты исследований сведены в таблицы 1,2 и 3.

Таблица 1 – Изменение влажности зерна от переменных времени озвучивания и температуры процесса при постоянной частоте ультразвука, равной 18кГц

Время озвучивания зерна, сек.	Температура воды, °С			
	20	25	30	40
	Показатель влажности зерна, %			
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 2 – Изменение влажности зерна от переменных времени озвучивания и частоты ультразвука при постоянной температуре процесса, равной 30°С

Время озвучивания зерна, сек.	Частота ультразвука, кГц			
	18,00	18,15	18,30	18,50
	Показатель влажности зерна, %			
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 3 – Изменение влажности зерна от переменных температуры процесса и частоты ультразвука при постоянном времени озвучивания, равной 30 сек

Температура воды, °С	Частота ультразвука, кГц			
	18,00	18,15	18,30	18,50
	Показатель влажности зерна, %			
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 3

На основании принятой методики исследований белки в зерне проверялись по переменным параметрам, характеризующимися в различной интерпретации:

- время озвучивания;
- температуру процесса;
- частоты ультразвука.

Результаты исследований сведены в таблицы 1,2 и 3.

Таблица 1 – Изменение содержания белка в зерне от переменных времени озвучивания и температуры процесса при постоянной частоте ультразвука, равной 18кГц

Время озвучивания зерна, сек.	Температура воды, °С			
	20	25	30	40
	Показатель содержания белка, %			
20	12.3	12.3	12.4	12.6
40	13.0	13.0	13.4	13.4
60	13.1	13.1	13.4	13.4
80	13.3	13.4	13.4	13.4

Таблица 2 – Изменение содержания белка в зерне от переменных времени озвучивания и частоты ультразвука при постоянной температуре процесса, равной 30°С

Время озвучивания зерна, сек.	Частота ультразвука, кГц			
	18,00	18,15	18,30	18,50
	Показатель содержания белка, %			
20	12.4	12.3	12.3	12.3
40	13.4	13.3	13.2	13.1
60	13.4	13.4	13.3	13.1
80	13.4	13.4	13.4	13.3

Таблица 3 – Изменение содержания белка в зерне от переменных температуры процесса и частоты ультразвука при постоянном времени озвучивания, равной 30 сек

Температура воды, °С	Частота ультразвука, кГц			
	18,00	18,15	18,30	18,50
	Показатель содержания белка, %			
20	12.7	12.6	12.5	12.3
25	12.8	12.7	12.6	12.5
30	13.3	13.1	13.0	12.9
40	13.3	13.3	13.2	13.0

## Приложение И

На основании принятой методики исследований клейковина в зерне проверялась по переменным параметрам, характеризующими в различной интерпретации:

- время озвучивания;
- температуру процесса;
- частоты ультразвука.

Результаты исследований сведены в таблицы 1,2 и 3.

Таблица 1 – Изменение содержания клейковины в зерне от переменных времени озвучивания и температуры процесса при постоянной частоте ультразвука, равной 18кГц

Время озвучивания зерна, сек.	Температура воды, °С			
	20	25	30	40
	Показатель содержания клейковины, %			
20	26.1	26.2	26.3	26.5
40	27.1	27.2	27.7	27.7
60	27.3	27.3	27.7	27.7
80	27.5	27.7	27.7	27.7

Таблица 2 – Изменение содержания клейковины в зерне от переменных времени озвучивания и частоты ультразвука при постоянной температуре процесса, равной 30°С

Время озвучивания зерна, сек.	Частота ультразвука, кГц			
	18,00	18,15	18,30	18,50
	Показатель содержания клейковины, %			
20	26.3	26.2	26.1	26.1
40	27.7	27.5	27.4	27.3
60	27.7	27.7	27.5	27.3
80	27.7	27.7	27.7	27.5

Таблица 3 – Изменение содержания клейковины в зерне от переменных температуры процесса и частоты ультразвука при постоянном времени озвучивания, равной 30 сек

Температура воды, °С	Частота ультразвука, кГц			
	18,00	18,15	18,30	18,50
	Показатель содержания клейковины, %			
20	26.7	26.5	26.4	26.2
25	26.8	26.7	26.6	26.4
30	27.5	27.3	27.2	27.0
40	27.6	27.5	27.4	27.2