

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Саратов 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова»

Научный руководитель: **Рудик Феликс Яковлевич**
доктор технических наук, профессор;

Официальные оппоненты: **Губейдуллин Харис Халеуллович**,
доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО
«Технологический институт–филиал ФГБОУ ВО
«Ульяновский государственный аграрный
университет имени П.А. Столыпина», директор
института

Медведев Павел Викторович,
доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО
«Оренбургский государственный университет»,
заведующий кафедрой «Технология пищевых
производств»

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

Защита диссертации состоится _____ в 12 00 часов на заседании диссертационного совета Д220.061.03 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» по адресу: 410056, г.Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ и на сайте www.sgay.ru.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 410012, г.Саратов, Театральная площадь, 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 220.061.03. e-mail: chekmarev.v@yandex.ru

Автореферат разослан _____ 2017

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. 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.

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 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 для подготовки зерна к помолу используется высокоэффективное импортное оборудование. Для мельниц малой производительности, а они перерабатывают в стране муку и крупы до 5 миллионов тонн зерна в год, в связи с высокой производительностью, длительностью и сложностью техпроцесса, они не приемлемы. Это ведет к производству обойной муки невысокого качества, так как применяются упрощенные технологии сухой очистки зерна при его подготовке к помолу.

Следовательно, задача повышения эффективности подготовки зерна к помолу путем совершенствования технологии и разработки нового высокопроизводительного оборудования актуальна и ее решение 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.. Вопросы механической очистки и мойки зерна при его подготовке к хранению и помолу рассмотрены в работах Н.Е. Авдеева, В.И. Оробинского, В.Г. Артемьева, Г.Д. Кавецкого, Х.Х. Губейдулина 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.. Опираясь на исследования практического использования ультразвука при обработке сельскохозяйственного сырья В.Н. Хмелева, Г. Флина, В.Б. Акопяна, Ф.Я. Рудика в работе представлен материал по эффективной и высокопроизводительной очистке и отволаживанию зерна при его подготовке к помолу.

Цель работы. Повышение эффективности подготовки зерна к помолу с ультразвуковой интенсификацией процесса и обоснование 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:

- 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.

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 на реальных образцах зерна, обработанного на действующей макетной оснастке в лабораторных и реальных 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы степень ее разработанности, установлены цель и задачи исследований, аргументированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены научные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе **«Состояние вопроса и задачи исследования»** систематизированы литературные и патентные данные о современном состоянии теории, техники и технологии подготовки зерна к помолу. Рассмотрены и установлены особенности процессов очистки и увлажнения зерна, технологии и конструкции оборудования для этих целей и тенденции их совершенствования путем интенсификации кинетических, тепло- и массообменных процессов ультразвуковой обработкой. Обосновано использование нелинейных ультразвуковых явлений, создающих акустические силы и течения микропотоков вблизи омываемого объекта с выносом измельченных загрязнителей и микронасекомых в жидкость и ускорением проницаемости жидкости в зерно для его увлажнения.

Во втором разделе **«Теоретическое обоснование основных конструктивных параметров и режимов обработки в установке для очистки и отволаживания зерна в ультразвуковом поле»** установлена необходимость более тщательной подготовки зерна, прошедшего предварительную очистку к помолу. В случае простого помола требования к подготовке зерна в обоечной машине 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. Существующие технологии сухой обработки зерна в обоечной машине и холодное кондиционирование не обеспечивают установленные нормативные показатели зольности, влажности, микротвердости эндосперма и клейковины, а также существенно повышают длительность процесса и площади участка. По этой причине подготовка зерна к простому помолу не дает возможности получать обойную муку высокого качества.

В рассматриваемой работе для повышения эффективности подготовки зерна к помолу в среде ультразвука исследованы процессные явления очистки оболочки и увлажнения зерна в ультразвуковой установке с оптимальными режимными характеристиками. Теоретически это

обосновывалось на кавитационном захлопывании паровоздушной полости, расщепляющей молекулы воды на валентно ненасыщенные реакционноактивные H^+ и OH^- радикалы:

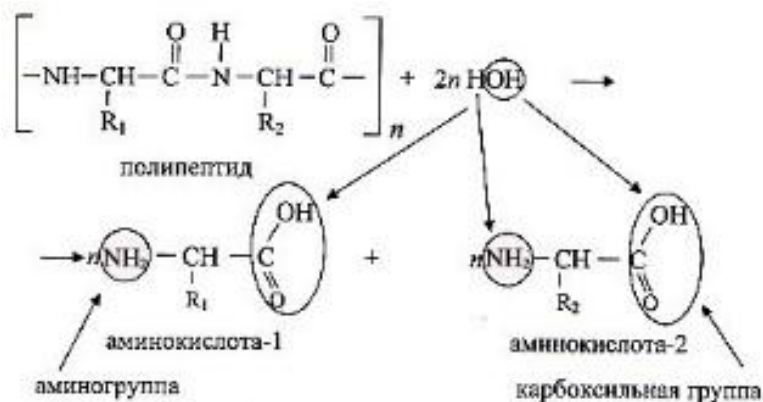


Рисунок 1 - Реакция гидролиза белков

Время жизни этих радикалов $10^{-2}-10^{-4}$ с. При этом ионы водорода проникают сквозь оболочку алейроновый слой и эндосперм, чем способствуют

Время жизни этих радикалов $10^{-2}-10^{-4}$ с. При этом ионы водорода проникают сквозь оболочку в алейроновый слой и

эндосперм, чем способствуют понижению прочности обрабатываемого вещества. Появление в воде свободных гидроксильных радикалов R_1 и R_2 должно интенсифицировать процесс отволаживания зерна из-за стремления перехода свободных отрицательно заряженных гидроксильных групп к нейтральному состоянию. Из реакции гидролиза белков видно (рисунок 1), что гидроксильная группа из молекулы воды присоединяется к полипептиду разрывая его на аминокислоты с образованием в них карбоксильной группы $COOH$. Высвобождающиеся при этом ионы водорода соединяются с азотом и создают аминную группу NH_2 . 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 мин, время же самой реакции незначительно и составляет 15-30 с. Из этого следует, что при воздействии на воду микропотоков, образованных ультразвуковой средой, возможно сокращение времени разделения ее молекулы на гидроксильную группу и ион водорода. Это позволит сократить время, необходимое на реструктуризацию и рекомбинацию молекул воды.

Для обоснования конструкции установки исследовалась потенциальная энергия ультразвуковых колебаний, порождающих кавитационные полости:

$$E = \frac{4}{3} \pi R_{\text{макс}}^3 \cdot P_{\text{вн}}, \text{ Дж}, \quad (2)$$

где: $R_{\text{макс}}$ – максимальный радиус кавитационной полости, м; $P_{\text{вн}}$ – внутреннее давление в жидкости, действующее на полость, Па.

$$P_{\text{вн}} = P_{\text{зв}} \sin \omega + P_{\text{ст}}, \text{ Па}, \quad (3)$$

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

Учитывая, что максимальный радиус кавитационной полости зависит от частоты УЗ и плотности жидкости ρ

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

и основываясь на образовании множества кавитационных полостей n , установлена зависимость изменения кавитационных полостей от значения n_1 с частотой f_1 до n_2 с частотой f_2 в объеме жидкости установки:

$$\frac{4}{3} \pi \cdot \left[\frac{0,4}{f_1} \left(1 - \frac{P_{\text{сн}}}{P_{\text{зв}}}\right) \sqrt{\frac{P_{\text{зв}}}{\rho}} \right]^3 \cdot P_{\text{вн}} \cdot n_1 = \frac{4}{3} \pi \cdot \left[\frac{0,4}{f_2} \left(1 - \frac{P_{\text{сн}}}{P_{\text{зв}}}\right) \sqrt{\frac{P_{\text{зв}}}{\rho}} \right]^3 \cdot P_{\text{вн}} n_2; \quad (5)$$

Отсюда следует, что:

$$\left(\frac{0,4}{f_1}\right)^3 \cdot n_1 = \left(\frac{0,4}{f_2}\right)^3 \cdot n_2; \quad n_2 = n_1 \cdot (f_2/f_1)^3. \quad (6)$$

Приведенное свидетельствует о том, что количество кавитационных полостей меняется в кубической степени и зависит от изменения частоты ультразвуковых колебаний.

При очистке и отволаживании зерна следует учитывать то, что при температуре от 50 °С и выше происходит денатурация белка. В этой связи даже кратковременный нагрев увлажненного зерна выше 50°С недопустим. В свою очередь, интенсивность влагопереноса в зерне резко возрастает в температурном интервале от 20 до 40°С.

Характер распространения и зависимость интенсивности ультразвукового поля от расстояния ультразвукового источника до обрабатываемого зерна, рассмотрен на схеме, приведенной на рисунке 2.

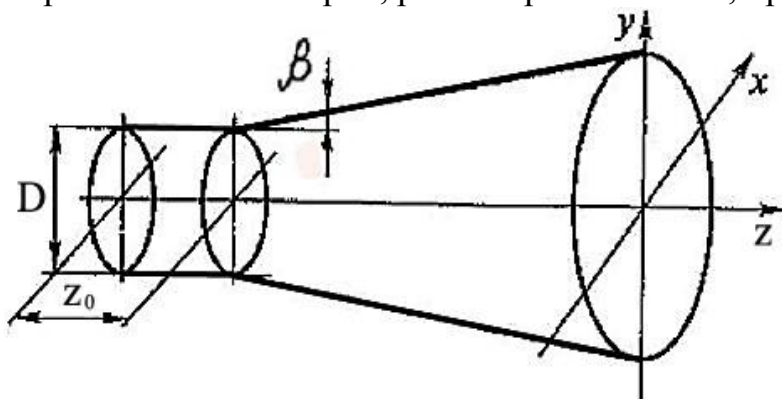


Рисунок 2 - Схема интенсивности распространения УЗ колебаний от источника

Теоретически ультразвуковое поле сосредоточено в цилиндрическом объеме диаметром D и длиной z_0 . Интенсивность ультразвука в данном объеме не убывает. После прохождения расстояния z_0 интенсивность ультразвуковых излучений конусообразно расширяется и уменьшается по

закономерности, связанной с длиной волны λ :

$$z_0 = D/4\lambda, \text{ м.} \quad (7)$$

Длина волны устанавливалась частным от скорости звука в воде на частоту ультразвукового поля. Направление распространения УЗ колебаний определялось выражением:

$$\sin\beta = \frac{A \cdot \lambda}{D}, \quad (8)$$

где: A – амплитуда колебаний, по рекомендациям принята = 1,22м.

Интенсивность ультразвуковых волн в жидких средах зависит от коэффициента поглощения a и пропорциональна вязкости η и квадрату частоты колебаний f на плотность ρ и скорость звука c в воде:

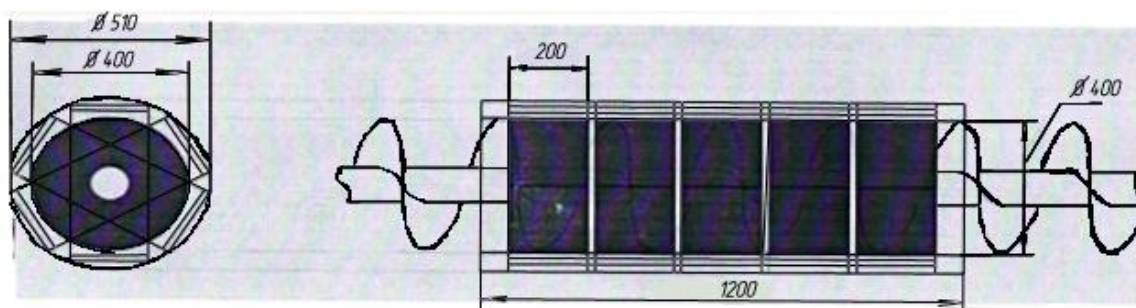
$$a = \frac{2\eta \cdot f^2}{3 \cdot \rho \cdot c^3} \quad (9)$$

Следовательно, интенсивность ультразвука уменьшается при удалении от источника согласно уравнению:

$$I = I_0 e^{-2a \cdot x}, \quad (10)$$

где: I_0 – интенсивность ультразвука вблизи источника; e – число Непера; x – расстояние от границы рассеивания поля.

В этой связи в расчетах конструктивных параметров установки использовано расстояние в 0,6-0,7 м от источника ультразвука. Учитывая, что в воде кумулятивные ультразвуковые колебания с частотой 18 кГц, созданные источником диаметром 0,2 м, сохраняют свою интенсивность на расстоянии 0,6-0,7 м от источника, принято равномерное расположение пяти ультразвуковых преобразователей по периметру окружности с радиусом 0,2 м для покрытия части площади круга конструкции установки. Обосновывается это тем, что длина хорды при делении окружности диаметром 0,2 м на шесть



■ - область действия ультразвукового поля в установке

Рисунок 3 - Схема расположения ультразвуковых преобразователей в емкости установки

частей равна 0,209 м, соответственно зона покрытия ультразвуковым полем от каждого источника диаметром 0,2 м составит 99% от площади всего круга. От количества преобразователей вдоль камеры озвучивания зависит производительность установки, рисунок 3. Исходя из принятой схемы камера озвучивания имеет форму цилиндра, его объем и длина определяются выражениями:

$$V_k = \frac{\pi}{4} D_k^2 \cdot L, \text{ м}^3, \quad (11)$$

где: D_k – диаметр камеры, м; L – длина камеры озвучивания, м.

$$L = R_n \cdot n + S_n \cdot n, \text{ м}, \quad (12)$$

где: R_n – радиус ультразвукового источника, м; n – количество рядов источников вдоль камеры озвучивания, шт; S_n – расстояние между рядами преобразователей, м.

Исходя из конструктивных размеров определена производительность установки:

$$Q = \frac{E \cdot N \cdot \varphi \cdot \rho_n \cdot R_\beta \cdot D}{0,275}, \text{ т/ч}, \quad (13)$$

где: Q – расчетная производительность установки, т/ч; E – отношение шага винта шнека к его диаметру; N – частота вращения винта, мин^{-1} ; ρ_n – насыпная плотность зерна, т/м^3 ; R_β – коэффициент снижения производительности от наклона конвейера; φ – коэффициент заполнения емкости; D – диаметр винта шнека, м.

Пропорциональность отношения воды и зерна, обеспечивающая проникновение микропотоков сквозь водно-зерновую смесь, суммируется с объемом воздушного пространства в общем объеме зерна с поглощенной влагой. В связи с этим введен коэффициент запаса кавитационной равномерности, характеризующий увеличение межзернового пространства.

Тогда объем свободного пространства в обрабатываемом зерне и его поглощающая способность представляются в виде:

$$V_{взс} = V_3 + (V_{мп} + V_{вп}) \cdot \Omega, \text{ м}^3, \quad (14)$$

где: V_3 – объем зерна, м^3 ; $V_{мп}$ – объем межзернового пространства, м^3 ; $V_{вп}$ – объем влаги, поглотившейся зерном, м^3 ; Ω – коэффициент запаса кавитационной равномерности.

$$V_{мп} = 0,8 \cdot V_3; \quad V_{вп} = (V_3 - 0,84) \cdot 0,5 = 0,01V_3. \quad (15)$$

Учитывая (15) объем водно-зерновой смеси определяется соотношением:

$$V_{взс} = V_3 + (0,8V_3 + 0,01V_3) \cdot \Omega = 1,215V_3, \text{ м}^3. \quad (16)$$

Тогда из (16) пропорциональное соотношение воды к зерну составит:

$$V_в = 1,215V_3, \text{ м}^3. \quad (17)$$

Следовательно и производительность установки в зерновой массе снизится на величину $Q_3 = Q/1,215$.

Данные конструктивных расчетов установки сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – 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, β , град.	30
2	Кавитационная область, $E_{об}$, 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, λ , м	0,083	12	Объем камеры озвучивания, V_k , м^3	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, α	$64 \cdot 10^3$	15	Производительность установки, Q , т/ч	2,5
8	Интенсивность УЗ волн, I , м/с	0,99	16	Потребляемая мощность, кВт	5

В третьем разделе «Программа и методика испытаний» приведена общая методика исследований. В ее основу положена логическая взаимосвязь, обеспечивающая возможность изучения влияния четырех таких режимных факторов как температура, частота ультразвуковых колебаний, интенсивность ультразвукового поля и время обработки на кондиционные показатели качества обработанного зерна. Качественные показатели технологии подготовки зерна к помолу на исследуемой ультразвуковой установке оценивались по установленным соответствующими ГОСТами показателям

зольности, влажности, содержания клейковины, микротвердости эндосперма и количества белка в зерне.

Минеральная загрязненность и зараженность оболочки зерна определялась разработанной частной методикой, основанной на микроаналитическом масштабируемом измерении микрофотографии зерна с 4 и 10 кратным увеличением при помощи электронного микроскопа, а площади загрязнений вычислялись в программе компас V9. Общая площадь загрязнений, видимых в микроскоп и находящихся на поверхности рассматриваемых зерен, рассчитывалась по выражению:

$$S_{\text{об}} = \sum_{i=1}^n S_i, \text{ мм}^2, \quad (18)$$

где: S_i – площадь i -х поверхностей частиц загрязнения, мм^2 ; i – количество частиц загрязнений, шт.

В четвертом разделе **«Конструкция установки для ультразвуковой очистки и отволаживания зерна и исследование рабочих режимных параметров»** на основе теоретических данных исследовались различные варианты лабораторного опытно-конструкторского оборудования. Начальные эксперименты велись на малогабаритной ультразвуковой установке с частотой в диапазоне 17-20 кГц и ёмкостью камеры озвучивания 196 см^3 .

Данными исследованиями установлены приблизительные режимные показатели в частотном интервале 18-19 кГц. Не менее важным являлось определение пропорции смеси зерна с водой в камере озвучивания.

Установлено оптимальное соотношение воды $V_{\text{в}}$ с зерном $V_{\text{з}}$ в пропорции $V_{\text{в}} = 1,215 V_{\text{з}}$.

На начальном этапе температура процесса устанавливалась в интервале $30\text{-}40^\circ\text{C}$. Испытаниями установлена необходимость постоянной сменяемости загрязнённой воды.

В следующей установке, снабжённой сливным краном, проверялось качество очистки в большем объёме озвучиваемой камеры, равном 490 см^3 . Установлено, что постоянная сменяемость воды ведёт к снижению её температуры, что замедляет интенсивность 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 поверхность очищаемого и отволаживаемого зерна акустическими микротечениями затруднено по причине его статичного состояния. Технически необходимо создание условий, когда зерно не слеживается и создаются условия для всестороннего омывания всей партии зёрен – это возможно путём создания постоянного взвешенного состояния. С этой целью при проведении экспериментальных исследований использовалась установка миксерного

типа. На основе лабораторных исследований установлено, что ультразвуковая установка для подготовки зерна к помолу должна состоять из следующих конструктивных элементов, рисунок 4, опробованных в опытно-конструкторской установке.

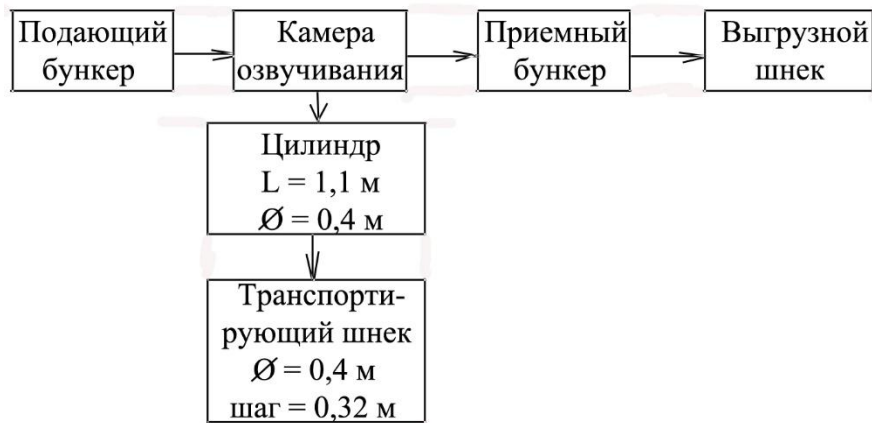


Рисунок 4 - Конструктивная схема для УЗ подготовки зерна к помолу

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 они 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 установленными параметрами озвучивания и регулируемой температурой процесса.

Исходя из вышесказанного разработана и опробована схема установки, представленная на рисунке 5.

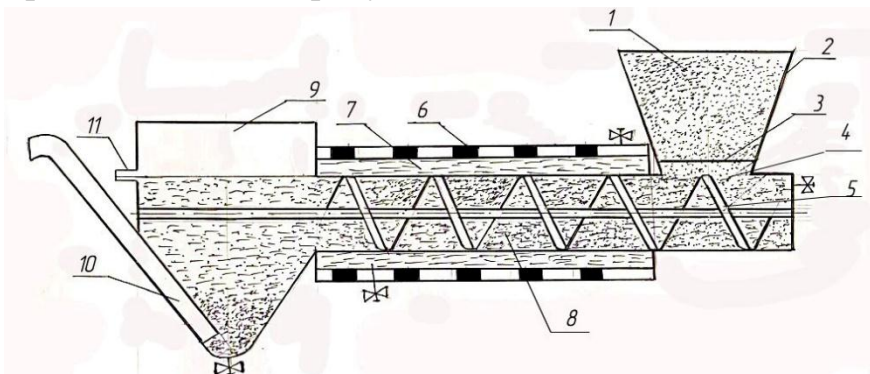


Рисунок 5 - Опытно-конструкторская установка для УЗ подготовки зерна

Зерно 1, подвергается обработке подается 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 шнеком 10 перемещается на следующие технологические операции. Легкая взвесь в зерне всплывает на поверхность выгрузного бункера и через полость 11 сливается в отстойник.



Рисунок 6 - Элемент загрязнения участка зерна (4X)

Загрязненность зерна наблюдается у всего исследуемого массива наблюдений,

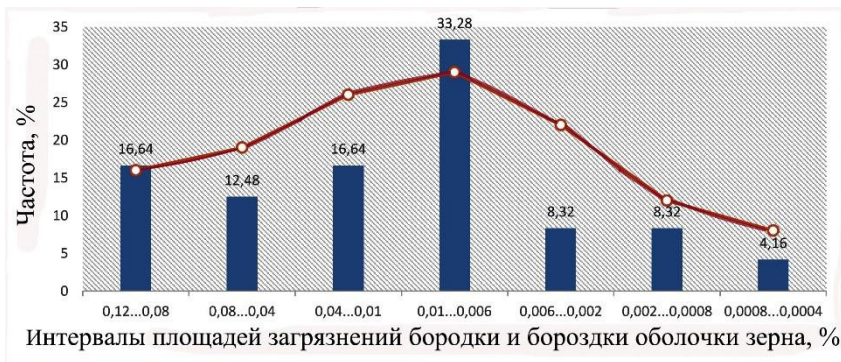


Рисунок 7 - Остаточная загрязненность зерна

на рисунках 8, 9 подтверждают целесообразность более тщательной очистки

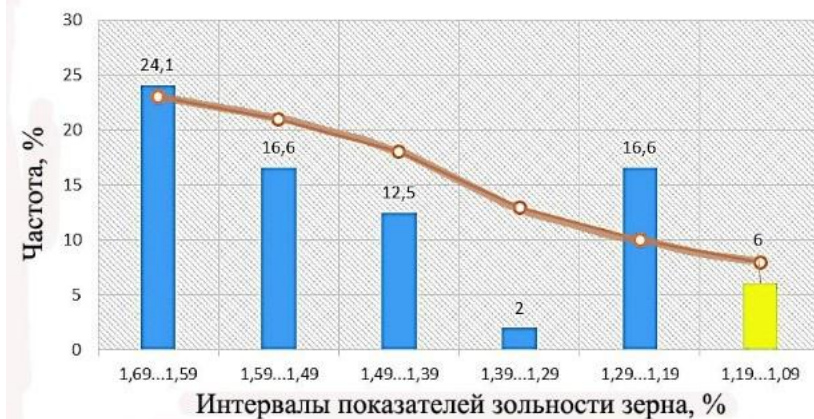


Рисунок 8 - Показатели зольности зерна

оболочки приходится 24,5% общего показателя зольности и, соответственно,

В соответствии с принятой методикой оценивались загрязненности, рисунок 6, не выводимые обычными способами. Исходя из результатов микроаналитического анализа следует, рисунок 8, что сверхнормативная остаточная загрязненность зерна наблюдается у всего исследуемого массива наблюдений, представленного в приложениях диссертации. Несомненно то, что это должно в последующем привести к повышению зольности зерна и, соответственно, ухудшению качества муки. Приведённые данные на рисунках 8, 9 подтверждают целесообразность более тщательной очистки зерна перед помолом. Высокая концентрация загрязнений и заражений при подготовке зерна в обойной машине ведёт к сверхнормативной зольности. Это объясняется тем, что в соответствии с биологическим распределением на долю

при некачественной её обработке большая часть загрязнений 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).

Для качественной подготовки зерна к помолу соблюдение оптимальных помольных показателей прочности имеет существенное значение. Это объясняется сопротивляемостью зерна измельчению. На рисунке 9 проглядываются три зоны прочностного состояния зерна. Первая зона



Рисунок 9 - Показатели прочностных свойств зерна

характеризуется повышенной микротвёрдостью – 31,2%, что ведёт к укрупнённой фракции муки, вторая зона пониженной микротвёрдостью – 37,4%, мука с плохо разрыхлённым эндоспермом и третья зона – 33,3% с приемлемыми показателями кондиции зерна.

Из рисунка 10 очевидно, что для существенного повышения качества

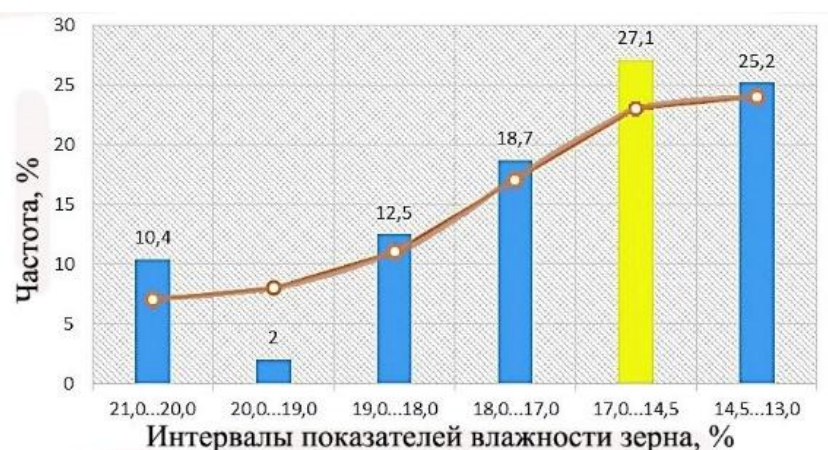


Рисунок 10 - Показатели влажности зерна

муки необходима более тщательная подготовка зерна к помолу. Экспериментально установлено, что кондиция зерна по параметру влажности без ГТО колеблется от 13,0% до 21,0%. Это обуславливает необходимость стабилизации процесса увлажнения с обеспечением нормируемого показателя влажности

14,5...17%.

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.

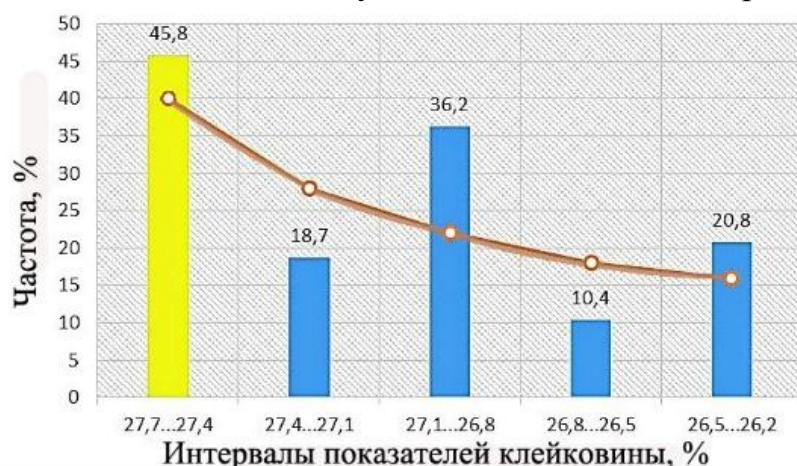


Рисунок 11 - Показатели клейковины зерна

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

Анализом состояния клейковины (рисунок 11) установлен идентичный для всех исследованных показателей неудовлетворительный процесс под-

готовки зерна к простому помолу, которое необходимо повысить и стабилизировать. 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; 40⁰С; частота ультразвука – 18; 18,15; 18,3; 18,5 кГц; время озвучивания – 20; 40; 60; 80 с.

Кондиционные параметры зерна исследовались по сорту «Саратовская 29» с показателями по традиционной очистке и увлажнения без ГТО: влажность 12,5%, зольность 1,9%, клейковина 24,5%, микротвердость 15кг/мм², белок 11,5%. Результаты исследований представлены на рисунке 12.

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

Рисунок 12 - Сравнительные оценочные показатели подготовленного к помолу зерна по принятой «1» и разработанной «2» технологиям

Исходя из результатов исследований установлены оптимальные режимные составляющие операций подготовки зерна к помолу в ультразвуковой установке: плотность мощности ультразвука $P_w = 1$ Вт/см²; интенсивность ультразвука $I = 0,99$ Вт/см²; длина ультразвуковой волны $\lambda = 0,083$ м; частота ультразвука $f = 18...18,3$ кГц; амплитуда ультразвуковых колебаний $A = 1,22$ м; температура водно-зерновой смеси $T = 40^0$ С; время обработки $t_{об} = 30...40$ с.

Данные, представленные на рисунке 12, 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.

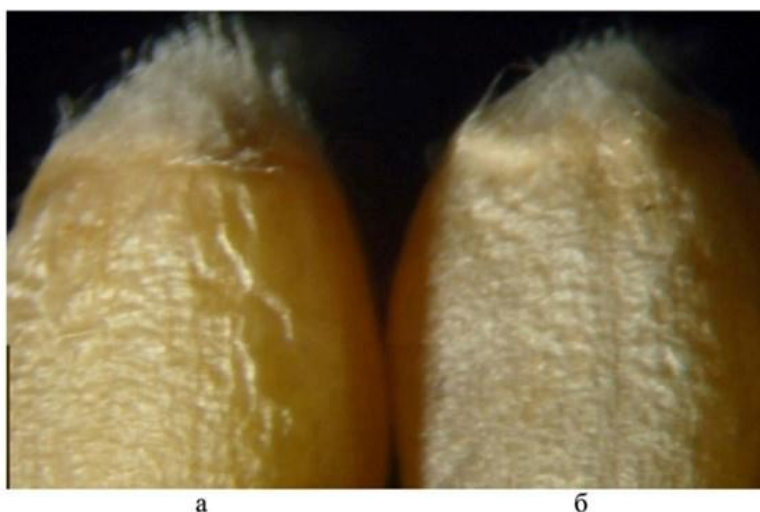


Рисунок 13 - Поверхность зерна (4х)
а - обработанное; б - необработанное

Зерно, обработанное в установленных режимных интервалах полностью соответствует нормативным требованиям. Установлено, рисунок 13, что удаление загрязнений и микронасекомых, а также разрыхление эндосперма и алейронового слоя протекает вследствие активации процесса влагопереноса. За счёт дейст-

вий анатомических частей зерна и энергии связи влаги ($10^3 \dots 10^4$ кДж/мол·м), образуется высокий градиент влажности, повышающий поверхностное напряженное состояние. При длительном воздействии избыточного давления эндосперм не выдерживает этого напряжения, что приводит к образованию микротрещин с диффузионным переносом воды в крахмалистую часть зерна. Первым признаком насыщения зерна водой является его набухание, рисунок 14, это и обеспечивает интенсификацию и стабильность процесса увлажнения. Установлено, что зерно после озвучивания не содержит в своей массе никаких примесей и теряет до 10% оболочки. 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 в гидрофильные. Это подтверждает ранее принятую гипотезу, что замедленный процесс диффузии в зерне можно интенсифицировать с использованием мощной акустической кавитации.



Рисунок 14 - Набухание зерна «а» и частично отделенная плодовая оболочка «б» зерна (4х)

При математическом моделировании процесса основывались на физическом смысле повышения влажности зерна, который 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, выраженной функцией:

$$y = a \cdot e^{-b \cdot t} + d, \quad (19)$$

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.

При определении коэффициентов b и t был использован метод наименьших квадратов и линеаризация уравнений при $a = e^c$:

$$\ln(y - d) = c - b \cdot t \quad \text{или} \quad \ln(y - d) - c = -b \cdot t. \quad (20)$$

Получены значения искоемых коэффициентов для математической модели по времени и температуре процесса соответственно $b = -0,0347$ и $b = -0,0299$. При заданных значениях влажности зерна $y = 17,5\%$ и температуры нагрева $y = 29,9^\circ\text{C}$ установлено, что для достижения максимального эффекта отволаживания 17-17,5% поверхностной влажности зерна с температурой процесса $29,9^\circ\text{C}$ необходимо его озвучивание в течение 25,5...30,7 с. В связи с тем, что температура процесса в стандартных условиях принята равной 30°C , а превышение поверхностной влажности до 17,5%, установлены следующие режимные параметры обработки: температура процесса 30°C ; временной интервал 25,5-30 с; частота ультразвуковых колебаний 18 кГц. Расчетами математических моделей по всем полученным экспериментальным данным установлены показатели озвученного зерна: суммарная площадь поверхностных загрязнений – 0,07-0,03мм²; зольность – 1,43-1,37%; влажность – 17-17,5%; клейковина – 27,1-27,5%; микротвердость эндосперма – 13,1-12,9 кг/мм²; содержание белка – 12,8-13,3%. Сходимость теоретических данных с экспериментальными составила 98%.

В пятом разделе «Технико-экономическая эффективность результатов исследований» представлены результаты основных технико-экономических показателей подготовки зерна к помолу на установке с ультразвуковой интенсификацией процесса. Обобщением сравнительных данных с применяемой технологией очистки зерна на обочной машине и холодного кондиционирования установлено, что при одинаковой производственной программе 9 тыс. тонн обеспечивается снижение общих затрат в 10 раз, годовой экономический эффект составит 423352 рубля при сроке окупаемости 1,06 года. Разработанная технология и технические средства обеспечивают получение стабильных нормативных показателей подготовки зерна к помолу.

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. Результатами 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°C; время обработки – 30 – 40 с; плотность мощности – 1 Вт/см²;

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 бороздки 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/мм²; 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.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

В изданиях рекомендуемых ВАК РФ:

1. Семилет, Н.А. Ультразвуковая обработка зерна при подготовке к помолу/Ф.Я. Рудик, Н.А. Моргунова, Л.Ю. Скрябина, Н.А. Семилет //Хранение и переработка сельхозсырья.-2016. -№ 2. -С.53-56.
2. Семилет, Н.А. 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.
3. Семилет, Н.А. Очистка и увлажнение зерна в ультразвуковом поле/Ф.Я. Рудик, А.А. Морозов, Н.А. Семилет//Научное обозрение.-2016. -№2. –С.22-29.

В других изданиях:

4. Семилет, Н.А. Возможности использования инфракрасного (ИК) излучателя в пищевой промышленности/Н.А. Семилет, Н.А. Моргунова, Н.Г. Капралова. – Саратов: ИЦ Наука, 2013. –С.266-269.
5. Семилет, Н.А. Выбор рационального ИК-излучателя для сушки зерна. /Н.А. Семилет, Н.А. Моргунова, Н.Г. Капралова. – Саратов: ИЦ Наука, 2013. – С.269-271.
6. Семилет, Н.А. Особенности технологий подготовки зерна к помолу/Н.А. Семилет//Материалы VIII Междун. науч.-пр. конф. «Безопасность и качество товаров». – Саратов: Саратовский ГАУ. 2014. – С.77-80.

7. Семилет, Н.А. Повышение эффективности распределения звуковых волн вибрацией при очистке жидких сред/Ф.Я. Рудик, Н.А. Семилет, А.С. Шильдяева, М.С. Тулиева//Материалы Междун. науч.-пр.конфер., посв. 20-летию специальности ТОП. – Саратов: ИЦ Наука. 2015. –С.193-197.
8. Семилет, Н.А. Особенности подготовки зерна к помолу/Ф.Я. Рудик, Н.Л. Моргунова, М.С. Марадудин, Н.А. Семилет//Материалы Междун. науч.-пр.конфер. «Актуальные проблемы ветер. мед. и пищевых технологий». ИЦ Наука. 2016. –С.137-142.
9. Семилет, Н.А. Способы гидродинамической обработки зерна/Ф.Я. Рудик, Н.Л. Моргунова, М.С. Марадудин, Н.А. Семилет//Материалы Междун. науч.-пр.конфер. «Актуальные проблемы ветер. мед. и пищевых технологий». ИЦ Наука. 2016. –С.150-154.