

САЛЫХОВ ДМИТРИЙ ВИКТОРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РОТОРНО-ЛОПАСТНОГО
ШЕЛУШЕНИЯ ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ**

Специальность 05.18.01 – Технология обработки, хранения и переработки
злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции
и виноградарства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет»

Научный руководитель доктор сельскохозяйственных наук, профессор
Невзоров Виктор Николаевич

Официальные оппоненты **Зверев Сергей Васильевич**
доктор технических наук, профессор,
Всероссийский научно-исследовательский
институт зерна и продуктов его переработки
филиал Федерального государственного
бюджетного научного учреждения
«Федеральный научный центр пищевых систем
им. В.М. Горбатова» РАН, руководитель отдела
технологии хранения и комплексной
переработки зерна

Анисимов Александр Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Саратовский государственный
аграрный университет имени Н.И. Вавилова»,
доцент кафедры «Технологии продуктов
питания»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Алтайский государственный
технический университет имени
И.И. Ползунова»

Защита состоится «27» сентября 2022 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 220.037.08 при ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет» по адресу: 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 90, тел./факс: +7(391)-227-36-09, e-mail: dissovet@kgau.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет» и на официальном сайте <http://www.kgau.ru>.

Автореферат разослан «15» июля 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Присухина
Наталья Викторовна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Перспективы развития технологий глубокой переработки зерна на современном этапе тесно связаны с совершенствованием технологических процессов шелушения зерна пшеницы, которое является основной технологической операцией при производстве зернового хлеба, круп, сортовой муки, диетических продуктов быстрого приготовления, комбикормов для животноводства. Технологическая операция шелушения на современном оборудовании предусматривает отделение наружных оболочек путем определенного воздействия абразивных рабочих органов машины на зерно, вызывающее в зерне такую деформацию, при которой наружные оболочки отделяются от эндосперма (мучнистое ядро) при определенном его повреждении и уменьшении в объемах с последующим удалением в отруби. Совершенствование технологии разделения продуктов шелушения на фракции по технологическим параметрам может осуществляться путем поэтапного выполнения рабочих операций по удалению плодовой и семенной оболочек, алейронового и субайлерованного слоев, зародыша и эндосперма с последующим сбором по фракциям на специально разработанном малогабаритном оборудовании, предназначенном для фермерских хозяйств и зерноперерабатывающих предприятий, что приобретает большое научно-практическое значение, требующее дальнейших исследований.

В последнее время российские и зарубежные специалисты зерноперерабатывающих производств уделяют повышенное внимание к разработкам технологии и оборудования для поэтапного шелушения зерна пшеницы с последовательным отделением фракций продуктов шелушения.

Работа проводилась в рамках плана научных исследований Красноярского ГАУ, плана на выполнение научно-исследовательских работ по заказу Минсельхоза России за счет средств федерального бюджета по теме №56 «Разработка энергосберегающих малоотходных технологий глубокой переработки зерна по производству модифицированных крахмалов» на 2016-2017 годы, и хозяйственного договора с ООО Новая ЭРА «Технология производства зернового хлеба с модернизацией оборудования для шелушения зерна пшеницы» № 17/20-13 от 14 марта 2016 г.

Степень разработанности темы. Многие исследователи, такие как Ю.Ф. Росляков, С.В. Зверев, А.Ю. Шаззо, Г.О. Магомедов, А.Л. Верещагин, А.В. Анисимов, Ф.Я. Рудик, В.А. Марьин, Е.Н. Гринберг, М.Е. Гринберг, Э.Г. Нуруллин, А.В. Дмитриев, Я.М. Жислин, Б.Н. Гойхенберг, А.Н. Остриков, В.Е. Семенов, А.Я. Тертель, В.В. Глебов и другие, занимались изучением процессов подготовки зерна к переработке и исследованиями по повышению качества шелушения. Выполненные исследования показали, что разнообразие и специфичность физико-механических свойств зерновых культур обуславливают необходимость разработки большого количества конструкций машин и технологических приемов для шелушения зерна. Известны технические предложения запатентованных новых машин, выполненные В.Н. Невзоровым, В.А. Самойловым, Л.В. Анисимовой, В.Н. Рябовым,

Д.Г.Федоровым, А.Н. Холодилиным, А.А.Перовым, В.И. Кузнецовым и другими. Тем не менее, разработка новой технологии с использованием роторно-лопастного способа шелушения потребовала провести новые исследования, так как было выявлено, что использование роторно-лопастного процесса поэтапного отделения наружных оболочек от эндосперма (мучнистое ядро) остается малоизученным и требует дальнейших исследований, что и позволило, сформулировать цель и задачи исследований.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является совершенствование технологии производства отдельных фракций зерна пшеницы на роторно-лопастном шелушителе для производства пищевых продуктов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ и систематизировать полученные данные по существующим технологиям шелушения зерна пшеницы, выявить их основные недостатки и обосновать целесообразность развития технологии поэтапного шелушения зерна;
- разработать технологию поэтапного шелушения и теоретически обосновать целесообразность использования роторно-лопастного устройства для совершенствования процесса шелушения зерна пшеницы;
- разработать новое технологическое оборудование для поэтапного шелушения зерна пшеницы и определить оптимальные конструкторско-технологические параметры и режимы его работы;
- исследовать процессы и разработать математическую модель взаимодействия зерна с рабочими органами роторно-лопастного шелушителя и определить основные технологические факторы, влияющие на поэтапный процесс шелушения зерна;
- исследовать технологию роторно-лопастного шелушения и определить технологические, энергетические и технико-экономические показатели.

Научная новизна работы

Научная новизна диссертационной работы подтверждается:

- проведенными исследованиями технологического процесса поэтапного шелушения зерна пшеницы с использованием нового технологического оборудования;
- математическими моделями, разработанными для технологического процесса поэтапного шелушения зерна пшеницы на оборудовании с роторно-лопастным рабочим органом;
- полученными математическими зависимостями выхода отдельных продуктов шелушения в зависимости от технологических параметров работы опытной экспериментальной установки;
- выявленными технологическими особенностями поэтапного процесса шелушения зерна пшеницы при использовании роторно-лопастного способа шелушения;
- разработанными конструкциями шелушительного технологического оборудования на уровне защиты авторских прав, новизна научно-технических

решений которых подтверждается полученными патентами на изобретение и полезную модель Российской Федерации № 2709719 и №141853.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы состоит в том, что:

- разработана математическая модель поэтапного шелушения зерна пшеницы на роторно-лопастной машине при оптимальных режимах работы;
- разработана конструкция новой роторно-лапастной шелушильной машины, позволяющая производить шелушение зерна пшеницы путем последовательного отделения от эндосперма (мучнистое ядро) плодовых и семенных оболочек, алейронового и субалейронового слоев и зародыша с наименьшими потерями от дробления зерна и минимальными затратами на выполнение технологического процесса;
- выполнены исследования влияния оптимальных технологических параметров работы роторно-лопастного шелушителя на качественные показатели процесса шелушения.

Практическая значимость диссертационной работы подтверждена полученными патентами РФ № 2709719 «Машины для шелушения зерна» и №141853 «Устройство для обработки поверхности зерен». Проведена опытно-промышленная апробация усовершенствованной технологии роторно-лопастного шелушения зерна пшеницы в производственных условиях мельничного комплекса ООО «Енисей» (Красноярский край, Минусинский район, село Селиваниха) и СПСОО «АГРОАРКТИКА» (Красноярский край, Минусинский район, город Минусинск).

Научные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс Института пищевых производств ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ по направлениям подготовки: 19.03.02 «Продукты питания из растительного сырья», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование, 35.03.07 «Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции» (уровень подготовки – бакалавриат) и 19.04.02 «Продукты питания из растительного сырья» (уровень подготовки – магистратура).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач диссертационной работы использованы теоретические исследования технологических процессов поэтапного шелушения зерна пшеницы на основе законов физико-механических и технологических процессов.

Результаты экспериментальных исследований получены с применением современных лабораторных методик на стандартных сертифицированных приборах и лабораторных установках с накоплением статистической информации и ее последующей обработкой с использованием современного программного обеспечения.

Для установления степени связи между переменными использовался критерий «хи – квадрат Пирсона».

Для анализа полученных результатов и сравнения с научными работами использовались опубликованные в открытой печати результаты исследований отечественных и зарубежных авторов.

Основные положения работы, выносимые на защиту

1. Результаты исследований технологических свойств зерна пшеницы, определяющих эффективность шелушения.
2. Разработанная технология поэтапного шелушения зерна пшеницы с использованием роторно-лопастного шелушителя с последовательным отделением и сбором полученных фракций продуктов шелушения.
3. Разработанная конструкция шелушительной машины с роторно-лопастным рабочим органом и проведены испытания поэтапного процесса шелушения зерна.
4. Математические зависимости влияния различных конструктивных параметров роторно-лопастного шелушителя и технологических параметров исходного сырья на производительность и энергоемкость процесса шелушения.
5. Результаты экспериментальных исследований качественных показателей поэтапного шелушения зерна и технико-экономическое обоснование применения роторно-лопастной машины.

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертация соответствует пункту 3 Паспорта специальности 05.18.01 «Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции и виноградарства».

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности результатов проведенных научных исследований подтверждается данными, полученными с использованием современных методов исследования, и их математической обработкой, а также опытно-промышленной апробацией новой технологии поэтапного шелушения зерна пшеницы.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и национальных научно-практических конференциях (Красноярск, 2013, 2015, 2016, 2020, 2021), (Москва, 2016), (Кемерово 2017),

Личное участие автора в получении результатов. Все научные результаты по совершенствованию технологии роторно-лопастного шелушения зерна пшеницы, составляющие основу диссертации, получены автором лично; программа исследования разработана совместно с научным руководителем – доктором сельскохозяйственных наук, профессором В.Н. Невзоровым, подбор и анализ литературных данных для обзорных статей подготовлен совместно с докторами технических наук, профессором В.Н. Холоповым и профессором Н.А. Величко, кандидатами технических наук, доцентами Е.Н. Кожухарь, Ж.А. Кох, Н.В. Присухиной. Моделирование технологического процесса роторно-лопастного шелушения зерна пшеницы выполнено совместно с докторами технических наук, профессором Ю.Ф. Росляковым, профессором Н.И. Чепелевым и профессором Н.И. Селивановым. Разработка и оформление конструкторской документации, оформление и подача заявок на изобретения в Роспатент подготовлены совместно с кандидатами технических наук, доцентами И.В. Мацкевичем, В.Н. Тепляшиным, В.А. Самойловым, А.И. Ярумом, М.А. Яновой, Д.А. Кохом, инженерами О.В. Фоминым,

Д.С. Безъязыковым, Н.А. Колесниковой и магистрами Р.В. Кавкиным, И.В. Марченко. Исследования физико-механических свойств зерна пшеницы выполнены совместно с доктором сельскохозяйственных наук, профессором Н.П. Братиловой, кандидатом технических наук В.В. Горло, инженером-исследователем А.А. Струковым.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 26 научных работ, в том числе 4 статьи в периодических изданиях, индексируемых в международных базах данных, 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 7 патентов РФ и 1 монография.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованных источников и приложений. Рукопись изложена на 132 страницах машинописного текста, включает 14 таблиц, 66 формул, 52 рисунка, 8 приложений на 22 страницах, список литературы содержит 155 источников.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость результатов работы, основные положения, представленные к защите.

В **первой главе «Состояние вопроса по совершенствованию технологии и оборудования для шелушения зерна пшеницы»** представлены результаты экспериментальных исследований технологических параметров строения зерна пшеницы для совершенствования технологии шелушения, приведены данные о современном состоянии технологий процесса шелушения зерна пшеницы на базе серийно выпускаемого оборудования, с анализом научных исследований по технологическому развитию процессов шелушения на перспективу. Изучены характеристики основных технологических режимов рабочих операций шелушения зерна пшеницы при механическом взаимодействии роторно-лопастного рабочего органа и зерна пшеницы, обеспечивающие в оболочках такую поэтапную деформацию, при которой они отделяются от мучнистого ядра без его повреждения и дробления.

Выполненные исследования современных технологий и конструкций шелушительных машин позволили определить пути совершенствования технологии поэтапного шелушения зерна пшеницы и разработки конструкций нового рабочего органа с применением роторно-лопастного способа.

Во **второй главе «Совершенствование технологии поэтапного шелушения зерна пшеницы»** по результатам исследования технологических свойств зерна пшеницы была разработана общая схема аналитической модели функционирования системы совершенствования технологических процессов поэтапного шелушения зерна пшеницы (рис.1).

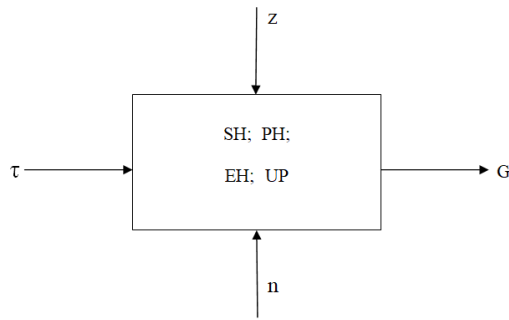


Рисунок 1 – Схема аналитической модели функционирования системы

В качестве общих управляющих показателей для комплекса технологических процессов шелушения выбраны длительность увлажнения зерна (τ , мин); величина зазора лопатки (z , мм); количество установленных лопаток (n , шт.). Другие показатели определены как управляемые. По ходу исследований выбранные управляемые показатели технологических процессов шелушения разделены на два класса: результатные и энергетические показатели. В качестве характерных показателей, определяющих обобщенный показатель комплекса процессов шелушения (G , усл.ед.), выбраны относительная масса шелушенных зерен (SH , %); продолжительность процессов шелушения (PH , с); энергетические затраты на процессы шелушения (EH , Вт·с); потребляемая мощность (UP , Вт).

Аналитические функции трех переменных, представлявшие технологические процессы (рис.1) определим в общем виде:

$$y(\tau, z, n) = G(\varphi(\tau), \psi(z), \chi(n)) \quad (1)$$

конкретизируем применением подстановок

$$x_1 \rightarrow \varphi(\tau), x_2 \rightarrow \psi(z), x_3 \rightarrow \chi(n) \quad (2)$$

к общей для всех процессов форме - полиномиальной функции трех переменных

$$\begin{aligned} G(x_1, x_2, x_3) = & b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + \\ & + b_{112} \cdot x_1^2 \cdot x_2 + b_{113} \cdot x_1^2 \cdot x_3 + b_{122} \cdot x_1 \cdot x_2^2 + b_{223} \cdot x_2^2 \cdot x_3 + b_{133} \cdot x_1 \cdot x_3^2 + b_{233} \cdot x_2 \cdot x_3^2 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + \\ & + b_{111} \cdot x_1^3 + b_{222} \cdot x_2^3 + b_{333} \cdot x_3^3 + b_{1123} \cdot x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{1223} \cdot x_1 \cdot x_2^2 \cdot x_3 + b_{1233} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3^2 \end{aligned} \quad (3)$$

а также выбором числовых коэффициентов: $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{112}, b_{113}, b_{122}, b_{223}, b_{133}, b_{233}, b_{123}, b_{111}, b_{222}, b_{333}, b_{1123}, b_{1223}, b_{1233}$.

Наличие (отсутствие) особенности исследуемого технологического процесса при начальных значениях управляющих показателей $\tau = 0, z = 0, n = 0$ определяет наличие (отсутствие) особой точки аналитической функции $y(\tau, z, n)$, представляющей данный процесс.

Так, особенность при $\tau = 0$ в точке $(0, 0, 0)$ соответствует подстановке $x_1 \rightarrow \tau^r$ (точка ветвления при некотором нецелом рациональном значении $r = \frac{p}{q}$). Особенность при $z = 0$ в точке $(0, 0, 0)$ соответствует подстановке

$x_2 \rightarrow \ln z$ (логарифмическая точка). Если имеется особенность при $n=0$ в точке $(0, 0, 0)$, то применяется подстановка $x_3 \rightarrow \ln n$ (логарифмическая точка).

Если отсутствует особенность при $\tau=0$, то применяем подстановку $x_1 \rightarrow \tau$ и аналогично поступаем, когда нет особенностей при $z=0$ и $n=0$, то есть применяем подстановки $x_2 \rightarrow z$ и $x_3 \rightarrow n$.

Формирование фракции шелушенных зерен (y , %) в зависимости от длительности увлажнения зерна (τ , мин), величины зазора лопатки (z , мм), количества установленных лопаток (n , шт.), представляется функцией:

$$y = G\left(\tau^{\frac{1}{5}}, \ln z, \ln n\right) = b_0 + b_1 \cdot \tau^{\frac{1}{5}} + b_2 \cdot \ln z + b_3 \cdot \ln n + b_{11} \cdot \tau^{\frac{2}{5}} + b_{22} \cdot \ln^2 z + b_{33} \cdot \ln^2 n + b_{12} \cdot \tau^{\frac{1}{5}} \cdot \ln z + b_{13} \cdot \tau^{\frac{1}{5}} \cdot \ln n + b_{23} \cdot \ln z \cdot \ln n +$$

$$+ b_{112} \cdot \tau^{\frac{2}{5}} \cdot \ln z + b_{113} \cdot \tau^{\frac{2}{5}} \cdot \ln n + b_{122} \cdot \tau^{\frac{1}{5}} \cdot \ln^2 z + b_{223} \cdot \ln^2 z \cdot \ln n + b_{133} \cdot \tau^{\frac{1}{5}} \cdot \ln^2 n + b_{233} \cdot \ln z \cdot \ln^2 n + b_{123} \cdot \tau^{\frac{1}{5}} \cdot \ln z \cdot \ln n +$$

$$+ b_{111} \cdot \tau^{\frac{3}{5}} + b_{222} \cdot \ln^3(z) + b_{333} \cdot \ln^3 n + b_{1123} \cdot \tau^{\frac{2}{5}} \cdot \ln z \cdot \ln n + b_{1223} \cdot \tau^{\frac{1}{5}} \cdot \ln^2 z \cdot \ln n + b_{1233} \cdot \tau^{\frac{1}{5}} \cdot \ln z \cdot \ln^2 n.$$

Формирование фракции нешелушенных зерен (y , %) в зависимости от длительности увлажнения зерна (τ , мин), величины зазора лопатки (z , мм), количества установленных лопаток (n , шт.), представляется функцией:

$$y = G\left(\tau^{\frac{1}{2}}, z, \ln n\right) = b_0 + b_1 \cdot \tau^{\frac{1}{2}} + b_2 \cdot z + b_3 \cdot \ln n + b_{11} \cdot \tau + b_{22} \cdot z^2 + b_{33} \cdot \ln^2 n + b_{12} \cdot \tau^{\frac{1}{2}} \cdot z + b_{13} \cdot \tau^{\frac{1}{2}} \cdot \ln n + b_{23} \cdot z \cdot \ln n +$$

$$+ b_{112} \cdot \tau \cdot z + b_{113} \cdot \tau \cdot \ln n + b_{122} \cdot \tau^{\frac{1}{2}} \cdot z^2 + b_{223} \cdot z^2 \cdot \ln n + b_{133} \cdot \tau^{\frac{1}{2}} \cdot \ln^2 n + b_{233} \cdot z \cdot \ln^2 n + b_{123} \cdot \tau^{\frac{1}{2}} \cdot z \cdot \ln n +$$

$$+ b_{111} \cdot \tau^{\frac{3}{2}} + b_{222} \cdot z^3 + b_{333} \cdot \ln^3 n + b_{1123} \cdot \tau \cdot z \cdot \ln n + b_{1223} \cdot \tau^{\frac{1}{2}} \cdot z^2 \cdot \ln n + b_{1233} \cdot \tau^{\frac{1}{2}} \cdot z \cdot \ln^2 n. \quad (5)$$

На основании теоретических исследований для обеспечения интенсификации технологических процессов шелушения зерна был разработан новый роторно-лопастной способ воздействия рабочего органа на зерно при шелушении.

Рабочая схема узла роторно-лопастного шелушителя приведена на рисунке 2.

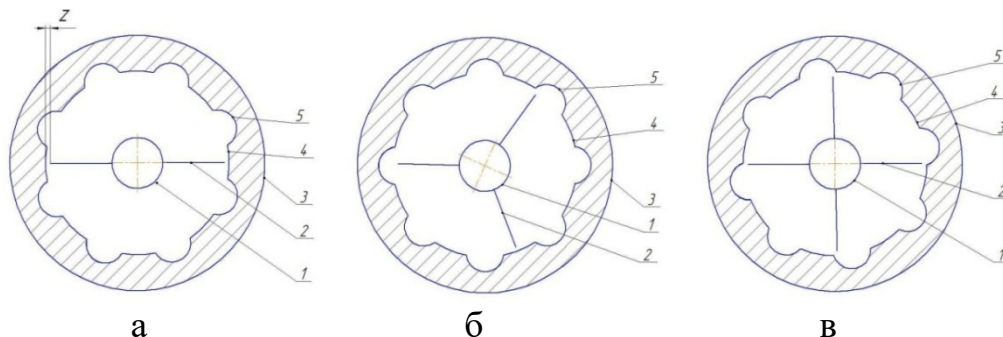


Рисунок 2 – Рабочая схема узла шелушения:

а – двухлопастной ротор; б – трехлопастной ротор, в – четырехлопастной ротор; z – рабочий зазор между лопастью и шелушильным барабаном; 1 – вал ротора; 2 – шелушильная лопасть; 3 – шелушильный барабан; 4 – сектор; 5 – канавка

Выбор эффективных технологических, конструктивных и режимных параметров эксплуатации новой установки — это обоснование числовых значений одноименных управляющих, результатных, энергетических показателей технологических процессов, соответствующих оптимуму по интегральному критерию эффективности.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» представлена общая схема проведения теоретических и экспериментальных исследований (рис. 3).

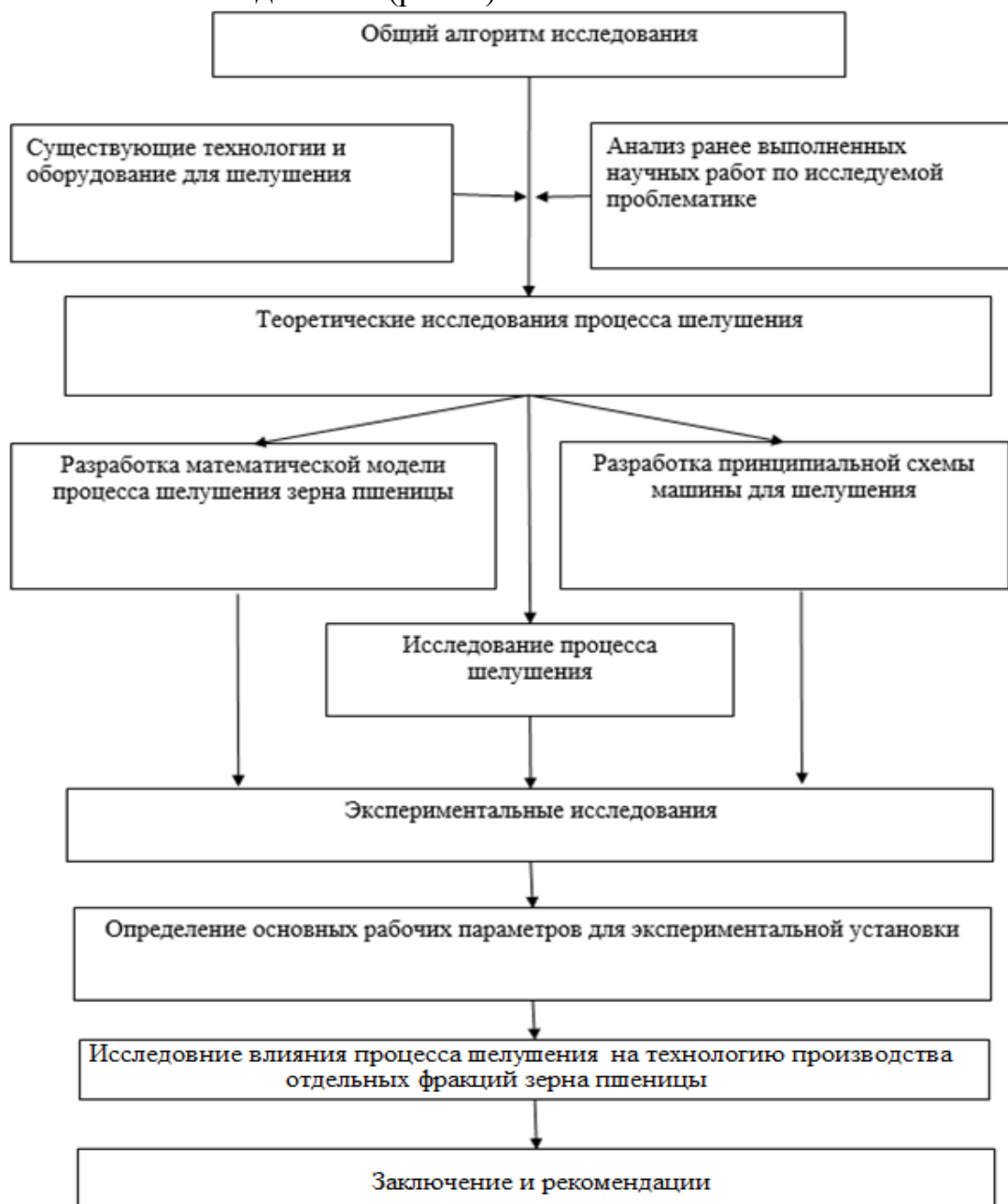


Рисунок 3 – Общий алгоритм исследований

Для проведения исследований по представленному алгоритму на рисунке 3 была разработана и изготовлена экспериментальная установка, защищенная патентами Российской Федерации №2709719 «Машина для шелушения зерна» и №141853 «Устройство для обработки поверхности зерен». Для изготовления

опытной экспериментальной установки разработана кинематическая схема конструкции роторно-лопастного шелушителя, которая приведена на рисунке 4.

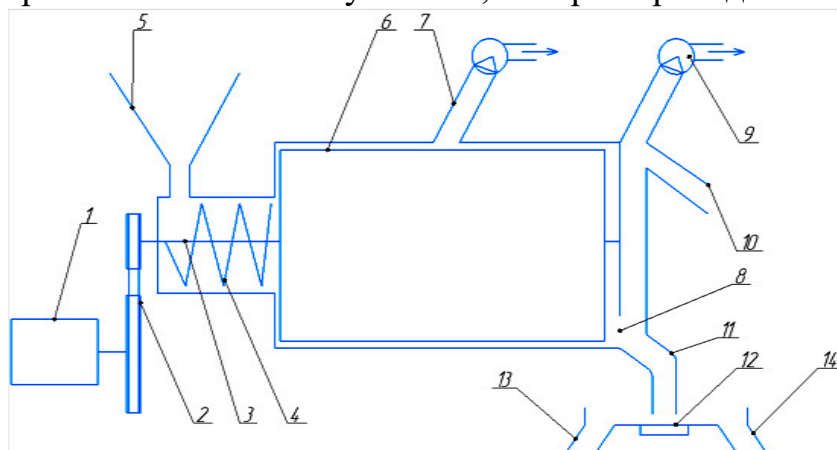


Рисунок 4 – Кинематическая схема роторно-лопастного шелушителя

Устройство для совершенствования технологии поэтапного удаления поверхностных слоев зерна пшеницы при шелушении работает следующим образом. Включается электродвигатель 1 и с помощью клиноременной передачи 2 передает крутящий момент на вал 3, на котором установлен шнек 4, перемещающий зерно, поступающее из бункера 5 в камеру шелушения 6. В камере шелушения 6 происходит поэтапное удаление оболочек, через патрубок 7, далее через отверстие 8 происходит выход из камеры продуктов шелушения, отделение шелушенного зерна (эндосперма) и нешелушенного зерна, которое выходит через патрубок 11, и отделение алейронового, субалейронового слоев и зародыша с последующим разделением на фракцию, алейроновый и субалейроновый слои уходят в патрубок 9 и зародыш в патрубок 10. Шелушенное зерно (эндосперм) и нешелушенное зерно попадают на вибростол 12, где происходит разделение на шелушенное зерно (эндосперм) патрубок 13 и нешелушенное зерно патрубок 14.

Для исследований технологического процесса поэтапного шелушения зерна пшеницы была изготовлена экспериментальная роторно-лопастная шелушильная машина, общий вид которой приведён на рисунке 5.

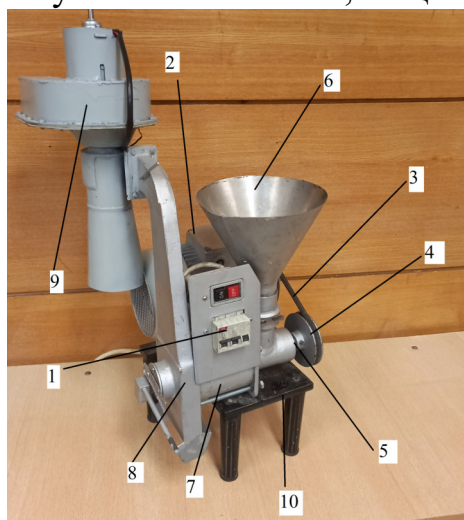


Рисунок 5 – Общий вид экспериментальной роторно-лопастной установки

1 – Кнопочный пост управления; 2 – электродвигатель; 3 – клиноременная передача; 4 – шкив; 5 – вал; 6 – бункер; 7 – камера шелушения; 8 – патрубок выхода продуктов шелушения; 9 – воздушный сепаратор; 10 – рама

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» для определения оптимального параметра величины зазора между ротором и корпусом шелушильной машины получены математические зависимости по толщине плодовой и семенной оболочек, алейронового и субалейронового слоя, диаметру зародыша и диаметру зерна, представленные на рисунке 6.

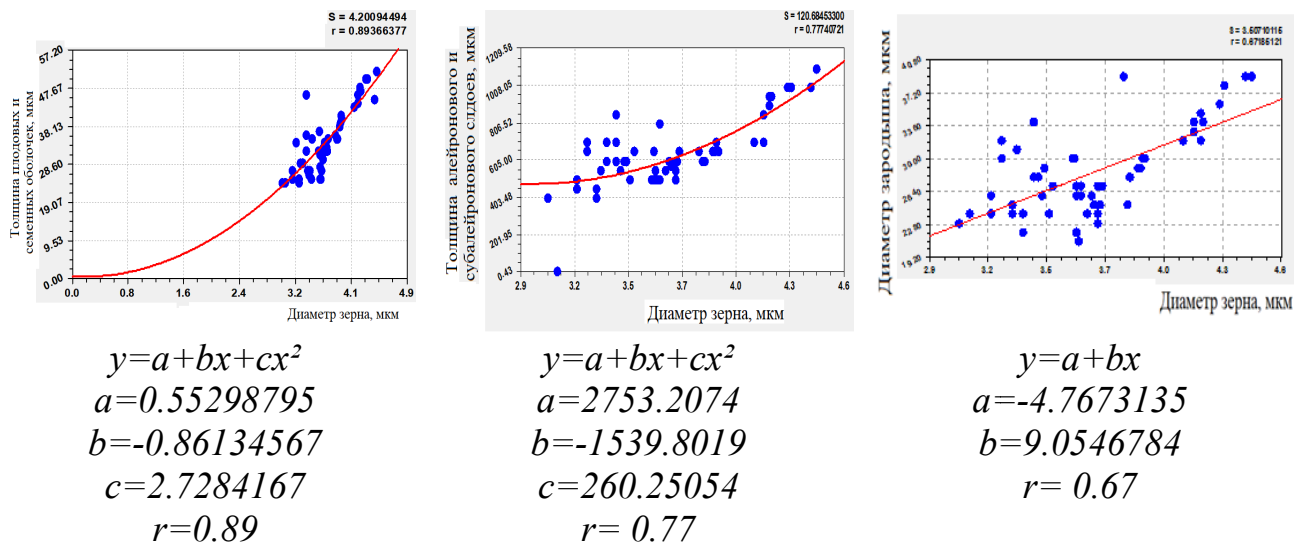


Рисунок 6 – Математические зависимости технологических параметров

Для определения технологических параметров конструкции шелушильной машины получены экспериментальные данные, обработанные по нормальному закону распределения, результаты представлены на рисунке 7.

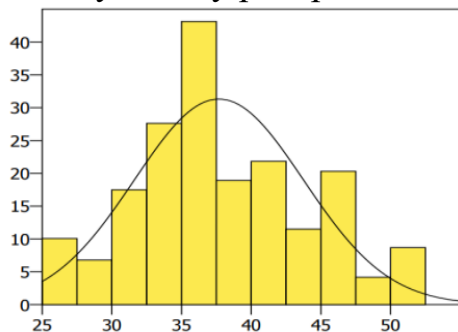


Рисунок 7 – Нормальный закон распределения по толщине плодовых и семенных оболочек зерна, мм

$$f(t_1) = \frac{1}{37,7\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_1 - 37,7)^2}{2 \cdot 37,7^2}}$$

где t_i – текущее значение параметра в статистическом ряду;
 δ – среднее квадратичное отклонение случайной величины – 37,7

Результаты экспериментальных исследований процесса шелушения зерна пшеницы на разработанной шелушильной машине, приведенные в таблице 1, были подвержены математической обработке на основе формирования технологических фракций (y , %) в зависимости от длительности увлажнения зерна (τ , мин), величины зазора лопатки (z , мм), количества установленных лопаток (n , шт.).

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований

№ опыта	Уровень входного параметра			Значение выходного параметра								
	x_1	x_2	x_3	Влажность зерна, %	Масса нешелушенных зерен, %	Масса шелушенных зерен, %	Масса крупных >1,7, %	Масса ≤1,7 >1,0, %	Масса шелухи 1, %	Масса шелухи 2, %	Длительность шелушения, с	Энергоемкость, Вт/с
1	-1	-1	-1	5,5	5,015	0	30,330	48,501	6,600	9,554	5,00	41,6
2	0	-1	-1	16,0	0	17	4,977	68,559	0	5,746	8,56	71,0
3	1	-1	-1	18,5	0	18	9,813	63,353	8,834	0	7,12	59,1
....	...	...	...									
....	...	...	...									
27	1	1	1	18,5	58	20	17,567	4,088	0,197	0,148	8,40	69,7

По полученным экспериментальным данным построены поверхности отклика для определения среднего значения массы шелушенных зерен (рис. 8-10).

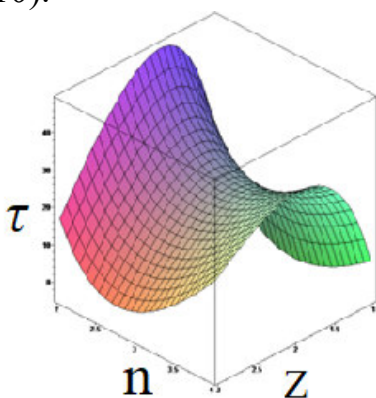


Рисунок 8 – Среднее значение массы шелушенных зерен по длительности увлажнения в зависимости от величины зазора и количества лопастей

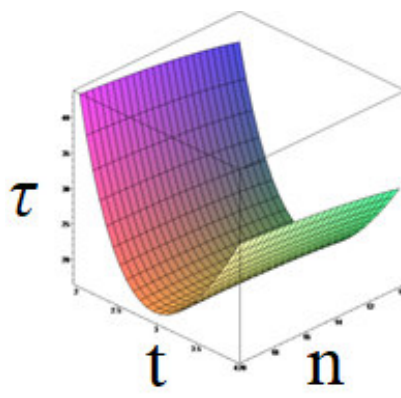


Рисунок 9 – Среднее значение массы шелушенных зерен по величине зазора в зависимости от длительности увлажнения и количества лопастей

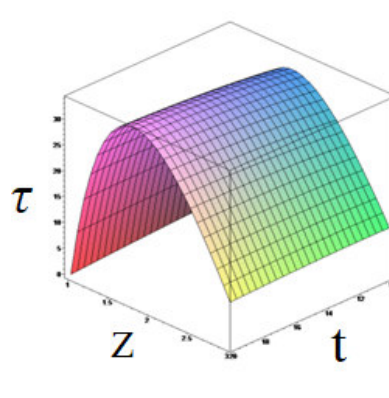


Рисунок 10 – Среднее значение массы шелушенных зерен по количеству лопастей в зависимости от длительности увлажнения и величины зазора

Поверхности отклика (рис. 8-10) для определения среднего значения массы шелушенных зерен показывают, что этот показатель достигает наибольшего значения при величине зазора $z=1,75$ мм при каждом значении количества лопастей $n=2, 3, 4$ шт. и достигает наименьшего значения при количестве лопаток $n=3$ шт. (ближайшее целое к $n=2,9$) при любой величине зазора $z=1-3$ мм, при длительности увлажнения $\tau=16$ мин.

По результатам исследований разработана технология поэтапного шелушения зерна пшеницы с применением установки для роторно-лопастного шелушения (рис. 11).

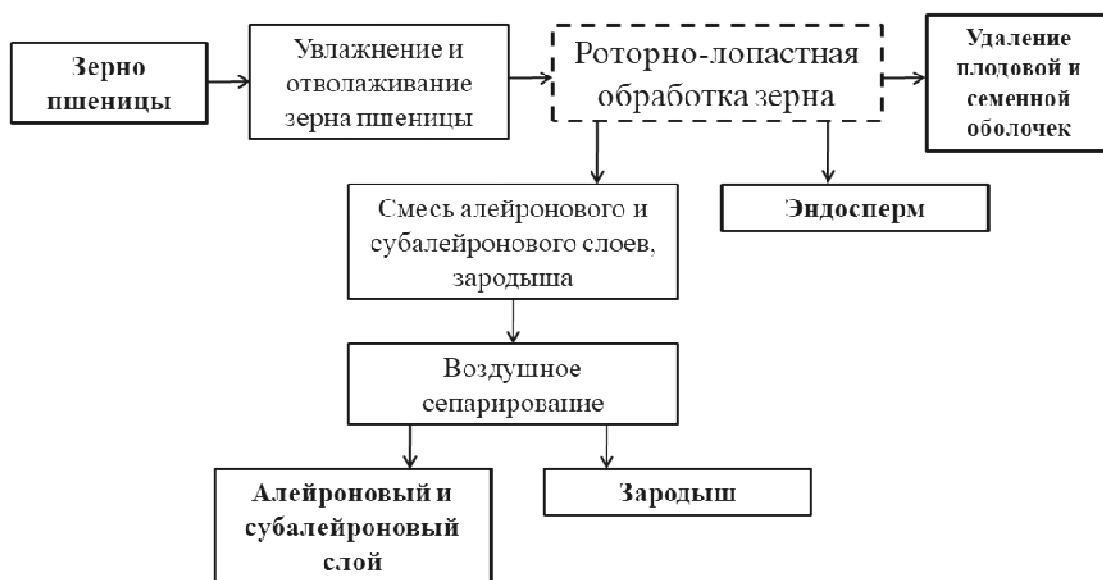


Рисунок 11 – Технологическая схема поэтапного шелушения зерна пшеницы

Разработанная технология поэтапного шелушения зерна пшеницы реализуется на представленной ниже машинно-аппаратурной схеме (рис. 12).

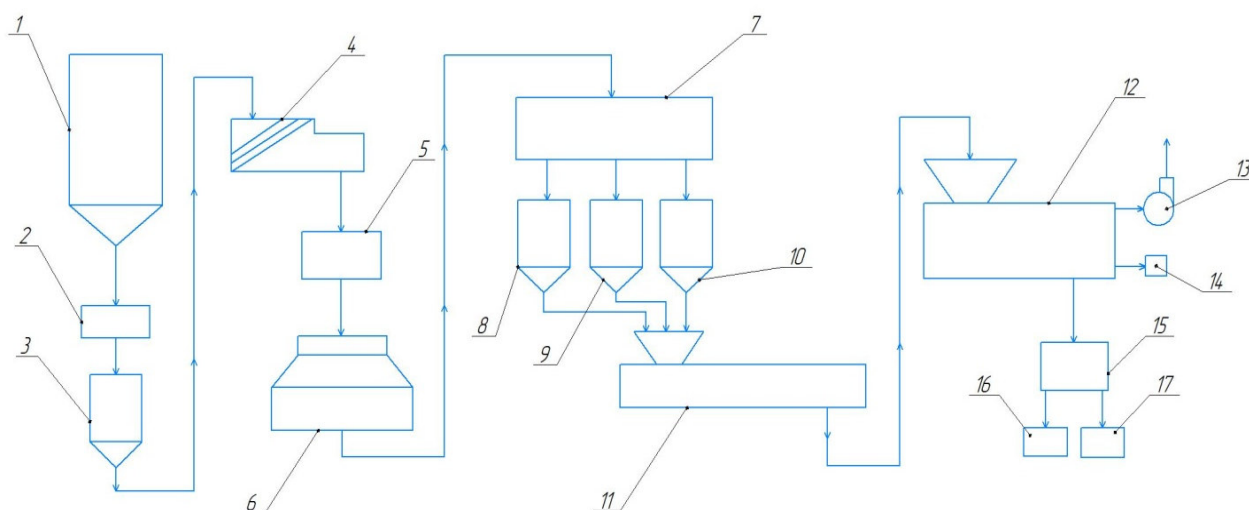


Рисунок 12 – Машинно-аппаратурная схема шелушения зерна пшеницы:

1– приемный бункер; 2 – автоматические весы; 3 – промежуточный бункер; 4 – зерноочистительная машина; 5 – магнитный сепаратор; 6 – триер; 7 – калибровочная машина; 8 – бункер мелкого зерна; 9 – бункер среднего зерна; 10 – бункер крупного зерна; 11 – увлажнитель зерна; 12 – роторно-лопастная шелушительная машина; 13 – циклон вывода плодовой и семенной оболочек; 14 – бункер для сбора эндосперма; 15 – вибрационный разделитель; 16 – бункер для сбора алеиронового и субалеиронового слоев; 17 – бункер для сбора зародыша

По результатам выполненных экспериментальных исследований при запланированных уровнях варьирования переменных факторов были получены данные о процентном соотношении выхода составных частей зерна пшеницы при поэтапном шелушении, которые приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Процентное соотношение выхода составных частей зерна пшеницы

Составные части зерна пшеницы	По ГОСТ 9853-2016 «Пшеница. Технические условия»	По результатам роторно-лопастного шелушения
Плодовые и семенные оболочки	5-9	5,8
Субалейроновый и алейроновый слои	6-9	7,7
Зародыш	2-3,5	2,5
Эндосперм	78-86	84,0

Результаты экспериментальных исследований, приведенные в таблице 2, показали, что при увлажнении зерна пшеницы в течение 16 минут выход эндосперма составил 84%, плодовых и семенных оболочек 5,8%, алейронового и субалейронового слоев 7,7%, зародыша 2,5%, что соответствует требованиям ГОСТ 9853-2016.

Заключение

На основе теоретических и экспериментальных исследований совершенствования технологии производства отдельных фракций зерна пшеницы на роторно-лопастном шелушителе для производства пищевых продуктов получены следующие новые результаты.

1. Результаты исследований, анализа и систематизация существующих технологий шелушения зерна пшеницы, а также выполненные патентные исследования показали, что для совершенствования технологии поэтапного шелушения зерна пшеницы обосновано использование роторно-лопастного метода шелушения.

2. Разработана технология и теоретически обоснована целесообразность совершенствования процесса роторно-лопастного шелушения для получения отдельных фракций зерна пшеницы при производстве пищевых продуктов.

3. Разработана новая конструкция технологического оборудования для поэтапного шелушения зерна пшеницы, техническая новизна которой защищена патентами РФ № 2709719 «Машина для шелушения зерна» и №141853 «Устройство для обработки поверхности зерен», разработана конструкторская документация и изготовлена экспериментальная установка для определения оптимальных технологических параметров и режимов работы роторно-лопастного шелушителя.

4. Получена математическая модель взаимодействия зерна пшеницы с рабочими органами роторно-лопастного шелушителя и определен основной технологический параметр в виде коэффициента шелушения ($K_{ш}=0,84\%$)

характеризующий качество технологического процесса поэтапного шелушения, при этом полученные фракции распределены в следующей пропорции: 5,8% оболочек, алейроновый и субалейроновый слои – 7,7%, эндосперм – 84% и зародыш – 2,5%.

5. Экспериментально определено, что основными технологическими факторами, влияющими на процесс поэтапного роторно-лопастного шелушения зерна пшеницы, являются: величина зазора – 1,75 мм, количество лопастей – 2 шт; длительность увлажнения зерна – 16 мин, с выбором и реализацией которых на практике определены энергозатраты в размере 13,805 кВт ч/т.

6. Расчет экономической эффективности от применения разработанной технологии с использованием роторно-лопастного шелушителя показал, что годовой экономический эффект предприятия составит 446580,01 руб.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

В научных журналах с индексацией Scopus и Web of Science

1. Nevzorov, V.N. Resource-saving grain husking technology / V.N. Nevzorov, I.V. Matskevich, **D.V. Salykhov**, D.S. Bezyazikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Volume 659. – Issue. 1 – P. 012052.

2. Невзоров, В.Н. Оптимизация технологического процесса шелушения зерна пшеницы / В.Н. Невзоров, Е.Н. Кожухарь, **Д.В. Салыхов**, М.А. Янова, И.В. Мацкевич, Ю.Ф. Росляков // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2018. – № 1. – С. 78-83.

3. Невзоров, В.Н. Разработка технологического оборудования для мини-цехов по переработке зерна пшеницы / В.Н. Невзоров, Н.А. Величко, В.А. Самойлов, Н.В. Присухина, И.В. Мацкевич, **Д.В. Салыхов** // Вестник АПК Верхневолжья. – 2016. – № 2 (34). – С. 58–63.

4. Невзоров, В.Н. Модернизация технологии и оборудования предприятий по глубокой переработке зерна / В.Н. Невзоров, М.А. Янова, Н.А. Величко, Н.П. Братилова, В.А. Самойлов, И.В. Мацкевич, **Д.В. Салыхов** // Международные научные исследования. – 2015. – № 4. – С. 15-21.

В изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки Российской Федерации:

5. Невзоров, В.Н. Технология сепарации зерна на вибрационной машине / В.Н. Невзоров, Д.А. Кох, Ж.А. Кох, **Д.В. Салыхов**, Н.И. Чепелев // Вестник Крас ГАУ. – 2018. – № 5. – С. 198-202.

6. Невзоров, В.Н. Технология и оборудование для шелушения зерна пшеницы / В.Н. Невзоров, И.В. Мацкевич, **Д.В. Салыхов**, Н.И. Селиванов // Вестник Крас ГАУ. – 2018. – № 6. – С. 162-166.

7. **Салыхов, Д.В.** Совершенствование технологии переработки зерна пшеницы на роторно-лопастном шелушителе / Д.В. Салыхов, В.Н. Невзоров, И.В.Мацкевич // Вестник Крас ГАУ. – 2020. – № 3. – С. 157-163.

8. Невзоров, В.Н. Исследование технологических параметров строения зерна пшеницы для процесса шелушения / В.Н. Невзоров, **Д.В. Салыхов** // Вестник КрасГАУ. – 2020. – № 10. – С. 198-204.

Патенты РФ на изобретения

9. Пат. ПМ. 141853 Российская Федерация, МПК В02В 3/08. Устройство для обработки поверхности зерен / О.В. Фомин, **Д.В. Салыхов**; заявитель и патентообладатель Салыхов Дмитрий Викторович. – №2013109793/13; заявл. 05.03.2013; опубл. 20.06.2014, Бюл. №17. – 16 с.

10. Пат. 2630245 Российская Федерация, МПК В02В 3/00. Устройство для шелушения зерна пленчатых культур / В.А. Самойлов, В.Н. Невзоров, М.А. Янова, А.И. Ярум, **Д.В. Салыхов**, Н.А. Колесникова; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет». – № 2016140745; заявл. 17.10.2016; опубл. 06.09.2017, Бюл. №25. – 9 с.

11. Пат. 2616045 Российская Федерация, МПК В07В 1/06, В07В 1/46, В07В 7/08. Центробежный сепаратор / В.А. Самойлов, В.Н. Невзоров, А.И. Ярум, **Д.В. Салыхов**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет». – № 2016119071; заявл. 17.05.2016; опубл. 12.04.2017, Бюл. № 11. – 5 с.

12. Пат. ПМ 166452 Российская Федерация, МПК В07В 1/26, В07В 1/42. Виброцентробежная машина / В.А. Самойлов, В.Н. Невзоров, А.И. Ярум, Д.А. Кох, **Д.В. Салыхов**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет». – № 2016121325; заявл. 30.05.2016; опубл. 27.11.2016. – 10 с.

13. Пат. 2699190 Российская Федерация, МПК В02В 1/08. Устройство для пропаривания зерна / В.Н. Невзоров, И.В. Мацкевич, Д.С. Безъязыков, Р.В. Кавкин, **Д.В. Салыхов**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет». – № 2018130546; заявл. 22.08.2018; опубл. 03.09.2019, Бюл. № 25. – 8 с.

14. Пат. 2701802 Российская Федерация, МПК В02В 3/00. Устройство для шелушения зерна / В.Н. Невзоров, И.В. Мацкевич, В.Н. Тепляшин, Р.В. Кавкин, **Д.В. Салыхов**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет». – № 2018106189; заявл. 19.02.2018; опубл. 01.10.2019, Бюл. № 28. – 5 с.

15. Пат. 2709719 Российская Федерация, МПК В02В 5/02. Машина для шелушения зерна / В.Н. Невзоров, И.В. Мацкевич, В.Н. Тепляшин, Р.В. Кавкин, **Д.В. Салыхов**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет». – № 2018130561; заявл. 22.08.2018; опубл. 19.12.2019, Бюл. № 35. – 9 с.

Публикации в журналах и сборниках материалов конференций:

16. Марченко, И.В. Разработка оборудования для шелушения зерна / И.В. Марченко, **Д.В. Салыхов**, О.В. Фомин, В.Н. Невзоров // Инновационные тенденции развития российской науки: материалы VI международной научно-практической конференции. – Красноярск, 2013. – С. 176-178.

17. **Салыхов, Д.В.** Разработка шелушильной установки для производства хлеба из зерна / Д. В. Салыхов, И. В. Марченко, О. В. Фомин // Инновационные тенденции развития российской науки : материалы VI Международной научно-практической конференции молодых ученых, Красноярск, 26–27 марта 2013 года / отв. за выпуск Ю.В. Платонова. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2013. – С. 185-187.

18. Невзоров, В.Н. Технология и оборудование для производства зернового хлеба/ В.Н. Невзоров, В.А. Самойлов, И.В. Мацкевич, **Д.В. Салыхов**// Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: материалы XIV международной научно-практической конференции (22-23 апреля 2015 г.). – Красноярск, 2015. – Ч. 2. – С. 113-117.

19. Невзоров, В.Н. Модернизация оборудования для производства безмучного хлеба из зерна пшеницы/ В.Н. Невзоров, В.А. Самойлов, И.В. Мацкевич, А.И. Ярум, **Д.В. Салыхов**, В.В. Горло, А.А. Струков // Проблемы современной аграрной науки: материалы международной научно-практической конференции. – Красноярск, 2015. – С. 186-189.

20. Невзоров, В.Н. Технология и оборудование производства безмучного хлеба из зерна пшеницы для районов Крайнего Севера/ В.Н. Невзоров, В.А. Самойлов, А.И. Ярум, И.В. Мацкевич, Е.Н. Кожухарь, В.Н. Тепляшин, **Д.В. Салыхов**, // Социально- экономические и экологические аспекты развития регионов и муниципальных образований: проблемы и пути их решения: материалы международной научно-практической конференции. – М., 2016. – С. 230-238.

21. Самойлов, В.А. Разработка нового оборудования для переработки зерна пшеницы в регионах Сибири / В.А. Самойлов, В.Н. Невзоров, А.И. Ярум, И.В., **Д.В. Салыхов** // Концепция устойчивого развития науки третьего тысячелетия: материалы международной научно-практической конференции. – Красноярск, 2016. – С. 76-80.

22. Невзоров, В.Н. Новая технология и оборудование для глубокой переработки зерна пшеницы/ В.Н. Невзоров, В.Н. Холопов, И.В. Мацкевич, **Д.В. Салыхов**, В.А. Самойлов // Современные тенденции развития науки и производства: материалы V международной научно-практической конференции. Западно-сибирский научный центр. – Кемерово, 2017. – С. 62-66.

23. Внедрение технологии и оборудования для производства зернового хлеба в Республике Кипр / В.Н. Невзоров, **Д.В. Салыхов**, И.В. Мацкевич, Д.С. Безъязыков // Приоритетные направления развития регионального экспорта продукции АПК: материалы Международной научно-практической конференции, Красноярск, 13–20 ноября 2019 года. – Красноярск:

Красноярский государственный аграрный университет, 2019. – С. 93-97.

24. Невзоров, В.Н. Разработка технологического оборудования для сепарирования и подготовки зерна пшеницы к шелушению / В.Н. Невзоров, И.В. Мацкевич, **Д.В. Салыхов** // Достижения и перспективы научно-инновационного развития АПК: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием, Курган, 27 февраля 2020 года / под общ. ред. И.Н. Миколайчика. – Курган: Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева, 2020. – С. 549-552.

25. **Салыхов, Д.В.** Влияние влажности зерна пшеницы на процесс шелушения / Д.В. Салыхов, В.Н. Невзоров, В.Н. Тепляшин // Актуальные вопросы переработки и формирование качества продукции АПК [Электронный ресурс]: материалы международной научной конференции (24 ноября 2021 г., г. Красноярск) / отв. за вып. В.Л. Бопп, Е.А. Речкина; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2021. – С. 14-16.

Монография

26. Самойлов, В.А. Новое оборудование для переработки зерновых культур в пищевые продукты / В.А. Самойлов, А.И. Ярум, В.Н. Невзоров, **Д.В. Салыхов**; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2017. – 198 с.

SUMMARY

The purpose of the dissertation work was to improve the technology of stage-by-stage peeling of wheat grain using a rotary-blade peeler to obtain fractions: fruit and seed coats, aleurone and subaleurone layers, germ and endosperm. Based on the developed mathematical model of the stage-by-stage peeling of wheat grain, the main requirements for the stage-by-stage peeling technology were determined, which made it possible to develop and patent a new design for rotary-blade peeling of wheat grain. The experimental studies performed made it possible to obtain a mathematical model of the interaction of wheat grain with the working bodies of a rotary-blade huller and to determine the main technological parameter in the form of a hulling coefficient characterizing the quality of the staged hulling process. The optimal technical parameters that affect the result of peeling are experimentally determined: the size of the gap between the blade and the peeling drum, the number of peeling blades, the duration of grain moistening. A technology and a machine-hardware scheme for the stage-by-stage peeling of wheat grain have been developed.