

На правах рукописи



САИТОВ

Виктор Ефимович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНЫХ МАШИН
ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИХ ОСНОВНЫХ РАБОЧИХ
ОРГАНОВ И ПНЕВМОСИСТЕМ С ФРАКЦИОННОЙ
СЕПАРАЦИЕЙ**

**Специальность 05.20.01 – технологии и средства механизации
сельского хозяйства**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Чебоксары - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования Вятская государственная сельскохозяйственная академия и в Государственном научном учреждении Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого Российской академии сельскохозяйственных наук.

Официальные оппоненты: Галкин Василий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, декан инженерного факультета ФГБОУ ВПО «Пермская государственная сельскохозяйственная академия имени академика Д.Н. Прянишникова»;

Дринча Василий Михайлович, доктор технических наук, профессор, Заслуженный изобретатель РФ, генеральный директор агроинженерного инновационно-исследовательского центра ООО «ИНАГРО»;

Арютов Борис Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры физики и прикладной механики ФГБОУ ВПО «Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия».

Ведущая организация: ГНУ Северо-Западный научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства Российской академии сельскохозяйственных наук.

Защита состоится 25 апреля 2014 г. в 9.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.070.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия» по адресу: 428003, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, 29, ауд. 222. Телефон (факс): 8(8352)62-23-34; E-mail: info@academy21.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия» и на официальном сайте академии.

Автореферат разослан __ января 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

Алатырев Сергей Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности проблемы исследования. В условиях рыночной экономики продовольственная безопасность России в значительной мере определяется объемами производства зерна, необходимого для обеспечения продуктами питания населения, животноводства кормами и создания семенного фонда. При этом для полного и стабильного удовлетворения потребностей страны в продовольственном и фуражном зерне требуется довести ежегодные валовые сборы зерна до 105...110 млн. т. Решение данной проблемы во многом зависит от совершенства технологий и технических средств, обеспечивающих качественную послеуборочную обработку урожая.

Важной составной частью технологии послеуборочной обработки зерна является очистка его от примесей. Для этого в многих хозяйствах в основном применяются разнообразные зерноочистительные машины 60...70-х годов прошлого века, выработавшие свой физический и моральный ресурс. Эффективность функционирования большинства данных машин не является удовлетворительной по технологическим и техническим параметрам.

Существенное повышение производительности и эффективности очистки зернового вороха достигается за счет использования пневмофракционных способов обработки зерна совместно с решетам. Однако существующие зерноочистительные машины с пневмофракционным разделением компонентов зернового материала имеют также ряд конструктивно-технологических недостатков: большие габаритные размеры и металлоемкость, сложность настройки воздушной системы на рабочий режим, высокие удельные затраты энергии на процесс пневмофракционирования из-за применения большого количества вентиляторов и значительной протяженности элементов пневмосистемы.

Проведенный анализ научных работ свидетельствует, что при создании перспективных зерноочистительных машин отсутствуют теоретические исследования и экспериментальные данные по обоснованию конструктивно-технологических параметров пневмоожижающего устройства (ПОУ) ввода зернового материала в пневмосепарирующий канал (ПСК), наклонного ПСК и разделительной камеры пневмофракционного сепарирующего устройства (ПФСУ), криволинейного пневмотранспортирующего канала (ПТК), встроенных жалюзийного воздухоочистителя (ЖВ) во входной патрубке и пылеотделителя с жалюзийным входным окном в выходном канале диаметрального вентилятора (ДВ), осадочных камер при фракционировании легких отходов, устройств для плавной регулировки скорости воздуха в ПСК, входного патрубка противоточного ДВ, цилиндрического решета (ЦР) для выделения мелких примесей в сочетании с воздушной системой.

Поэтому качественная и своевременная обработка зернового вороха при наименьших затратах труда и средств повышением эффективности функционирования зерноочистительных машин путем совершенствования их основных рабочих органов и пневмосистем с фракционной сепарацией является актуальной проблемой сельскохозяйственного производства.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является повышение эффективности функционирования зерноочистительных машин путем совер-

шенствования их основных рабочих органов и пневмосистем с фракционной сепарацией для качественной послеуборочной обработки зернового вороха с наименьшими материальными затратами.

Для решения данной цели определены следующие задачи исследования:

- провести системный анализ функционирования зерноочистительных машин с пневмофракционным разделением компонентов зернового материала, получить аналитические зависимости для обоснования конструктивно-технологических параметров основных рабочих органов данных машин;
- разработать технологическую и конструктивную схемы машины предварительной очистки зерна с выделением зерновых примесей в осадочной камере из фракции легких отходов и мелких примесей ЦР, пневмофракционного сепарирующего устройства машины предварительной очистки зерна, замкнутой малогабаритной пневмосистемы с двумя последовательно соединенными ПСК и противоточным ДВ, замкнутого малогабаритного пневматического сепаратора; экспериментально получить регрессионные модели процесса функционирования данных машин и оптимизировать основные конструктивно-технологические параметры;
- теоретически обосновать и экспериментально подтвердить возможность плавного регулирования скорости воздушного потока в пневмосепараторах дроссельными устройствами;
- провести ведомственные исследования и производственные испытания разработанных зерноочистительных машин;
- определить экономическую и энергетическую эффективность внедренных зерноочистительных машин в технологические линии обработки зерна.

Научную новизну работы составляют:

- аналитические выражения для определения расположения компонентов обрабатываемого материала по высоте на выходе из ПОУ ввода ПСК, расчета траекторий движения частиц зернового материала в узкой струе воздушного потока, по наклонной стенке ПСК, расположенной напротив питающего устройства, в перемещающемся по наружной поверхности вращающегося ЦР зерновом слое; методика и аналитические выражения для определения диапазонов геометрических параметров криволинейных ПТК из расчета угловых скоростей и траекторий частиц; методика получения расходных характеристик регуляторов воздуха с целью плавного регулирования скорости воздушного потока в ПСК;
- математические модели процесса функционирования машин предварительной очистки зерна с выделением зерновых примесей в осадочной камере из фракции легких отходов и мелких примесей ЦР, наклонного ПСК и разделительной камеры ПФСУ, замкнутой малогабаритной пневмосистемы с двумя последовательно соединенными ПСК и противоточным ДВ, замкнутого малогабаритного пневматического сепаратора, устройств для регулирования скорости воздушного потока;
- новые технические решения пневмосистем зерноочистительных машин и их основных рабочих органов, защищенные 14 авторскими свидетельствами СССР и 61 патентом РФ на изобретения, 11 патентами и 18 свидетельствами

РФ на полезные модели.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные аналитические зависимости применимы при создании новых конструктивно-технологических схем сепараторов для разделения зерновых материалов и могут быть использованы в научных, проектно-конструкторских организациях.

Результаты исследований нашли отражение в научном отчете Института строительства, механизации и электрификации сельского хозяйства (г. Варшава, Польша), переданы в ОАО ГСКБ «Зерноочистка» (г. Воронеж, Россия), ОАО «Малмыжский завод по ремонту дизельных двигателей» (г. Малмыж, Россия), ФГУП ПКБ НИИСХ Северо-Востока Россельхозакадемии (г. Киров, Россия), ООО «НовоТех» (г. Красноярск, Россия), ООО «Экорт» (с. Пасегово, Кировская область, Россия), применяются при создании пневмосепараторов ПС-15Ф, СЗМ-5, Балахта-5, ПС-0,5, использованы при изготовлении опытных образцов зерноочистительных машин МПО-50П, МПО-50Ф, МПО-50Р, МПО-25Ф, СВМ-7, ПС-10, которые успешно прошли ведомственные и производственные испытания, внедрены в хозяйствах Кировской области и Республики Марий Эл.

Результаты научно-технических разработок используются также в учебном процессе на инженерных факультетах Алтайского, Башкирского, Воронежского, Казанского, Санкт-Петербургского, Саратовского государственных аграрных университетов, Московского, Челябинского государственных агроинженерных университетов, Марийского государственного университета, Вятской, Ижевской, Костромской, Курганской, Нижегородской, Пензенской, Пермской, Чувашской государственных сельскохозяйственных академий, при подготовке специалистов высшего и среднего звена в Кировском институте переподготовки и повышения квалификации кадров АПК.

Методология и методы исследований. В качестве объектов исследования выбраны процессы очистки зернового материала с пневмофракционированием и на ЦР, экспериментальные и опытные образцы зерноочистительных машин и их рабочие органы - ПСК с устройствами ввода, криволинейные ПТК, устройства очистки воздуха и регулирования скорости воздушного потока в ПСК, ДВ и ЦР с устройствами очистки.

При выполнении работы использованы стандартные и частные методики с применением физического и математического моделирования, современных приборов и вычислительной техники с пакетом программ для обработки результатов экспериментов.

Положения, выносимые на защиту:

- аналитические зависимости для обоснования конструктивно-технологических параметров основных рабочих органов зерноочистительных машин с пневмофракционным разделением компонентов зернового материала;
- технологические схемы, регрессионные модели процесса функционирования машины предварительной очистки зерна с выделением зерновых примесей в осадочной камере из фракции легких отходов и мелких примесей ЦР, пневмофракционного сепарирующего устройства машины предварительной очистки зерна, замкнутой малогабаритной пневмосистемы с двумя последова-

тельно соединенными ПСК и противоточным ДВ, замкнутого малогабаритного пневматического сепаратора, основные конструктивно-технологические параметры данных машин;

- теоретическое обоснование и регрессионные модели плавного регулирования скорости воздушного потока в ПСК дроссельными устройствами;
- результаты ведомственных исследований и функционирования в производственных условиях разработанных зерноочистительных машин;
- экономическая и энергетическая эффективность внедренных в производство зерноочистительных машин.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность основных выводов и предложений в заключении подтверждается результатами теоретических исследований, экспериментами, проведенными в лабораторных условиях с использованием физических моделей и в производственных технологических линиях с разработанными зерноочистительными машинами.

Основные положения работы доложены и обсуждены на заседаниях НТС ОАО ГСКБ «Зерноочистка» (г. Воронеж, 1988...1990, 2009 гг.) и департамента сельского хозяйства и продовольствия Кировской области (г. Киров, 2008 г.), научно-технической конференции «Научно-технический потенциал ВУЗов - народному хозяйству» (г. Киров, 1989 г.), Всесоюзном совещании «Пневмогидроавтоматизация и пневмопривод» (г. Суздаль, 1990 г.), научных конференциях профессорско-преподавательского состава и аспирантов Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (г. Пушкин, 1988...1990 гг.) и Вятской государственной сельскохозяйственной академии (г. Киров, 1988...1992, 1997...2004 гг.), Международном симпозиуме «Экологические аспекты механизации внесения удобрений, защиты растений, обработки почвы и послеуборочной обработки урожая» (г. Варшава, 2000, 2007...2009 гг.), научно-практических конференциях ГНУ НИИСХ Северо-Востока Россельхозакадемии (г. Киров, 1990, 1998, 2006 гг.), Международных научно-практических конференциях «Разработка и внедрение технологий и технических средств для АПК Северо-Восточного региона Российской Федерации» (г. Киров, 2007 г.), «Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства» (г. Йошкар-Ола, 2008, 2009 гг.), «Наука-Технология-Ресурсосбережение» (г. Киров, 2007...2012 гг.), Международных научных конференциях «Гидродинамика. Механика. Энергетические установки» (г. Чебоксары, 2008 г.), «Актуальные вопросы науки и образования» (г. Москва, 2012 г.), «Наука и образование в современной России» (г. Москва, 2012 г.).

По теме диссертации изданы рекомендации и 5 монографий, опубликовано 29 статей в ведущих рецензируемых журналах и 33 статьи в материалах международных конференций, 10 статей депонировано в организациях государственной системы научно-технической информации, получено из Роспатента 104 охранных документа на изобретения и полезные модели. Общий объем публикаций составляет 198,8 усл. п. л., из которых доля авторского вклада - 60%.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, заключения, списка литературы, основных обозначений и приложений, изложена на 519 страницах машинописного текста, вклю-

чая библиографию из 475 наименований, 158 рисунков, 60 таблиц и 14 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы исследований, сущность выполненной работы и основные положения, выносимые на защиту.

Выполненная работа является частью исследований по научному обеспечению развития агропромышленного комплекса Российской Федерации, проведенных в ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА согласно целевой комплексной программе МСХ РФ и РАСХН «Разработать высокоэффективные машинные технологии и технические средства нового поколения для производства конкурентоспособной сельскохозяйственной продукции, энергетического обеспечения и технического сервиса сельского хозяйства» по теме № 27 «Совершенствование конструкций и технологического процесса машин, установок и оборудования послеуборочной обработки и хранения зерна» (№ ГР 01.2.006 09893), хозяйственной теме № 152 «Исследование воздушных систем и семяочистительных машин» с ГСКТБ ПО «Воронежсельмаш» (№ ГР 01.86.0066024), в ГНУ НИИСХ Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого Россельхозакадемии по теме 02.01.01 «Исследование процесса пневмофракционирования зернового вороха» (№ ГР 01.2002.03093).

Решение отдельных частных задач по теме диссертационной работы выполнено совместно с д.т.н., профессорами Н.П. Сычуговым, А.И. Бурковым, при участии к.т.н. А.Л. Глушкова, к.ф.-м.н. В.Г. Фарафонова, ст. препод. А.Н. Суворова, инж. Р.Г. Гатауллиной, аспиранта Д.В. Григорьева.

В первом разделе **«Современное состояние проблемы и задачи исследований»** рассмотрены агротехнические требования, предъявляемые к зерноочистительным машинам, представлен обзор и анализ существующих технологий и технических средств для очистки зерновых культур от примесей, приведен краткий обзор теоретических исследований по теме диссертационной работы, изложены содержание проблемы и задачи исследования.

Эффективность производства зерна зависит во многом от качества послеуборочных работ, определяемого техническим уровнем развития зерноочистительной техники. На основании анализа научных работ В.И. Анискина, В.Д. Бабченко, И.П. Безручкина, Е.Ф. Ветрова, Х.Х. Гималова, Н.Г. Гладкова, В.В. Гортинского, В.П. Горячкина, А.Р. Демидова, А.Б. Демского, А.М. Дзядзио, В.П. Елизарова, Ю.И. Ермольева, Э.В. Жалнина, И.В. Захарченко, Е.М. Зимина, В.Л. Злочевского, М.В. Киреева, И.Е. Кожуховского, М.Н. Летошнева, А.Я. Малиса, А.И. Нелюбова, Г.Т. Павловского, Н.П. Сычугова, А.П. Тарасенко, Г.Д. Терского, З.Л. Тица, Б.Г. Турбина, А.К. Турова, Н.Н. Ульриха и других ученых следует, что преимущественно при очистке зернового вороха от примесей используется воздействие на него воздушного потока и сепарация на решетках.

Научными исследованиями А.В. Алешкина, В.Л. Андреева, А.И. Буркова, М.С. Волхонова, В.Д. Галкина, А.А. Гехтмана, Н.И. Грабельковского, В.М. Дринчи, А.Н. Зюлина, Н.И. Косилова, А.Н. Кремнева, Р.Ф. Курбанова, А.С. Матвеева, Л.И. Мачихиной, В.Н. Мякина, Б.С. Окнина, В.Д. Олейникова, В.С.

Пальцева и другими учеными решено большинство вопросов, связанных с разработкой зерноочистительных машин и поточных линий послеуборочной обработки зерна. Для очистки зернового вороха в сельскохозяйственных предприятиях в основном применяют поточную технологию, в ряде хозяйств - двух-этапную или периодическую с использованием самопередвижных или отдельных машин. Выпускаемые промышленностью зерноочистительные машины и линии не обеспечивают качественную очистку зерна и сортировку семян за один технологический процесс. Повысить эффективность поточной очистки зерна и производительность всей зерноочистительной линии, снизить степень травмирования зерна за счет меньшего количества пропусков его через последующие машины позволяет фракционная технология обработки зернового материала на различных стадиях его очистки.

Наиболее ощутимого улучшения качественных показателей рабочего процесса зерноочистительных машин с минимальными материальными затратами можно достичь применением в них пневмофракционных технологий при использовании высоких скоростей воздушного потока в зоне сепарирования с последующим выделением тяжелой и фуражной фракций, а также совершенствованием их основных рабочих органов.

Во втором разделе *«Теоретические исследования по разработке и совершенствованию основных рабочих органов зерноочистительных машин с пневмофракционным разделением компонентов зернового материала»* проведен системный анализ функционирования данных зерноочистительных машин, получены аналитические зависимости для обоснования конструктивно-технологических параметров основных рабочих органов, выполнено обоснование плавного регулирования скорости воздушного потока в ПСК.

В соответствии с поставленными задачами исследований на основе анализа конструкций и процесса работы машин послеуборочной обработки зерна разработаны зерноочистительные машины, работающие с повышенными скоростями v_e воздушного потока в зоне сепарации и обуславливающие разделение зернового материала на фракции полноценного, фуражного зерна и сорных примесей, общая структурная схема которых представлена на рисунке 1.

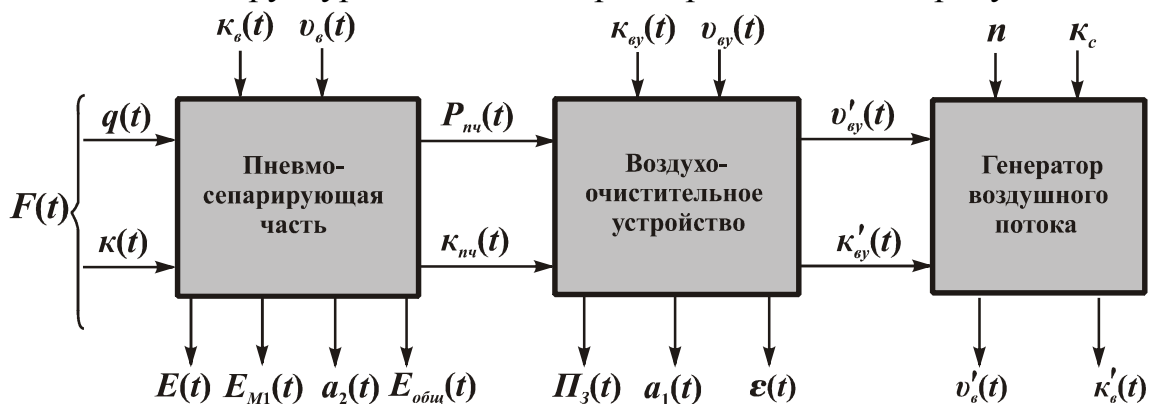


Рисунок 1 - Общая структурная схема модели функционирования зерноочистительной машины, работающей по пневмофракционной технологии

В результате системного анализа функционирования данных машин при воздействии двух входных переменных (подачи $q(t)$ зернового материала и его

качества $\kappa(t)$ (засоренность Z , влажность W , аэродинамические свойства $v_{внт.}$ и др.)) выявлены параметры, характеризующие качественные показатели технологического процесса: эффект $E(t)$ очистки обрабатываемого вороха, общий эффект $E_{общ}(t)$ выделения легких примесей, эффект $E_{М1}(t)$ выделения мелкого зерна, количество потерь $П_3(t)$ семян основной культуры в отходы, содержание $a_1(t)$ зерновых примесей в фуражной фракции и ее относительная масса $a_2(t)$. Для выполнения агротехнических требований контролируемых параметров при работе данных зерноочистительных машин требуется теоретический анализ процесса функционирования их основных рабочих органов с целью обоснования диапазона оптимальных конструктивно-технологических параметров.

Применение ввода зернового материала в ПСК с предварительным псевдоожигением повышает качество очистки зерна. При расслоении материала по коэффициенту k_n парусности послойно на решетке ПОУ перед вводом его в ПСК глубиной h рассмотрено движение частицы с начальной скоростью v_{01} ,

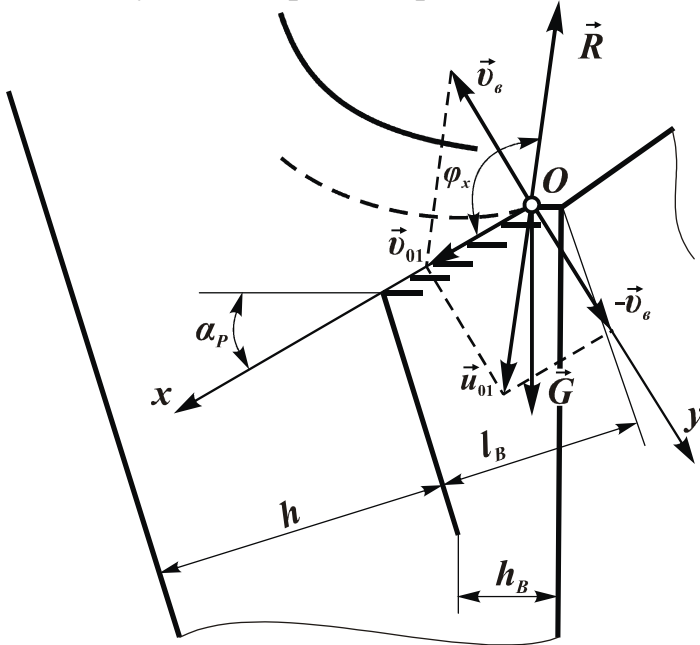


Рисунок 2 - Схема сил, действующих на частицу, движущуюся по наклонной решетке ПОУ ввода ПСК: - - - - траектория движения частицы легких примесей

принадлежащей зерновому потоку (рисунок 2).

Исходя из решения системы дифференциальных уравнений движения единичной частицы по наклонной решетке ПОУ ввода ПСК

$$\begin{cases} \frac{d^2 x}{dt^2} = g \sin \alpha_p - k_n u_0^2 \cos \varphi_x, \\ \frac{d^2 y}{dt^2} = g \cos \alpha_p - k_n u_0^2 \sin \varphi_x, \end{cases} \quad (1)$$

получено выражение для определения координаты y положения компонентов зернового вороха по высоте на выходе из ПОУ ввода и поступления их в воздушный поток ПСК:

$$y = \frac{g \cos \alpha_p - k_n A_i}{2} \left(\frac{\sqrt{v_{01}^2 + 2l_B (g \sin \alpha_p - k_n v_{01} A_i)} - v_{01}}{g \sin \alpha_p - k_n v_{01} A_i} \right)^2, \quad (2)$$

где α_p - угол наклона решетки ПОУ ввода ПСК, град.; φ_x - угол между направлением силы $\vec{R}$ сопротивления воздушного потока и направлением оси Ox , град.; u_0 - относительная скорость частицы, м/с; g - ускорение свободного падения частицы, $g = 9,81$ м/с²; $A_i = \{A_1, \text{ если } \mu_p \leq h_B/l_B; A_2, \text{ если } \mu_p > h_B/l_B\}$,

$$A_1 = \sqrt{v_{01}^2 + \frac{l_B^2 \mu_p + 2l_B h_B}{h_B^2 (h + h_B)^2} \frac{Q_{max}^2}{F^2}}, \quad A_2 = \sqrt{v_{01}^2 + \frac{h_B^2}{(h + h_B)^2 \mu_p^2} \frac{Q_{max}^2}{F^2}}; \quad Q_{max} - \text{максимальный расход воздуха в ПСК, м}^3/\text{с}; \quad l_B \text{ и } F - \text{длина и общая площадь решетки ПОУ}$$

ввода ПСК, м и м²; h_B - глубина входного отверстия пневмокамеры ПОУ ввода ПСК, м; μ_p - коэффициент живого сечения решетки ПОУ ввода ПСК.

Полученное выражение позволяет по заданным конструктивно-технологическим параметрам h , h_B , l_B , F , α_p и Q_{max} разрабатываемой зерноочистительной машины обосновать оптимальное значение коэффициента μ_p живого сечения решетки ПОУ ввода ПСК. С использованием пакета программ OpenOffice org. 3.0 представленная диаграмма распределения компонентов зернового вороха по коэффициенту k_n парусности на выходе из ПОУ ввода ПСК (рисунок 3) показывает, что качество ожижения зернового потока на решетке значительно улучшается при $\mu_p = 0,2 \dots 0,4$.

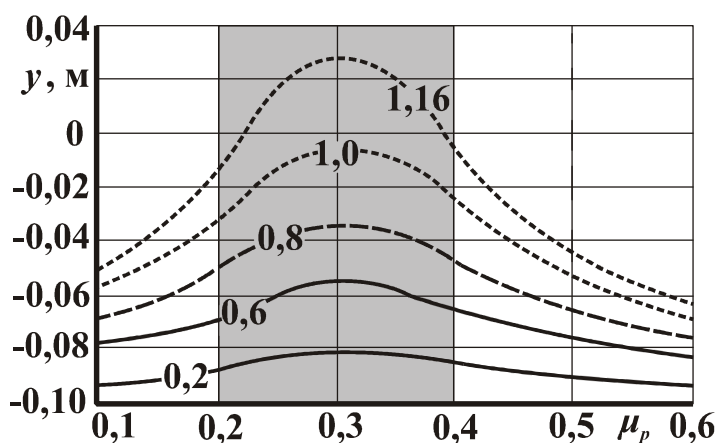


Рисунок 3 - Диаграмма распределения компонентов зернового вороха по коэффициенту k_n парусности на выходе из ПОУ ввода ПСК от коэффициента μ_p живого сечения его решетки ($h = 0,24$ м, $h_B = 0,04$ м, $l_B = 0,13$ м, $F = 0,026$ м², $\alpha_p = 30^\circ$, $Q_{max} = 0,48$ м³/с): ——— - полноценное зерно; - - - - щуплое зерно; - · - · - легкие сорные примеси; ■ - область оптимальных значений μ_p

Для качественного разделения зернового материала на фракции в ПСК с углом наклона α_K (рисунок 4) необходимо выявить оптимальное расположение кромки смежной стенки между данным каналом и разделительной камерой (высоту H_B верхней части ПСК). Система дифференциальных уравнений, описывающая основное уравнение динамики материальной точки, в проекциях на выбранные оси O_1x и O_1y при принятии неизменного направления действия силы $\vec{R}$ вследствие малого времени t пребывания частицы в воздушном потоке, решена применением способа линейной аппроксимации. Модель процесса движения частицы в узкой равномерной струе воздушного потока ПСК получена в виде параметрических уравнений:

$$\begin{cases} x(t) = v_{01} \sin \alpha_y \cdot t + k_n \sqrt{v_{01}^2 - 2v_{01}v_\epsilon \sin(\alpha_y - \beta_x) + v_\epsilon^2 (v_\epsilon \cos \beta_x - v_{01} \sin \alpha_y)} \frac{t^2}{2}, \\ y(t) = v_{01} \cos \alpha_y \cdot t + [g - k_n \sqrt{v_{01}^2 - 2v_{01}v_\epsilon \sin(\alpha_y - \beta_x) + v_\epsilon^2 (v_\epsilon \sin \beta_x + v_{01} \cos \alpha_y)}] \frac{t^2}{2}, \end{cases} \quad (3)$$

где β_x (α_y) - угол между осью O_1x (O_1y) и направлением скорости v_ϵ воздушного потока (скорости v_{01} поступления частицы в воздушный поток), град.

При сепарации зернового вороха в наклонном ПСК часть зерна и примесей достигает внутренней его стенки, расположенной напротив питающего валика, и движется по ней. Очевидно, что полноценные зерна со скоростью витания $v_{\text{вум.}} \geq v_{\text{вум.мин.}}$, достигшие наклонной стенки и движущиеся по ней вверх, не должны выноситься из ПСК в разделительную камеру. Это условие будет выполняться при движении данных полноценных зерен вверх по наклонной стенке с замедлением, которое приводит к снижению абсолютной скорости v_{C0} зерновки от ее начальной v_{C01} до нуля на определенной высоте $H \leq H_B$:

легких примесей через ПК в осадочную камеру и отсутствия попадания в данный канал зерен фуражной фракции переднюю кромку внутренней стенки ПК рекомендуется устанавливать на высоте $Y(Y_{II}) = 0,48 \dots 0,65$ м и на расстоянии $h(h_{II1}) = 0,20 \dots 0,25$ м от наружной стенки ПСК (рисунок 5, б).

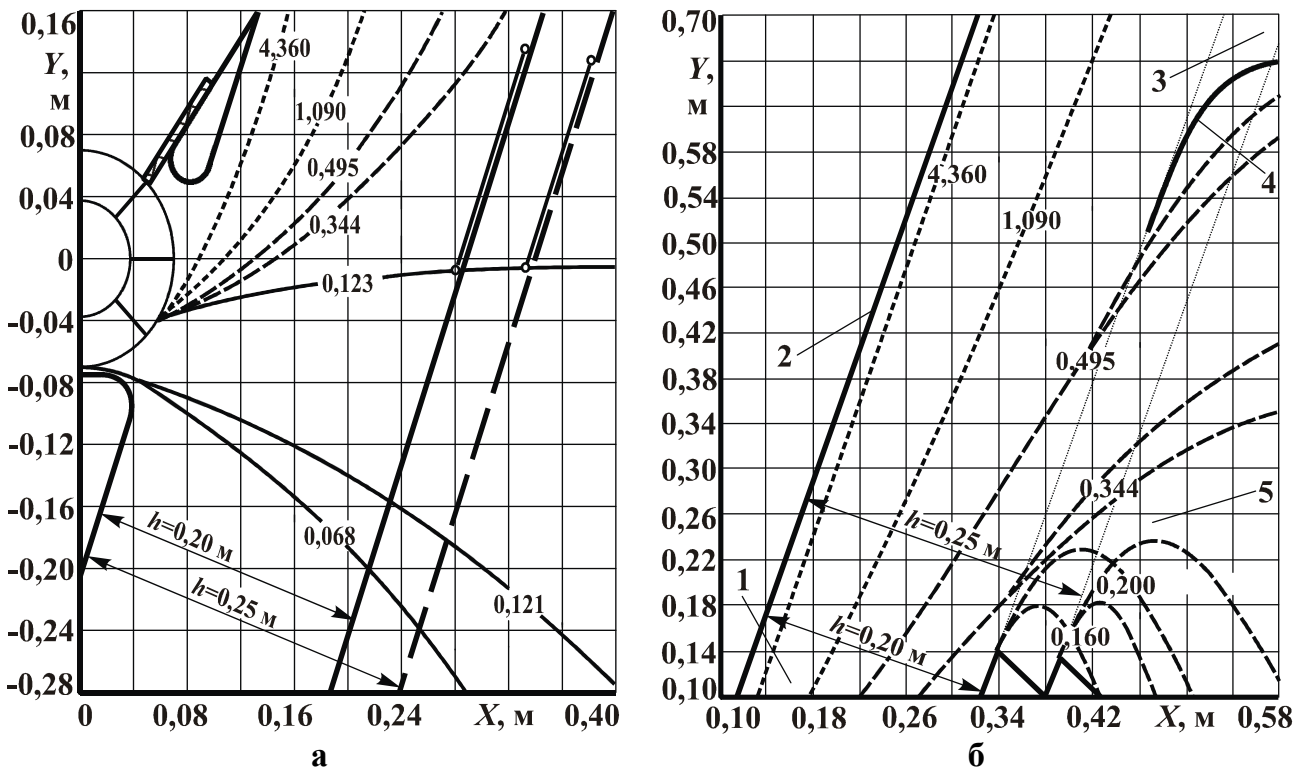


Рисунок 5 - Траектории движения компонентов зернового вороха в наклонном ПСК (а) и в разделительной камере (б) при $d_B = 0,140$ м, $n_B = 140$ мин⁻¹, $\phi_1 = 0^\circ$, $\alpha_K = 70^\circ$, $f = 0,3$ и $v_6 = v_{sum.min} = 8,9$ м/с: 1 - выходное сечение ПСК; 2 - наружная стенка; 3 - пылеотводящий канал (ПК); 4 - внутренняя стенка ПК; 5 - разделительная камера; ----- - полноценное зерно; - - - - - фуражное зерно; - сорные примеси

Для исключения осаждения выносимых из ПСК частиц на внутренней стенке ПК скоростной режим воздушного потока должен быть равномерным по сечению канала (рисунок 16), что достигается поджатием потока воздуха за счет выполнения канала на криволинейном участке в виде конфузора и, соответственно, отношением глубины выходного сечения криволинейного участка канала к глубине входного его сечения $h_{II2}/h_{II1} < 1$. При анализе формы ПК установлено, что наиболее приемлемое отношение h_{II2}/h_{II1} , минимизирующее осаждение примесей в данном канале и исключаяющее повышение энергоемкости процесса пневмосепарации в ПФСУ, должно составлять $0,7 \dots 0,9$.

Определение диапазона оптимальных значений геометрических параметров ПТК замкнутого малогабаритного пневмосепаратора (рисунок 18) проведено из расчета угловых скоростей ω_q частиц, выносимых из ПСК и движущихся за счет воздушного потока по поверхности внутренней стенки с радиусом окружности $R_{II} = R_C - h_{II2}$, численным решением дифференциального уравнения

$$\frac{d\omega_q}{d\psi_{II}} = \frac{1}{\omega_q} \left[\frac{gR_{II}}{v_{sum.}^2} \left(\omega_q - \frac{v_6}{R_{II}} \right)^2 + \operatorname{tg} \phi_{mp} \omega_q^2 - \frac{g}{R_{II} \cos \phi_{mp}} \cos(\psi_{II} - \phi_{mp}) \right], \quad (6)$$

где R_C - конструктивный радиус окружности, описывающей поверхность на-

ружной стенки ПТК, $R_c = Y - Y_{II}$, м; Y_{II} и Y - высота ПСК и габаритный размер верхней части пневмосепаратора, м; $\varphi_{тр}$ - угол трения частицы по поверхности стенки, град.; ψ_{II} - угол поворота криволинейного ПТК, град.

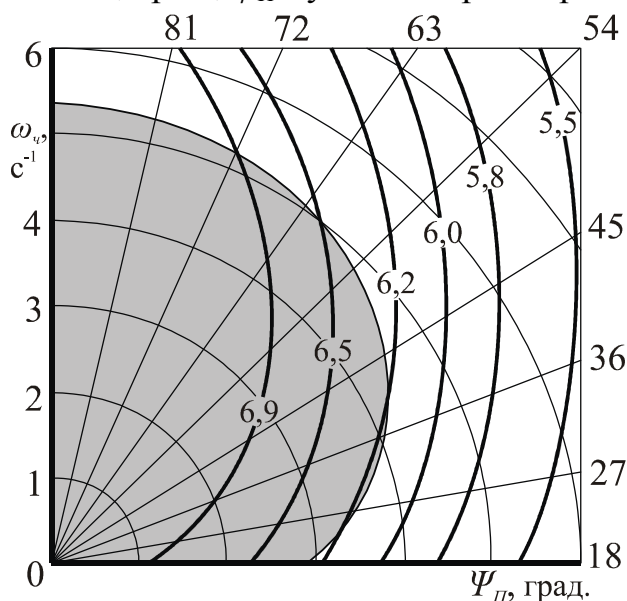


Рисунок 6 - Диаграмма изменения угловой скорости $\omega_{ч}$ частиц, отличающихся скоростью $v_{вит.}$ витания, при движении в криволинейном ПТК от угла ψ_{II} их поворота при $h_{II2}/h_{II1} = 0,68$: — зона безотрывного движения частицы по поверхности внутренней стенки ПТК

В соответствии с этим для данного пневмосепаратора с заданными конструктивными параметрами ($h_{II1} = 0,16$ м, $Y = 1,1$ м и $Y_{II} = 0,65$ м) проведенный анализ изменения угловой скорости $\omega_{ч}$ частицы при ее движении в криволинейном ПТК от угла ψ_{II} поворота выя-

вил, что оптимальное отношение h_{II2}/h_{II1} должно составлять $0,7...0,8$, при котором обеспечивается транспортирование частиц легких примесей по поверхности внутренней стенки ПТК (рисунок 6).

Разделение легких отходов в осадочной камере на фракции сорных примесей и фуражную можно достичь использованием воздушного потока, подведенного в зону фракционирования. Такое разделение осуществимо путем осаждения фуражной фракции в осадочной камере, выносом через ДВ и последующим улавливанием пылеотделителем сорных примесей. Качественное отделение фуражной фракции от сорных легких примесей достижимо в зоне всасывающего окна ДВ в параллельно образованных каналах установкой дефлекторов (рисунок 15, а).

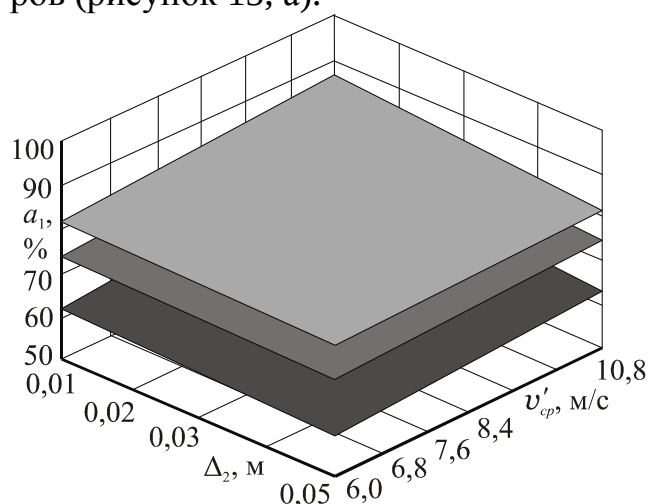


Рисунок 7 - Зависимости содержания a_1 зерновых примесей в фуражной фракции от скорости v'_{cp} воздушного потока в перепускном окне и величины зазора Δ_2 при скорости воздуха в ПСК $v_\epsilon = 6$ м/с (■), $v_\epsilon = 7$ м/с (■) и $v_\epsilon = 8$ м/с (■) и распределении сорных примесей по скорости $v_{вит.}$ витания, отличающимся от нормального закона

Статистический анализ процесса фракционирования легких отходов от скорости v'_{cp} воздушного потока в перепускном окне и зазора Δ_2 при скорости v_ϵ воздуха в ПСК 6, 7 и 8 м/с для вероятного бункерного зернового вороха с содержанием полноценных зерен основной культуры $m_{10} = 85\%$, щуплых и дробленых зерен $m_{20} = 5\%$ и сорных примесей $m_{30} = 10\%$, со средними скоростями витания $v_{вит.ср10} = 9$ м/с, $v_{вит.ср20} = 6$ м/с, $v_{вит.ср30} = 5,5$ м/с показал, что зависимо-

сти $\alpha_1 = f(\Delta_2, v'_{cp})$ характеризуются функциями, мало отличающимися от линейных (рисунок 7). Содержание α_1 зерновых примесей в фуражной фракции при изменении зазора Δ_2 в пределах 0,01...0,05 м может достигать 60,0...84,0%.

Качественное разделение легких отходов на фракции с последующим осаждением их в отсеках, образованных в нижней части осадочной камеры, достигнуто использованием узкой струи воздушного потока, подведенной в зону выходного окна ПТК (рисунок 15, б). Траектории движения частиц в воздушном потоке на оси координат xOy описываются равенствами (рисунок 8):

$$\begin{cases} x(t) = v_{01} \sin \alpha_y \cdot t + k_n \sqrt{v_{01}^2 - 2v_{01}v_g \sin(\alpha_y + \beta_x) + v_g^2} (v_g \cos \beta_x - v_{01} \sin \alpha_y) \frac{t^2}{2}, \\ y(t) = v_{01} \cos \alpha_y \cdot t + [g + k_n \sqrt{v_{01}^2 - 2v_{01}v_g \sin(\alpha_y + \beta_x) + v_g^2} (v_g \sin \beta_x - v_{01} \cos \alpha_y)] \frac{t^2}{2}. \end{cases} \quad (7)$$

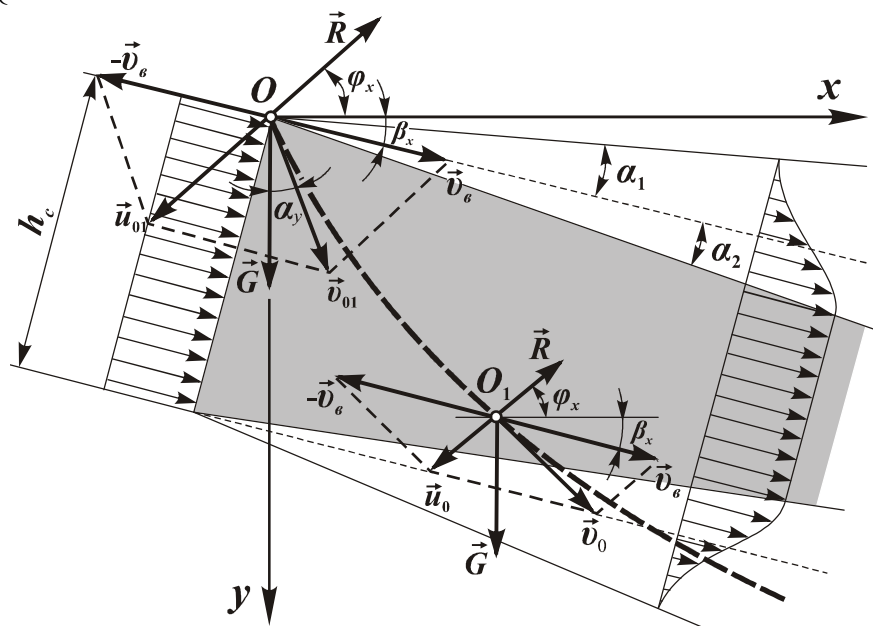


Рисунок 8 - Направление воздушной струи, вытекающей в осадочную камеру, и схема сил, действующих на частицу легких примесей в зоне фракционного разделения отходов: - - - траектория движения частицы, ■ - область ядра струи потока воздуха

Моделирование движения частиц согласно уравнениям (7) на персональном компьютере

при помощи пакета программ по статистической обработке данных Microsoft Excel 2003 показывает, что качественное разделение легких отходов и осаждение сорной и фуражной фракций в осадочной камере центробежного типа могут быть достигнуты при $v_{01} = 1,5$ м/с, $\alpha_y = 30^\circ$, $\beta_x = 10^\circ$, скорости воздушного потока $v_g = 9$ м/с с толщиной его струи $h_c = 0,08$ м. Оптимальное расположение кромки разделительной стенки отсеков осаждения фуражной и сорной фракций находится в области значений координат $x = 0,20 \dots 0,28$ м и $y = 0,13 \dots 0,20$ м.

Проекция длины S_{hx} начального участка затопленной турбулентной струи на ось Ox с учетом теории Г.Н. Абрамовича (a - коэффициент турбулентной структуры воздушной струи, $a = 0,09 \dots 0,12$; α_2 - угол одностороннего сужения ядра воздушной струи, $\alpha_2 = 6^\circ 30'$) определяется

$$S_{hx} = \frac{1,03h_c}{2a} \cos(\beta_x + \alpha_2), \quad (8)$$

которая согласно выявленным конструктивным параметрам зоны фракционного разделения отходов составляет 0,33...0,44 м. Сорные примеси выносятся из зоны осаждения фуражной фракции в ядре воздушной струи, которая в дальнейшем рассеивается в отсеке осаждения сорных примесей.

Применением системы уравнений (7) рассмотрены траектории движения частиц легких примесей в разделительной камере ПФСУ при вылете с кромки внутренней стенки ПК (рисунок 16) и малогабаритной осадочной камере замкнутого пневмосепаратора (рисунок 18), обеспечивающей поступление в нее только части генерируемого ДВ воздуха ($\sim 20...30\%$) с концентрированным количеством легких примесей. С целью более полного выноса легких примесей в осадочную камеру ПФСУ и соответственно повышения $E_{общ}$ кромку смежной стенки между разделительной и осадочной камерами целесообразно располагать на высоте $Y(H_C) = 0,3...0,5$ м, а для эффективного осаждения легких примесей кромку пылеосадителя в малогабаритной осадочной камере рекомендуется устанавливать с координатами $x = 0,24...0,36$ м и $y = 0,08...0,24$ м.

Для встроенного в технологическую схему замкнутого малогабаритного пневмосепаратора ЖВ (рисунок 18), компоновка которого уменьшает расход металла на изготовление системы очистки воздуха, выражены аналитические уравнения: $h_{ex} = (0,7...0,8)h_{П1}$, $h_{вых} \geq (0,07...0,16)h_{П1}$, $R_{жс} = R_B - (h_{ex} + 2h_{вых})/3$, $S_{жсв} = R_{жс}\psi_{жс}$, $l_{ржс} = 2/3(h_{ex} - h_{вых})$, по которым для пневмосепаратора с глубиной $h_{П1}$ выхода ПСК 0,16 м, радиусом R_B наружной стенки отводного канала 0,8...1,0 м глубина входного патрубка $h_{ex} = 0,112...0,128$ м, глубина выходного патрубка $h_{вых} \geq 0,011...0,026$ м, радиус окружности жалюзийной решетки $R_{жс} = 0,75...0,94$ м, а длина ее $S_{жсв} = 1,57...1,97$ м. По литературным данным угол $\beta_{жсв}$ наклона пластин в решетке должен составлять $20...30^\circ$, длину $l_{жсв}$ пластин и шаг $t_{жсв}$ их установки рекомендуется принимать 0,03...0,05 м.

Система дифференциальных уравнений траекторий движения частиц в отводном канале ЖВ решена применением численного метода Рунге-Кутты. Из анализа численного решения следует, что частицы примесей, поступающие в отводной канал ЖВ с различными начальными условиями (рисунок 9), имеют криволинейную форму траектории, не пересекают жалюзийную стенку воздухоочистителя, чем обеспечивается эффективность отделения их от воздушного потока, проходящего через жалюзийную решетку во входной патрубок диаметрального вентилятора малогабаритного пневмосепаратора.

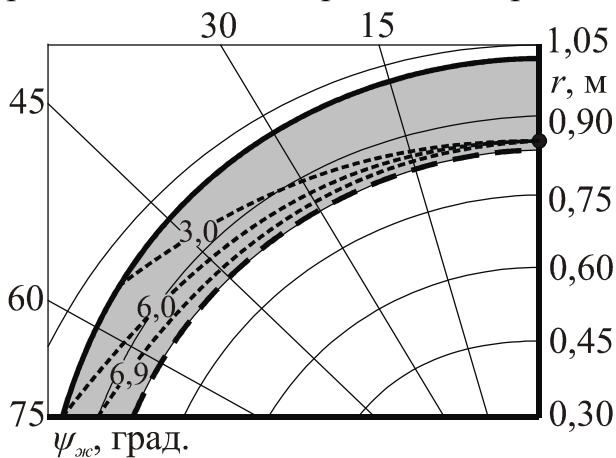


Рисунок 9 - Расчетные траектории частиц легких примесей со скоростями $v_{вх} = 6,9, 6,0$ и $3,0$ м/с, начальной координатой $0,85$ м при конструктивных параметрах ЖВ $R_B = 0,9$ м, $R_{жс} = 0,84$ м, $h_{ex} = 0,125$ м, $h_{вых} = 0,025$ м

Выносимые воздушным потоком легкие примеси из устройств очистки воздуха через ДВ целесообразно отводить с частью воздуха непосредственно из зоны его выходного канала (рисунок 10). Для удаления из пневмосистемы в аспирационную сеть минимального количества Q воздуха при максимальном содержании в нем частиц легких примесей и выявления места их наибольшей концентрации в зоне выходного канала ДВ определены траектории движения

частиц легких примесей, выходящих из рабочего колеса вентилятора в зону выходного канала с некоторой начальной скоростью v_{01} под углом α_0 к касательной τ - τ .

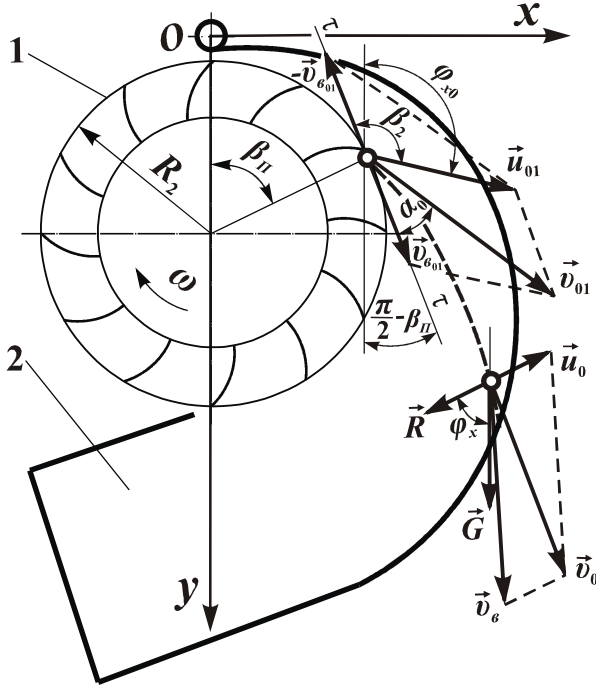


Рисунок 10 - Схема сил, действующих на частицу легких примесей при движении ее в выходном канале диаметрального вентилятора: 1 - рабочее колесо; 2 - выходной канал; --- - траектория движения частицы

С учетом основного уравнения динамики материальной точки в проекциях на выбранные оси Ox и Oy модель движения различных частиц, отличающихся зависимостью силы $\vec{R}$ от размеров, формы и режима обтекающего их воздушного потока (числа Рейнольдса Re), в зоне выходного канала ДВ получена в виде параметрических уравнений и приведена к общему виду, удобному для численного решения на ЭВМ:

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + v_{01} \sin(\alpha_0 + \frac{\pi}{2} - \beta_{\pi}) \cdot t - (kB_1^p + B_2) \sin(\beta_2 + \beta_{\pi} - \frac{\pi}{2}) \cdot \frac{t^2}{2}, \\ y(t) = y_0 + v_{01} \cos(\alpha_0 + \frac{\pi}{2} - \beta_{\pi}) \cdot t + \left[(kB_1^p + B_2) \cos(\beta_2 + \beta_{\pi} - \frac{\pi}{2}) + g \right] \cdot \frac{t^2}{2}, \end{cases} \quad (9)$$

где для частиц размером d менее 100 мкм: $k = 3\pi\mu d$, $B_1 = v_{01}^2 + (2\pi n R_2)^2 - 4v_{01}\pi n R_2 \cos\alpha_0$, $p = 1/2$, $B_2 = 0$, $g = 0$; для частиц размером d более 100 мкм: $k = 3\pi\mu d$, $B_1 = v_{01}^2 + (2\pi n R_2)^2 - 4v_{01}\pi n R_2 \cos\alpha_0$, $p = 1/2$, $B_2 = 1/6(\rho_e d/\mu)^{2/3}$, $g = 0$; для частиц, характеризующихся коэффициентом k_n парусности: $k = k_n$, $B_1 = v_{01}^2 + (2\pi n R_2)^2 - 4v_{01}\pi n R_2 \cos\alpha_0$, $p = 1$, $B_2 = 0$; v_{01} - абсолютная скорость поступления частицы из межлопаточного канала колеса ДВ в его выходной канал, м/с; β_2 - угол установки лопатки на наружном диаметре D_2 рабочего колеса ДВ, град.; β_{π} - угол, характеризующий дугу рабочего колеса ДВ, по которой происходит поступление частиц в выходной канал, град.; α_0 - угол между вектором $\vec{v}_{01}$ и касательной τ - τ , град.; d - диаметр частицы, м; n - частота вращения рабочего колеса ДВ, c^{-1} ; μ - динамический коэффициент вязкости воздуха, Па·с; ρ_e - плотность воздуха, $кг/м^3$; R_2 - наружный радиус колеса ДВ, м.

Анализ уравнений (9), проведенный на персональном компьютере с использованием пакета программ по статистической обработке данных Microsoft Excel 2003, показывает, что наиболее оптимальным расположением входного окна пылеотделителя глубиной Δ в выходном канале ДВ с диаметром рабочего колеса $D_2 = 0,3$ м и частотой n его вращения $13,333 c^{-1}$ (800 мин^{-1}) при начальных условиях вылета частиц $v_{01} = 24$ м/с, $\beta_2 = 165^\circ$, $\alpha_0 = 10^\circ$ является зона, ограниченная углом $\beta_{\pi} = 150...180^\circ$ (рисунок 11).

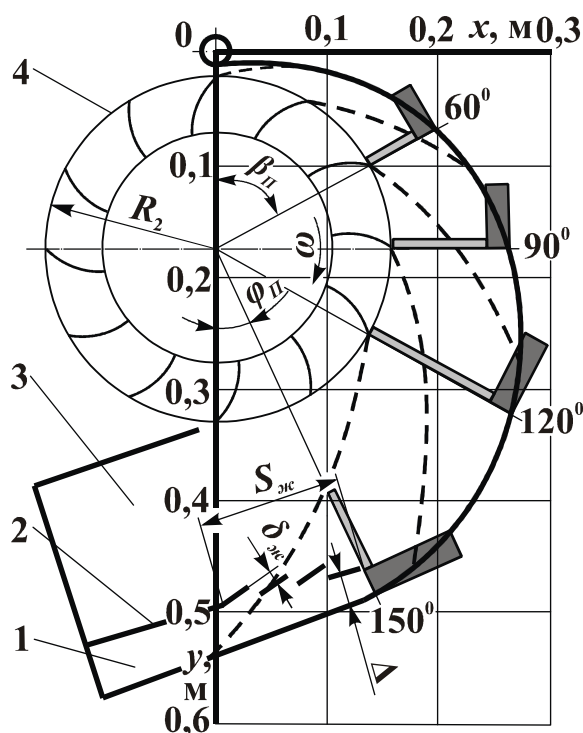


Рисунок 11 - Схема ДВ с входным окном пылеотделителя, траектории движения пылевидных примесей и эпюры их распределения в радиальном направлении: 1 - пылеотделитель; 2 - смежная стенка пылеотделителя; 3 - выходной канал; 4 - рабочее колесо; - - - - траектории движения частиц; ■ - концентрация частиц примесей возле внешней стенки выходного канала; ■ - распределение частиц примесей в выходном канале

Для улавливания частиц примесей, достигающих криволинейной стенки выходного канала 3 ДВ в зоне $\beta_{II} = 170...190^\circ$, целесообразно смежную стенку 2 пылеотделителя 1

выполнить с жалюзийным участком, имеющим определенную длину $S_{жс}$ и зазор $\delta_{жс}$ в жалюзи. Наличие жалюзийного участка в пылеотделителе исключает постоянную подрегулировку его при колебаниях сопротивления сети с целью качественного улавливания частиц примесей.

Качество очистки зернового материала в пневмосепараторе во многом зависит от точности установки скорости v_e воздушного потока в ПСК. В основном для регулирования скорости v_e воздушного потока в ПСК применяют глухие поворотные заслонки вследствие простоты конструкции и изготовления. Расходная характеристика такого регулятора зависит от особенности работы генератора воздушного потока и сопротивления пневмосистемы зерноочистительной машины:

$$P_v(Q) = \rho K_s \frac{Q^2}{2h^2 B_{II}^2}, \quad (10)$$

где ρ - плотность воздуха, кг/м^3 ; K_s - коэффициент сопротивления сети; h - глубина ПСК, м; B_{II} - ширина пневмосистемы, м.

Функция (10) использована при исследовании работы экспериментальной установки, отличающейся от машины предварительной очистки зерна МПО-50 только шириной B_{II} пневмосистемы. В результате получено выражение:

$$440,65 + \frac{2,60}{Q^2} = 258(\xi_1(\alpha) + 4,4166 + 14,545\lambda(Q))Q^2, \quad (11)$$

где λ - коэффициент трения воздуха о стенки канала; ξ_1 - коэффициент местного сопротивления поворотной заслонки; α - угол поворота заслонки, град.

Решение уравнения (11) получено численным методом с использованием пакета компьютерной математики SciLab v. 5.2.1 в виде относительного расхода воздуха $\mu_v = Q_\alpha / Q_{\max}$, где Q_α - расход воздуха в ПСК при повороте заслонки на угол α , $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_{\max}$ - максимальный расход воздуха в ПСК при $\alpha = 0^\circ$, $\text{м}^3/\text{с}$. Расходная характеристика (сплошная линия) согласуется с экспериментальной

(рисунок 12), из которой следует, что погрешность $\Delta\mu_6$ в получении μ_6 при постоянной цене $\Delta\alpha$ деления механизма управления на пологом участке меньше, чем на крутом. Это значительно затрудняет оператору точную установку технологического режима работы пневмосистемы машины.

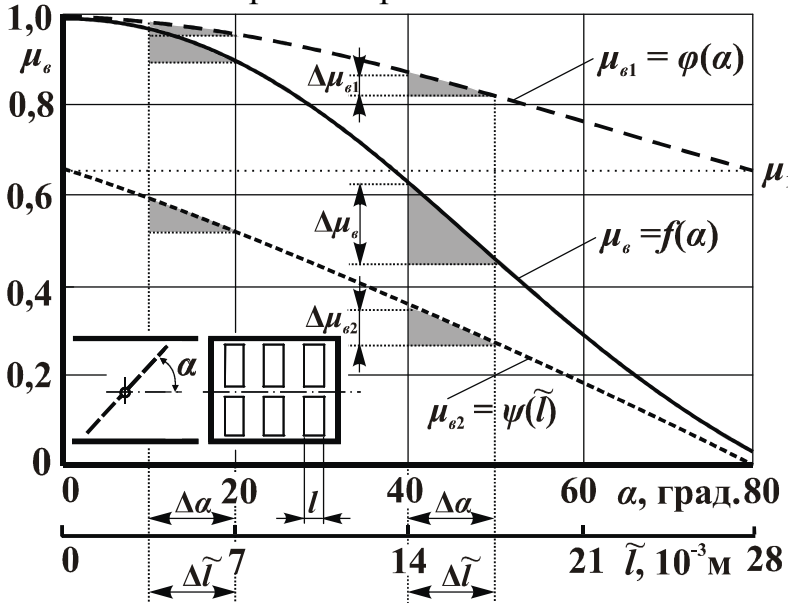


Рисунок 12 - Зависимости относительного расхода μ_6 воздуха глухой (—) и перфорированной (---) заслонки от угла α установки в канале и ширины $\tilde{l}$ перекрытия отверстий перфорированной заслонки (-----)

Предложена поворотная перфорированная заслонка, обеспечивающая поэтапное изменение относительного расхода $\Delta\mu_{61(2)}$ воздуха в зоне технологи-

ческого процесса перекрытием проходного сечения канала за счет поворота (α) и уменьшения коэффициента μ_3 ее живого сечения постепенным закрытием ширины l перфораций. Данная заслонка обеспечивает более плавную регулировку скорости v_6 воздушного потока за счет приближения расходной характеристики к линейной зависимости с малыми по модулю угловыми коэффициентами. В случае если у данной заслонки отверстия шириной l полностью закрыты, то она работает как обычная глухая, что обуславливает универсальность ее применения в воздушных системах зерноочистительных машин.

В процессе анализа рабочего процесса противоточного ДВ определено, что относительная глубина входного патрубка ограничивается значениями $0,90 < \tilde{H}_{ВП} = H_{ВП}/D_2 < 2,43$, а относительная длина верхней стенки входного патрубка должна быть $\tilde{L}_{ВП} = L_{ВП}/D_2 \geq 1,1$, где $H_{ВП}$ и $L_{ВП}$ - глубина и длина входного патрубка вентилятора, м; D_2 - диаметр рабочего колеса вентилятора, м.

Для более точного анализа выделения мелких примесей цилиндрическим решетом (скальператором) в отличие от работы Л.И. Мачихиной дополнительно учитываются силы взаимодействия между зерном и частицей примеси. Результирующая сил на частицу направлена к оси вращения скальператора. Соответственно, движение частицы с поверхности зернового потока к поверхности решета рассмотрено в полярной системе координат (r_φ, φ) , полюс которой совпадает с осью вращения скальператора, а полярная ось направлена горизонтально с отсчетом угла φ против часовой стрелки (в сторону вращения цилиндрического решета радиусом R_p) (рисунок 13). Траектория движения частицы в зерновом потоке толщиной H описывается выражением:

$$r_\varphi = R_p + H - \frac{v_{II}}{\omega_p} (\cos \varphi_0 - \cos \varphi), \quad (12)$$

где $\omega_p = 2\pi n_p$ - угловая скорость вращения барабана скальператора, рад./с; n_p -

частота вращения барабана скальператора, с^{-1} ; φ_0 - начальный угол погружения частицы в зерновом потоке, град.; v_{Π} - коэффициент, определяющий радиальную составляющую скорости погружения частицы в зерновом потоке,

$$v_{\Pi} = \frac{H\omega_p}{\cos\varphi_0 + \left[\sqrt{1 - (\omega_p^2 R_p \sin\varphi_{mp} / g)^2} - \omega_p^2 R_p \cos\varphi_{mp} / g \right] \sin\varphi_{mp}}, \quad \text{м/с}; \quad \varphi_{mp} =$$

$= \arctg f$ - угол трения частицы, рад.; f - коэффициент трения частицы о решето скальператора.

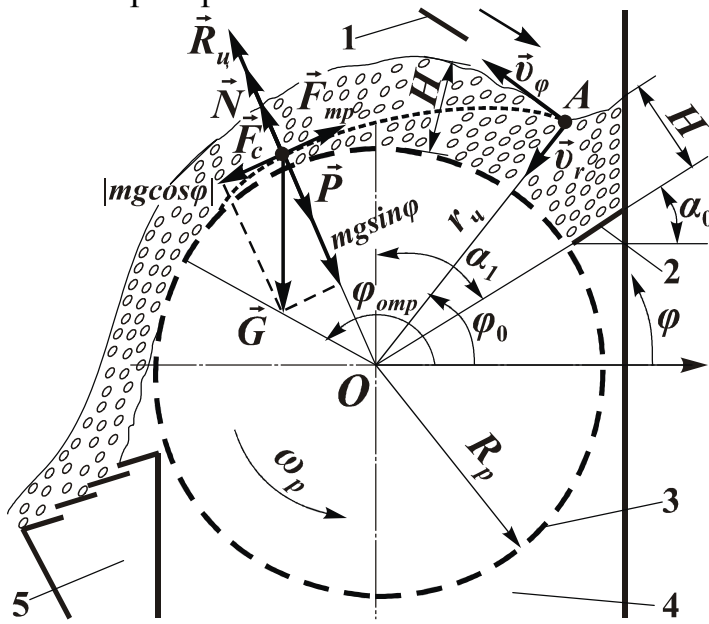


Рисунок 13 - Схема к анализу выделения мелких примесей наружной поверхностью вращающегося цилиндрического решета: 1, 2 - подающий и питающий лотки; 3 - решето; 4 - патрубок вывода мелких примесей; 5 - ПОУ ввода ПСК; ----- - траектория погружения мелкой частицы в зерновом потоке

Если частица погрузится на поверхность вращающегося решета скальператора, то $r_u = R_p$, и из уравнения (12) определяется угол φ_{Π} ее погружения:

$$\varphi_{\Pi} = \arccos \left(\cos\varphi_0 - \frac{H\omega_p}{v_{\Pi}} \right), \quad (13)$$

а длина l_{np} дуги, на которой происходит процесс просеивания мелких частиц через решето, ограничена в пределах угла $\varphi_{np} = \varphi_{omp} - \varphi_{\Pi}$, где φ_{omp} - угол отрыва частицы от поверхности вращающегося решета скальператора, $\varphi_{omp} = \pi/2 + \arccos \omega_p^2 R_p / g$, рад.

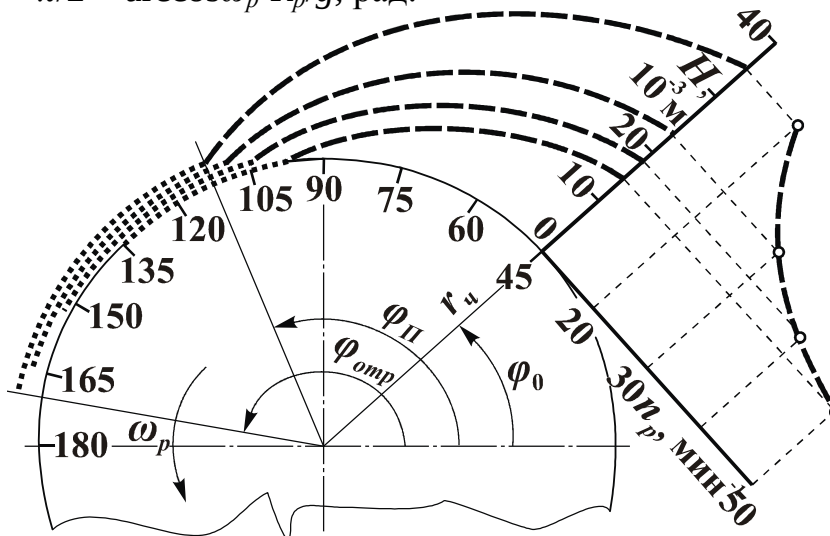


Рисунок 14 - Зависимости изменения толщины H зернового потока (---o---) над решетом, траектории (---) погружения мелкой частицы с поверхности зернового потока на поверхность решета и длины l_{np} дуги (-----) ее просеивания при различной частоте n_p вращения скальператора

Анализ полученных уравнений показывает, что

для скальператора с радиусом решета $R_p = 0,25$ м, углами установки питающего лотка $\alpha_1 = \alpha_0 = 45^\circ$ при очистке зерновой смеси наименьшей плотности $\rho_m = 0,5 \text{ т/м}^3$ и с удельной подачей $q_{y0} = 38,07 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ (рисунок 14) с увеличением

n_p значение H уменьшается, что увеличивает вероятность быстрого погружения мелких примесей к решетку и, соответственно, повышения им степени извлечения ψ_p данных примесей. Одновременно с этим снижаются значения $\varphi_{отр}$ и φ_{II} и уменьшается длина l_{np} дуги, на которой происходит процесс просеивания мелких частиц. При $n_p < 20 \text{ мин}^{-1}$ заметного увеличения l_{np} не происходит, а прохождение частиц через решето при больших φ_{II} значительно ухудшится вследствие уменьшения действия составляющей $mg \sin \varphi$ силы тяжести $\vec{G}$ частицы. Поэтому наибольшая степень извлечения ψ_p мелких примесей будет достигаться при $n_p = 20 \dots 40 \text{ мин}^{-1}$. Увеличение l_{np} , обуславливающее повышение ψ_p , возможно применением шарнирно установленной пластинки в форме дуги окружности радиуса $H + R_p$, которая должна касаться зернового потока в зоне угла $\varphi_{ск} = \pi/2 + \varphi_{отр} - \arcsin(\omega_p^2 R_p \sin \varphi_{отр} / g)$ начала скольжения зерна по поверхности решета скальператора (рисунок 15, г). Повышение скорости погружения частиц в зерновом потоке и увеличение l_{np} можно достичь также применением встряхивающего приспособления, характеризующегося амплитудой A и частотой Γ ударов его молоточка по решетку. Повышение ψ_p обеспечивается также качественной очисткой решета от застрявших примесей очистной щеткой, имеющей частоту вращения $n_{щ} < 200 \dots 240 \text{ мин}^{-1}$.

Проведенные теоретические изыскания привели к практическим рекомендациям выполнения поставленных задач исследований и позволяют разработать экспериментальные образцы зерноочистительных машин с более эффективным технологическим процессом.

В третьем разделе «**Программа, экспериментальные установки и методика исследований**» в соответствии с поставленными задачами изложена программа исследований, описаны экспериментальные установки, использованные приборы и оборудование, общепринятые и частные методики исследований и обработки экспериментальных данных.

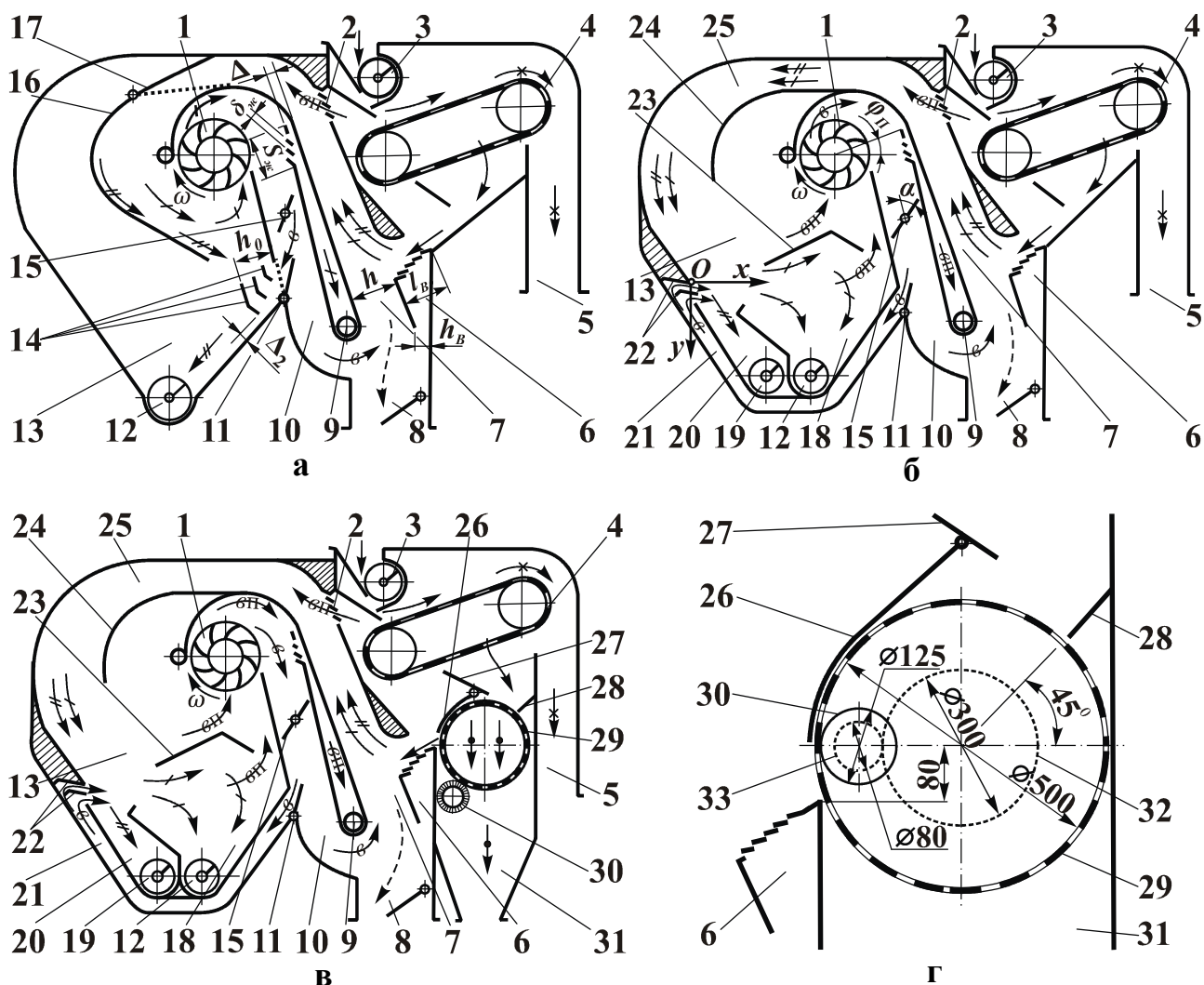
Исследования процесса очистки зернового вороха с выделением зерновых примесей в осадочной камере из фракции легких отходов и мелких примесей ЦР осуществляли на экспериментальных установках, технологические схемы которых представлены на рисунке 15.

Изучение процесса пневмофракционной обработки зернового вороха, процесса очистки зернового материала в замкнутой малогабаритной пневмосистеме с противоточным ДВ, замкнутом малогабаритном пневматическом сепараторе осуществляли на экспериментальных установках, технологические схемы которых приведены на рисунках 16, 17 и 18.

Исследования аэродинамических характеристик поворотных перфорированных заслонок проводили в сравнении с глухими поворотными заслонками, а блочной двухплечей заслонки - в сравнении с блочной консольной заслонкой в аэродинамической трубе и пневмосистеме экспериментальной установки (рисунок 15, б).

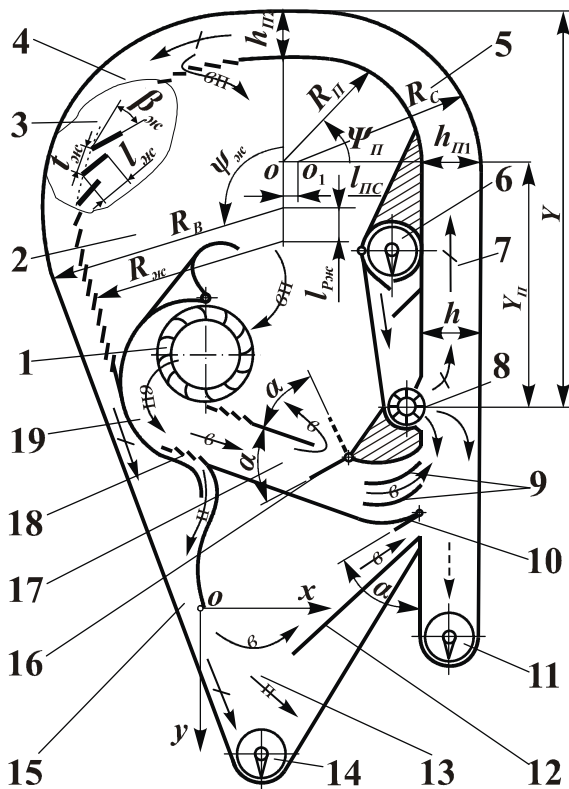
Влияние геометрических параметров (относительной длины $\tilde{L}_{ВП}$ верхней стенки и относительной глубины $\tilde{H}_{ВП}$) входного патрубка на работу противоточного ДВ изучалось на экспериментальной установке с использованием нагнетательной аэродинамической трубы.

Для проведения экспериментальных исследований и испытаний разработанных установок и машин использованы зерно пшеницы, ячменя, ржи, их зерновые смеси и древесный опил, применялись как стандартные, так и частные методики с применением серийных приборов и оборудования, а также собственного изготовления. При исследованиях применялись методы теории математического планирования эксперимента, статистические и численные методы с использованием вычислительной техники.



—> - обрабатываемый материал; —/—> - легкие примеси; —x—> - крупные и соломи-
стые примеси; —//—> - фракция фуражного зерна; —θ—> - воздушный поток; —θH—> - пы-
левоздушный поток; —●—> - мелкие примеси; - - -> - очищенный зерновой материал

Рисунок 15 - Технологические схемы экспериментальных установок для предвари-
тельной очистки зерна с выделением зерновых примесей из фракции легких отхо-
дов (а, б) и мелких примесей цилиндрическим решетом (в, г): 1 - диаметральный
вентилятор; 2 - жалюзийное окно; 3 - клапан-питатель; 4 - сетчатый транспортер; 5,
8, 12, 19, 31 - устройства вывода фракций; 6 - ПОУ ввода ПСК; 7, 10, 21, 25 - ПСК,
воздухоподводящий и перепускной каналы, ПТК; 9 - пылеотделитель; 11, 15 - пово-
ротная и регулировочная заслонки; 13 - осадочная камера; 14 - дефлекторы; 16, 17 -
направитель и его поворотная часть; 18, 20 - отсеки осаждения фракций; 22 - на-
правляющие пластины; 23 - осадитель; 24 - криволинейная плоскость; 26 - при-
жимная пластина; 27, 28 - подающий и питающий лотки; 29 - цилиндрическое ре-
шето; 30 - очистная щетка; 32, 33 - звездочки привода щетки



- - обрабатываемый материал;
- - воздушный поток;
- - пылевоздушный поток;
- - фракция легких примесей;
- - пыль;
- - очищенное зерно

Рисунок 18 - Технологическая схема экспериментальной установки замкнутого малогабаритного пневматического сепаратора: 1 - диаметральный вентилятор; 2, 19 - входной патрубок и выходной канал вентилятора; 3, 5, 7, 17 - отводной канал, ПТК, ПСК и воздухоподводящий канал; 4 - жалюзийный воздухоочиститель; 6 - приемно-загрузочный бункер; 8 - питающий валик; 9 - направляющие пластины; 10, 16 - регулировочные заслонки; 11, 14 - устройства вывода фракций; 12 - вихревой пылеосадитель; 13 - осадочная камера; 15 - патрубок ввода примесей; 18 - пылеотделитель

В четвертом разделе «*Экспериментальные исследования пневмофракционного технологического процесса и основных рабочих органов зерноочистительных машин*» представлены результаты исследований технологического процесса и основных рабочих органов зерноочистительных машин, работающих с повышенными скоростями воздушного потока и разделением материала на фракции полноценного, фуражного зерна и сорных примесей.

При исследовании процесса функционирования ПСК с ПОУ ввода (рисунок 15, а) реализована модель процесса, связывающая эффект E очистки и вынос P_3 полноценного зерна с наиболее важными факторами - относительным расходом $\mu_e(x_1)$ воздуха и коэффициентом $\mu_p(x_2)$ живого сечения решетки устройства ввода. Для исследований принят некомпозиционный ротатбельный план второго порядка, как наиболее выгодный по количеству опытов и получаемой информации в данном случае. Получены адекватные регрессионные модели при удельной зерновой нагрузке $q_{y\partial} = 38,07 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$, $h = 0,24 \text{ м}$, $h_B = 0,04 \text{ м}$, $l_B = 0,13 \text{ м}$ (F -критерий Фишера, вероятность $p = 0,95$), %:

$$Y_E = 73,5 + 15,166x_1 + 4,907x_2 - 7,0x_1^2 - 10,0x_2^2, \quad (14)$$

$$Y_{P_3} = 0,205 + 1,095x_1 - 0,015x_2 - 0,028x_1x_2 + 0,899x_1^2 + 0,197x_2^2. \quad (15)$$

Функция отклика Y_E при любом фиксированном значении x_1 с изменением x_2 имеет явный максимум при $\mu_p = 0,38$ ($x_2 = 0$), а функция отклика Y_{P_3} - заметный минимум. Наиболее эффективное функционирование ПСК ($E = 82\%$ и $P_3 = 2,2\%$) обеспечивается при $\mu_e = 1,0$ ($x_1 = 1$) и $\mu_p = 0,38$ ($x_2 = 0$).

Экспериментальные изыскания по определению оптимальных параметров входного окна пылеотделителя, расположенного в выходном канале ДВ (рисунки 15 и 18), осуществляли использованием однофакторного эксперимента, при-

менением метода симплексного планирования и реализацией трехфакторного почти ротatable плана Бокса-Бенкина второго порядка. В результате реализации планов и обработки опытных данных методом регрессионного анализа определены уравнения, связывающие параметры входного окна пылеотделителя с коэффициентом ε улавливания им примесей, а также режимов технологического процесса пневмосистемы. Зафиксировано максимальное значение критерия оптимизации $\varepsilon = 0,98$ для ДВ с $D_2 = 0,3$ и $0,4$ м при $\Delta = 0,02$ и $0,03$ м, $\varphi_{II} = 25^\circ$ ($\beta_{II} = 155^\circ$) в области $\delta_{жс} = 0,009...0,011$ м и $0,012...0,014$ м и $S_{жс} = 0,100...0,125$ м и $0,145...0,168$ м (рисунок 19).

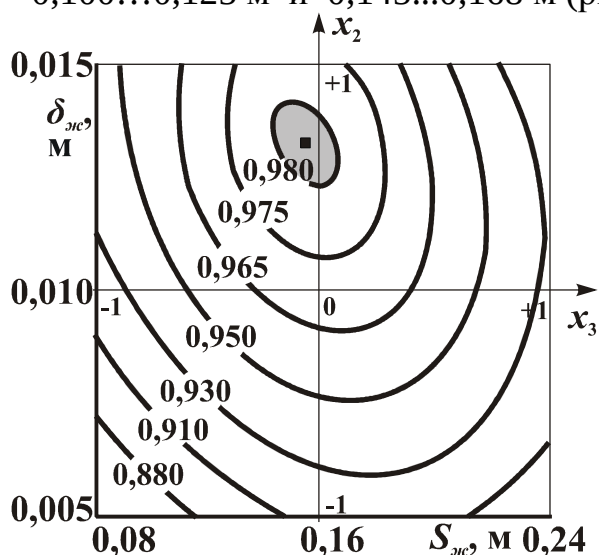


Рисунок 19 - Двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее ε от $\delta_{жс}$ и $S_{жс}$ при $\Delta = 0,03$ м : - область максимальных значений ($q_{y\partial} = 38,07$ кг/(с·м²) и $Q = 0,48$ м³/с)

При этом оптимальное отношение расхода воздуха Q_n , отводимого через пылеотделитель наружу из пневмосистемы, к расходу воздуха Q , проходящего через ДВ, составляет $0,08...0,10$, а зависимость коэффициента ψ полного давления от коэффициента ϕ' подачи воздуха ДВ имеет нисходящую

ветвь, что свидетельствует о стабильной подаче им воздуха в сеть установки.

В ходе экспериментальных изысканий по фракционированию легких отходов дополнительно подведенным в зону всасывающего окна ДВ воздушным потоком (рисунок 15, а) при $h_0 = 0,3$ м получена с именованными факторами поверхность отклика (рисунок 20), характеризующая зависимость содержания зерновых примесей a_1 в фуражной фракции от скорости v'_{cp} воздуха во входном окне с поворотной заслонкой и зазора Δ_2 , которая описывается адекватной моделью (множественный коэффициент корреляции составляет 0,99), %:

$$a_1 = -184,4 + 49,9v'_{cp} + 651,8\Delta_2 - 2,5v_{cp}^2 - 43,8v'_{cp}\Delta_2 - 7717,6\Delta_2^2. \quad (16)$$

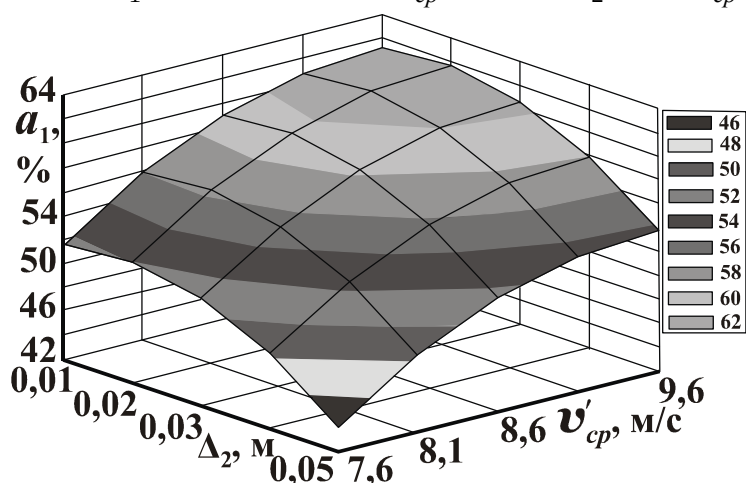


Рисунок 20 - Зависимость содержания a_1 зерновых примесей в фуражной фракции от скорости v'_{cp} воздушного потока и зазора Δ_2 ($q_{y\partial} = 38,07$ кг/(с·м²) и $Q = 0,48$ м³/с)

С увеличением v'_{cp} и уменьшением Δ_2 качество фракционирования отходов в осадочной камере улучшается вследствие повышения количества выносимых примесей воздушным потоком через ДВ. Максимальное значение $a_1 = 62\%$ при отсутствии потерь P_3 полноценного зер-

на в отходы отмечается при $\Delta_2 = 0,01$ м и $v'_{cp} = 9,6$ м/с.

При выделении зерновых примесей из фракции легких отходов воздушной струей, подведенной в зону выходного окна ПТК (рисунок 15, б), реализован трехфакторный почти ротатабельный план Бокса-Бенкина второго порядка: $x(x_1)$, $y(x_2)$ - координаты кромки разделительной стенки отсеков осаждения сорных примесей и фуражной фракции по оси x и y ; $v'_{cp}(x_3)$ - скорость воздушного потока в зоне фракционного разделения отходов. Полученные адекватные регрессионные модели (F -критерий Фишера, вероятность $p = 0,95$) содержания a_1 зерновых примесей в фуражной фракции, потерь полноценного Π_3 , мелкого и щуплого $\Pi_{щз}$ зерна в отходы (%)

$$Y_{a_1} = 79,0 - 3,25x_1 + 3,125x_2 + 5,625x_3 + 3,0x_1x_2 - 3,5x_1x_3 + 3,25x_2x_3 - 2,625x_1^2 - 4,375x_2^2 - 2,875x_3^2, \quad (17)$$

$$Y_{\Pi_3} = 0,019 - 0,008x_1 + 0,022x_2 + 0,032x_3 - 0,008x_1x_2 - 0,015x_1x_3 + 0,018x_2x_3 + 0,007x_2^2 + 0,034x_3^2, \quad (18)$$

$$Y_{\Pi_{щз}} = 0,294 - 0,123x_1 + 0,331x_2 + 0,481x_3 - 0,127x_1x_2 - 0,225x_1x_3 + 0,273x_2x_3 + 0,112x_2^2 + 0,516x_3^2 \quad (19)$$

анализировались методом построения двумерных сечений поверхности отклика. С точки зрения достижения максимального значения $a_1 = 80\%$ и наименьших потерь $\Pi_3 = 0,025...0,042\%$ оптимальные значения координат кромки разделительной стенки отсеков осаждения фракций составили $x = 0,21...0,23$ м ($x_1 = -(0,25...0,75)$) и $y = 0,160...0,175$ м ($x_2 = 0...0,36$) при $v'_{cp} = 8,5$ м/с ($x_3 = 0$). Потери $\Pi_{щз}$ незначительны - $0,35...0,65\%$. Эффективность осаждения примесей в рассматриваемой камере при работе в режиме фракционного разделения отходов составляет 90% , а при безфракционном их сборе и выводе - 97% , что свидетельствует о вполне удовлетворительной ее работе.

В ходе исследований процесса работы ПФСУ (рисунок 16) для определения конструктивных параметров наклонного ПСК и питающего валика с нижней подачей материала после ряда однофакторных экспериментов реализован при $g_{y\partial} = 8,6$ кг/(с·м) и $\Pi_3 = 0,05\%$ четырехфакторный план Бокса-Бенкина второго порядка: $H_B(x_1)$, $h(x_2)$, $\alpha_k(x_3)$ - высота верхней части, глубина и угол наклона ПСК; $n_B(x_4)$ - частота вращения питающего валика. Получены адекватные регрессионные модели рабочего процесса (F -критерий Фишера, вероятность $p = 0,95$) - общего эффекта $E_{общ}$ выделения легких примесей, эффекта E_{M1} выделения мелкого зерна и относительной массы a_2 фуражной фракции, %:

$$Y_{E_{общ}} = 65,49 + 4,67x_2 - 19,39x_3 - 1,95x_4 - 3,30x_1x_3 + 2,91x_2x_3 - 4,75x_3x_4 + 1,83x_1^2 + 3,01x_2^2 - 1,42x_3^2 + 1,54x_4^2, \quad (20)$$

$$Y_{E_{M1}} = 5,74 - 8,66x_1 - 6,39x_2 + 3,45x_3 + 2,51x_4 + 4,85x_1x_2 - 3,80x_1x_4 - 6,90x_2x_3 + 1,76x_3x_4 + 4,91x_1^2 + 3,33x_2^2 + 1,48x_3^2, \quad (21)$$

$$Y_{a_2} = 3,10 - 5,52x_1 - 4,21x_2 + 2,26x_3 + 1,66x_4 + 3,59x_1x_2 - 2,33x_1x_4 - 4,52x_2x_3 + 1,27x_3x_4 + 3,25x_1^2 + 2,35x_2^2 + 1,10x_3^2. \quad (22)$$

С помощью метода наложения двумерных сечений поверхностей отклика данных моделей (рисунок 21) и решения компромиссной задачи выбрано опти-

мальное сочетание конструктивных параметров наклонного ПСК и частоты вращения питающего валика с нижней подачей: $H_B = 0,05$ м ($x_1 = -1$); $h = 0,20$ м ($x_2 = -1$); $\alpha_K = 70^\circ$ ($x_3 = -0,5$) и $n_B = 140$ мин⁻¹ ($x_4 = 1$), обеспечивающих наилучшие показатели работы устройства $E_{общ} = 76,76\%$, $E_{M1} = 34,48\%$ и $a_2 = 22,27\%$.

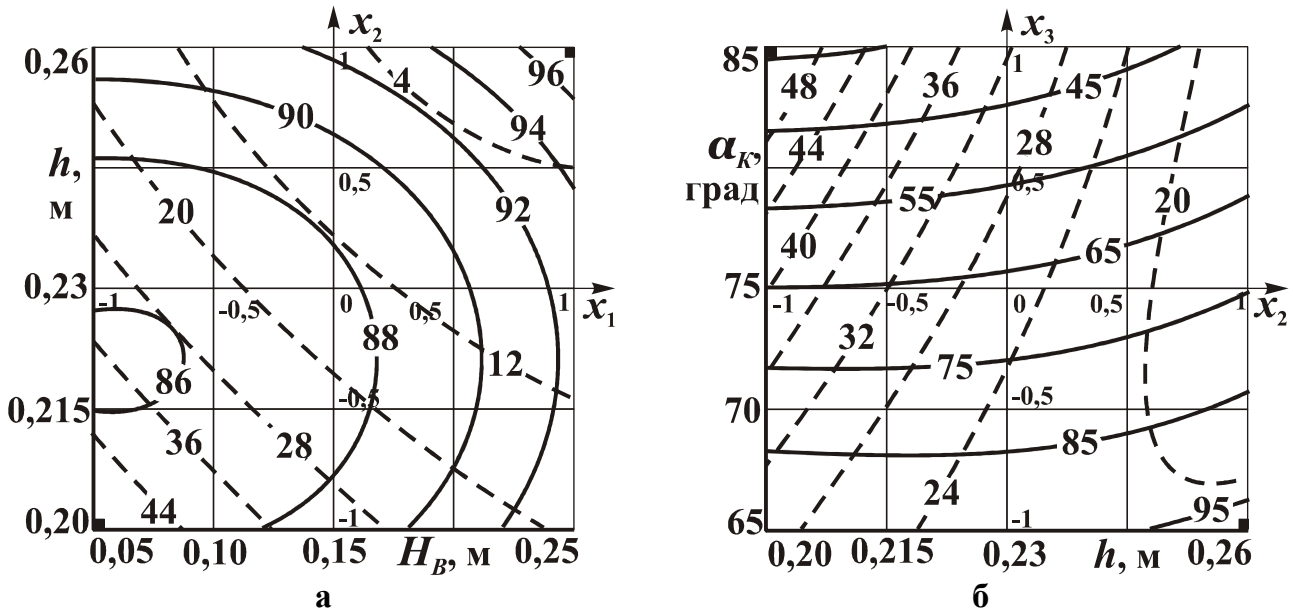


Рисунок 21 - Двумерные сечения поверхности отклика, характеризующие общий эффект $E_{общ}$ выделения легких примесей (—) и эффект E_{M1} выделения мелкого зерна (---): а - при $\alpha_K = 65^\circ$, $n_B = 140$ мин⁻¹ ($E_{общ}$) и $\alpha_K = 85^\circ$, $n_B = 140$ мин⁻¹ (E_{M1}); б - при $H_B = 0,25$ м, $n_B = 140$ мин⁻¹ ($E_{общ}$) и $H_B = 0,05$ м, $n_B = 140$ мин⁻¹ (E_{M1})

Проведенные исследования распределения компонентов зернового материала по глубине и высоте разделительной камеры ПФСУ при $g_{y\partial} = 8,6$ кг/(с·м) и $\Pi_3 = 0,05\%$ с помощью разработанного пробоотборника позволили уточнить координаты установки передней кромки отражательной плоскости (внутренней стенки ПК) из условия непопадания зерна в ПК и транспортирования через него большей части легких примесей: $Y_{II} = 0,47...0,55$ м; $h_{II} = 0,20...0,30$ м.

Для комплексного изучения взаимного влияния конструктивных параметров разделительной камеры (высоты H_B (x_1) верхней части ПСК, угла γ_{II} (x_2) наклона прямолинейной части отражательной плоскости и высоты H_C (x_3) смежной стенки между разделительной и осадочной камерами) на показатели рабочего процесса ПФСУ был принят и реализован план эксперимента Бокса-Бенкина второго порядка при $g_{y\partial} = 8,6$ кг/(с·м) и значении $\Pi_3 = 0,05\%$ с конструктивно-технологическими параметрами: $\alpha_K = 70^\circ$, $n_B = 140$ мин⁻¹, $Y_{II} = 0,50$ м, $h_{II1} = 0,20$ м, $h_{II2} = 0,14$ м, $R_{II} = 0,25$ м, $\psi_{II} = 70^\circ$, $l_{II} = 0,20$ м. Полученные адекватные по F -критерию Фишера с вероятностью $p = 0,95$ регрессионные модели пневмосепарации зернового материала в разделительной камере (%):

$$Y_{E_{общ}} = 92,14 + 0,59x_1 + 0,83x_2 - 1,85x_3 + 0,81x_2x_3 - 0,60x_2^2 - 0,95x_3^2; \quad (23)$$

$$Y_{E_{M1}} = 12,70 - 21,17x_1 - 2,23x_2 + 4,16x_3 + 2,71x_1x_2 - 2,46x_1x_3 + 11,29x_1^2; \quad (24)$$

$$Y_{a_2} = 7,25 - 13,21x_1 - 1,47x_2 + 2,75x_3 + 1,82x_1x_2 - 1,91x_1x_3 + 7,38x_1^2 \quad (25)$$

анализировались с помощью двумерных сечений поверхностей отклика. Опти-

мальными конструктивными параметрами разделительной камеры с отражающей плоскостью, обеспечивающими $E_{общ} = 92,61\%$, $E_{M1} = 46,11\%$, $a_2 = 28,19\%$, являются: $H_B = 0,05$ м ($x_1 = -1$), $\gamma_{II} = 0^\circ$ ($x_2 = 0$), $H_C = 0,40$ м ($x_3 = 0$).

Влияние удельной подачи $g_{y\partial}$, засоренности $З$ и влажности W обрабатываемого зернового материала на эффективность функционирования ПФСУ описываются линейными регрессионными моделями (%):

$$E = 65,640 - 0,429W - 0,00123 + 0,8017g_{y\partial}, \quad r = 0,964; \quad (26)$$

$$E_{общ} = 6,908 - 0,0505W + 0,00193 - 0,2257g_{y\partial}, \quad r = 0,914; \quad (27)$$

$$a_2 = 15,461 - 0,1899W - 0,00923 + 2,0267g_{y\partial}, \quad r = 0,988, \quad (28)$$

из которых следует, что увеличение $З$ от 5 до 20% не оказывает существенного влияния на процесс сепарации. Увеличение W от 14,0 до 31,5% на исследованных подачах $g_{y\partial} = 3,09 \dots 9,26$ кг/(с·м) приводит к снижению $E_{общ}$ на 0,7...1,5%, E на 6,6...9,7% и a_2 на 3,4...4,7%. При любой исследованной W и номинальной удельной подаче зернового материала в ПСК $g_{y\partial} = 7,72$ кг/(с·м) ПФСУ имеет эффект E очистки тяжелой фракции зерна от легких примесей не менее 50% при допустимых потерях $П_3$ полноценного зерна в отходы не более 0,05%.

Исследованиями рабочего процесса противоточного ДВ в нагнетательной аэродинамической трубе установлено, что варьирование относительной длины $\tilde{L}_{BII}$ верхней стенки входного патрубка не оказывает существенного влияния на аэродинамические показатели вентилятора, а при изменении его относительной глубины $\tilde{H}_{BII}$ зависимость полного давления от производительности $P_v = (Q)$ сохраняет свой монотонно-нисходящий характер, что свидетельствует о его стабильной работе. Оптимальная относительная глубина входного патрубка вентилятора составляет $\tilde{H}_{BII} = 1,83 \dots 2,23$. Исследования аэродинамических свойств вентилятора в замкнутой малогабаритной пневмосистеме (рисунок 17) при конструктивно необходимой относительной длине его верхней стенки $\tilde{L}_{BII} = 1,53$ и $\tilde{H}_{BII} = 2,23$ показали устойчивость его работы.

В результате проведенных однофакторных экспериментов, реализации трехфакторного почти ротatable-плана Бокса-Бенкина второго порядка и на основании полученных адекватных регрессионных моделей по оптимизации глубины первого h_1 , второго h_2 ПСК и дополнительного h_d канала замкнутой малогабаритной пневмосистемы с противоточным ДВ (рисунок 17) при коэффициенте $\mu_p = 0,38$ решетки ПОУ ввода ПСК, удельной зерновой нагрузке $g_{y\partial} = 0,81 \dots 3,03$ кг/(с·м) выявлено, что оптимальные значения факторов, обеспечивающих наибольший эффект очистки зерна в первом $E_{1II} = 59,8\%$, втором $E_{2II} = 55,6\%$ ПСК и потери $П_{3,1}$ полноценного зерна в отходы, не превышающие 0,5% при допустимом выносе $P_{3,2}$ полноценного зерна в фуражные отходы не более 1,5%, составляют: $h_1 = 0,1$ м, $h_d = 0,075$ м, $h_2 = 0,1$ м. Режимы наиболее эффективного регулирования пневмосистемы обеспечиваются двумя заслонками, установленными в отводе первого ПСК и в выходном окне осадочной камеры (рисунок 22). Настройка рабочего процесса осуществляется установкой скорости v_2 воздушного потока во втором ПСК заслонкой II, а затем в первом ПСК с помощью заслонки I.

Качество работы пневматического сепаратора (рисунок 18) зависит от от-

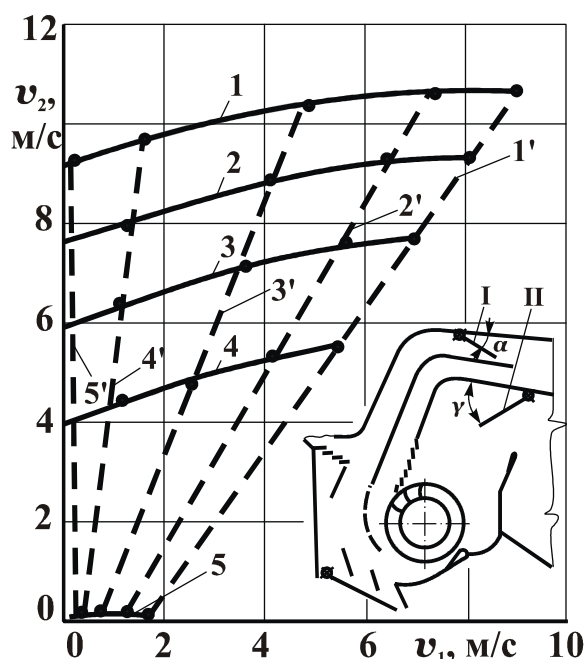


Рисунок 22 - Регулирование скорости воздуха в первом v_1 (—) и втором v_2 (---) ПСК замкнутой малогабаритной пневмосистемы: 1 и 2, 3, 4 - открытое и промежуточные положения заслонки II; 1' и 2', 3', 4' - открытое и промежуточные положения заслонки I

сутствия отложений на внутренней стенке ПТК частиц легких примесей. Для получения условия ускоренного перемещения частиц по поверхности внутренней стенки ПТК с целью исключения их осаждения были изучены эпюры скоростей v_6 воздушного потока на выходе из канала при разных значениях $h_{П2}/h_{П1}$. Варьирование отношения $h_{П2}/h_{П1}$ осуществлялось изменением радиуса $R_{П}$ окружности, описывающей поверхность внутренней стенки ПТК. Установлено, что при отношении $h_{П2}/h_{П1} = 0,78$ ($h_{П1} = 0,16$ м, $R_C = 0,45$ м, $h_{П2} = 0,125$ м, $R_{П} = 0,325$ м) скоростной режим в выходном сечении ПТК имеет явную равномерность. При средней скорости $v_{ср.вх}$ воздушного потока 9,02 м/с в данном сечении канала, необходимой для эффективного пылеотделения в ЖВ, коэффициент вариации v скорости $v_{вх}$ составляет 0,034.

При исследовании ЖВ ($t_{жсв} = 0,05$ м, $l_{жсв} = 0,05$ м, $\beta_{жсв} = 25^\circ$, $R_B = 0,8$ м) вслед-

ствие неоднозначного влияния на его рабочий процесс глубины $h_{вых}(x_1)$ его выходного патрубка и длины $S_{жсв}(x_2)$ криволинейной жалюзийной решетки для проведения практических исследований был применен центральный композиционный ротатальный план эксперимента для двух вышеперечисленных факторов как наиболее выгодный по количеству опытов и получаемой информации, способный предсказать значение параметра оптимизации с одинаковой точностью независимо от направления на равных расстояниях от центра плана. После реализации плана и обработки результатов эксперимента получена адекватная по F -критерию Фишера с вероятностью $p = 0,95$ регрессионная модель процесса очистки воздуха от примесей ЖВ (%):

$$y_{E_{жс}} = 98,34 + 0,032x_1 + 0,078x_2 - 0,720x_1^2 - 0,920x_2^2. \quad (29)$$

Полученная регрессионная модель (29) анализировалась методом построения двумерного сечения поверхности отклика, из которого следует, что максимальное значение параметра $E_{жс}$ оптимизации, равное 98,3%, достигается при $h_{вых} = 0,05$ м ($x_1 = 0,02$) и $S_{жсв} = 1,35$ м ($x_2 = 0,04$).

В процессе исследований рабочего процесса малогабаритной осадочной камеры замкнутого пневмосепаратора (рисунок 18) получена поверхность отклика (рисунок 23), характеризующая зависимость эффекта E_0 осаждения легких примесей от координат x и y расположения кромки пылеосадителя (множественный коэффициент корреляции 0,984), %:

$$E_0 = 81,92 + 115,750x + 4,032y - 215,774x^2 - 79,910y^2. \quad (30)$$

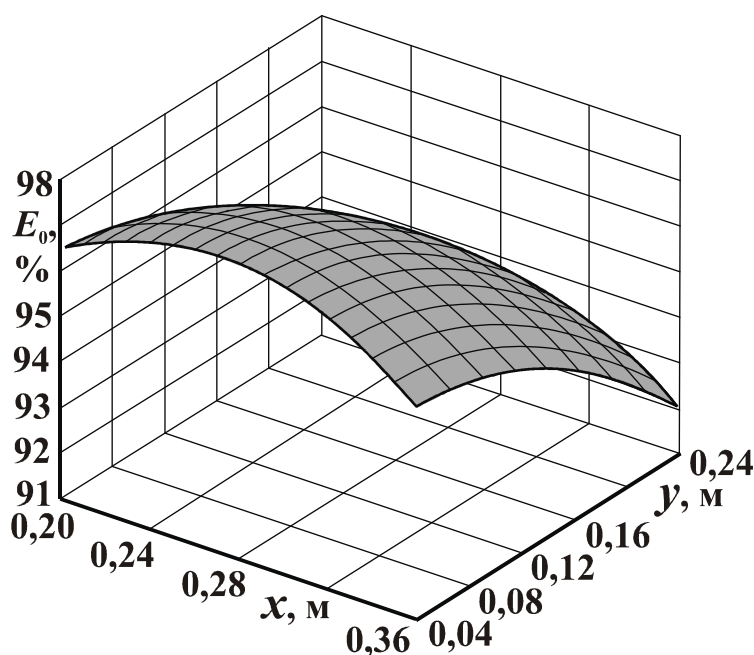


Рисунок 23 - Зависимость эффекта E_0 осаждения легких примесей в малогабаритной осадочной камере от расположения кромки пылеосадителя

Из полученного уравнения (30), описывающего поверхность параболоида, экстремум функции E_0 выражается из системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial f}{\partial y} = 0. \end{cases} \quad (31)$$

При этом вычисление производных по изучаемым параметрам, согласно уравнениям (31), показывает экстремум критерия оптимизации E_0 при $x = 0,27$ м и $y = 0,025$ м. Поставленный опыт при данном сочетании изучаемых факторов показал, что E_0 составил 97,3% ($H_{II} = 0,56$ м, $h_{ок} = 0,07$ м, $h_{ПО} = 0,1$ м).

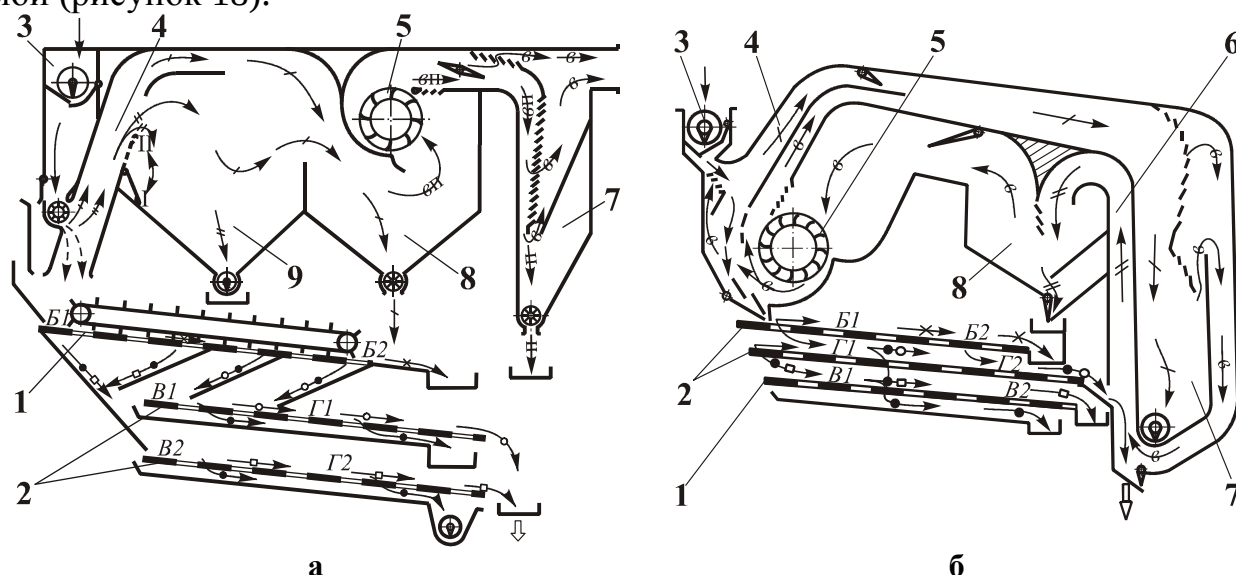
В результате исследований эффективности функционирования экспериментальной установки замкнутого малогабаритного пневмосепаратора установлено, что при скорости $v_{ср}$ воздушного потока 7 м/с в ПСК, зерновой нагрузке $g = 3,08$ кг/(с·м) эффект E очистки зерна от легких примесей составляет не менее 80%, а потери P_3 полноценного зерна в отходы - не более 3%, что соответствует агротехническим требованиям на машины, предназначенные для обработки зерна семенного назначения.

Аэродинамические свойства блочной двухплечей и перфорированных поворотных заслонок с наибольшим коэффициентом живого сечения 0,35 исследованы по плану однофакторного эксперимента в сравнении с глухими поворотными заслонками. Полученные регрессионные модели аэродинамических свойств поворотных заслонок показывают, что значение погрешности $\Delta\mu_6$ выбора режима работы с увеличением цены деления механизма управления ($\Delta\alpha$ и $\Delta\tilde{l}$) возрастают и при $\Delta\alpha = 10^0$ у перфорированных и блочной двухплечей заслонок ниже в 1,7...5,2 раза, чем у глухих и блочной консольной. Данные заслонки обеспечивают требуемую структуру воздушного потока и плавную настройку рабочего режима зерноочистительной машины.

Для выделения мелких примесей при предварительной обработке зернового вороха исследован рабочий процесс ЦР (скальператора) в сочетании с воздушной системой при расположении очистной щетки снаружи и внутри решета (рисунок 15, в и г). При использовании решета № 22 с продолговатыми отверстиями ЦР диаметром $D_p = 0,5$ м и $q_{y0} = 38,07$ кг/(с·м²) имеет максимальное значение $\psi_{II} = 29\%$ при следующих исследуемых параметрах: частоте вращения барабана скальператора $n_p = 30$ мин⁻¹ и очистной щетки $n_{щ} = 112$ мин⁻¹, частоте $\Gamma = 3$ Гц и амплитуде $A = 0,025$ м ударов молоточка встряхивающего устройства по решету. Потери P_3 полноценного зерна при этом составляют 0,022%.

Проведенные экспериментальные исследования привели к практическим рекомендациям, которые могут быть реализованы при конструировании новых зерно- и семяочистительных машин.

В пятом разделе «*Реализация результатов экспериментальных исследований пневмофракционного технологического процесса и основных рабочих органов зерноочистительных машин*» представлены результаты функционирования машин предварительной очистки зерна МПО-50П,-50Ф с выделением зерновых примесей из фракции легких отходов в осадочной камере и МПО-50Р с выделением мелких примесей цилиндрическим решетом (рисунок 15), машины предварительной очистки зерна МПО-25Ф с выделением фуражной фракции в разделительной камере (рисунок 24, а), зерноочистительной машины СВМ-7, снабженной замкнутой малогабаритной пневмосистемой с каналами до- и послерешетной аспирации и противоточным ДВ (рисунок 24, б), пневматического сепаратора ПС-10 с замкнутой малогабаритной пневмосистемой (рисунок 18).



—> - обрабатываемый материал; -----> - тяжелая фракция зерна; —> - фракция легких примесей; —> - фракция фуражного зерна; —> - пылевоздушный поток; —> - очищенный воздух; —> - пыль; —> - крупные примеси; —> - фракция мелкого зерна; —> - фракция крупного зерна; —> - мелкое зерно; —> - мелкие примеси; —> - крупное зерно; —> - очищенное зерно

Рисунок 24 - Технологические схемы машины предварительной очистки МПО-25Ф (а) и зерноочистительной машины для первичной очистки СВМ-7 (б): 1, 2 - решетные станы; 3 - приемное устройство с разравнивающим устройством; 4, 6 - пневмосепарирующие каналы; 5 - диаметральный вентилятор; 7 - пылеуловитель с выводным устройством; 8 - осадочная камера; 9 - разделительная камера

В результате исследований технологического процесса машин МПО-50П,-50Ф,-50Р на очистке зернового вороха пшеницы сорта Ленинградка с влажностью $W = 15...30\%$, засоренностью $З = 10\%$ и зерновой нагрузкой $q_{y\phi} = 7,61...38,06 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ обеспечивается вынос P_3 части полноценного зерна, наименее ценного по биологическим и семенным свойствам, вместе с легкими примесями в осадочную камеру в объеме $3...16\%$. Максимальные значения содержания a_1 зерновых примесей в фуражной фракции при работе машины

МПО-50П с удельной зерновой нагрузкой $q_{yd} = 38,06 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ составляют 60...62% при $E \geq 50\%$ и отсутствии потерь P_3 полноценного зерна в отходы, а у машины МПО-50Ф $E = 63...78\%$, $a_1 = 78...81\%$ при $P_3 = 0,02...0,03\%$. Извлечение в машине МПО-50Р скальператором мелких сорных примесей из очищаемого материала до поступления его в ПСК повышает эффект E выделения примесей на 10...13% в сравнении с работой машины без скальператора при суммарных потерях P_3 полноценного зерна не более 0,043%.

Производственные испытания машины МПО-50Ф в поточной линии зерноочистительного агрегата ЗАВ-25 СПК Лекминский Кировской области на очистке вороха овса сорта Сельма, пшеницы сорта Ленинградка, ржи сорта Вятка 2, ячменя сорта Абава 2, имеющих влажность $W = 24...32\%$ и засоренность $3 \leq 10\%$, свидетельствуют, что при $q_{yd} = 38,06 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ $E = 65...72\%$, $a_1 = 79...84\%$, а $P_3 \leq 0,02\%$. Результаты исследований по совершенствованию технологического процесса и рабочих органов машин МПО-50П, -50Ф, -50Р переданы в ОАО ГСКБ «Зерноочистка» (г. Воронеж) для использования при разработке новых машин предварительной очистки зерна.

По результатам исследований в производственных условиях СПК «Знамя Ленина» Кировской области и государственных испытаний пневмосистема машины предварительной очистки зерна МПО-25Ф при $P_3 = 0,05\%$ на очистке овса сорта Улов, пшеницы сорта Иргина, ржи сорта Кировская 89, ячменя сорта Зазерский 85 засоренностью $3 = 0,69...15,7\%$ имеет в режиме работы по фракционной технологии $E = 73,6...94,7\%$ и $E = 45,5...78,1\%$ - в режиме работы по поточной технологии. Полнота E_{np} выделения примесей на очистке данных культур при работе всей машины по фракционной технологии составляет 39,5...82,8%, а при работе по поточной технологии - 36,4...68,12%. При обработке зернового вороха по фракционной технологии в сушилку семенного зерна поступает более чистое зерно ($Ч = 96,04...99,58\%$) по сравнению с работой по поточной технологии ($Ч = 94,99...99,37\%$). По результатам государственных приемочных испытаний ФГУ «Кировская МИС» рекомендует поставить ее на производство.

Проведенные в хозяйственных условиях Ботанического сада Вятской ГСХА испытания машины СВМ-7 на очистке зерновой смеси овса сорта Сельма и ржи сорта Вятка 2 засоренностью $3 = 2,06...2,60\%$ при $P_3 \leq 0,5\%$ выявили, что $E_{np} = 65,43...76,83\%$. Очищенное зерно овса ($Ч = 97,0...98,8\%$) и ржи ($Ч = 98,2...99,0\%$) по чистоте соответствует нормам ограничительных кондиций на продовольственное зерно и относится к категории РС и РС_Т (репродукционные семена). По сравнению с аналогичной машиной СВУ-5А разработанная машина СВМ-7 имеет в 1,2 раза большую производительность, в 1,6 раза меньшую удельную энергоемкость N_{yd} и в 1,23 раза - удельную металлоемкость. По результатам исследований в ОАО «Малмыжский завод по ремонту дизельных двигателей» Кировской области разработана техническая документация для выпуска опытной партии машин СВМ-7 для сельскохозяйственных предприятий.

Проведенные производственные испытания пневмосепаратора ПС-10 в поточной технологической линии фермерского хозяйства «Надежда» Респуб-

лики Марий Эл на очистке зерновой смеси ржи сорта Чулпан и овса сорта Скакун засоренностью $З = 1,3...1,5\%$ при $q = 3,1...12,9$ т/ч и $П_3 = 3\%$ показали, что эффект E очистки зерна от легких примесей составляет $53,3...66,9\%$, эффект E_1 выделения щуплого зерна - $14,3...45,5\%$. По содержанию семян основной культуры машина за один проход обеспечивает качество семенного материала, соответствующее для ржи ($Ч = 98,5...99,0\%$) нормам категорий ЭС (элитные семена) и овса ($Ч = 98,1...98,6\%$) - РС (репродукционные семена). В сравнении с замкнутым пневмосепаратором ПС-15, являющимся ближайшим аналогом по конструктивному исполнению, разработанный пневмосепаратор ПС-10 имеет в 1,58 раза меньшую удельную энергоемкость $N_{уд}$ и меньшую в 1,07 раза удельную металлоемкость.

В шестом разделе *«Экономическая и энергетическая эффективность внедренных в производство разработок и предложения по совершенствованию технологического процесса зерноочистительных машин»* определена эффективность применения машины предварительной очистки зерна МПО-50Ф в технологической линии зерноочистительного агрегата ЗАВ-25, машины предварительной очистки зерна МПО-25Ф в составе зерноочистительно-сушильного комплекса КЗС-25Ш, зерноочистительной машины СВМ-7, пневмосепаратора ПС-10 в поточных зерноочистительных линиях и приведены основные технические решения, направленные на совершенствование технологического процесса для вновь разрабатываемых зерноочистительных машин.

Экономическая эффективность использования машины МПО-50Ф с фракционированием легких отходов в осадочной камере, проведенная в сравнении с машиной предварительной очистки зерна МПО-50, достигается за счет повышения качества очистки зерна, снижения его потерь в отходы, экономии затрат энергии за счет обработки выделенной фуражной фракции отдельно от семенного зерна и составляет 238,1 тыс. рублей в год (в ценах 2010 г.), а срок окупаемости затрат - 1,4 года.

Для оценки достоинства машины МПО-25Ф, работающей по пневмофракционной технологии, расчет экономической эффективности ее применения проведен в сравнении с машиной предварительной очистки того же класса по производительности МЗУ-25/15, но работающей по поточной технологии. Годовой экономический эффект от применения машины МПО-25Ф составляет 242,8 тыс. рублей (в ценах 2010 г.) и обусловлен повышением качества очистки зерна и тем, что выделенная данной машиной фракция фуражного зерна сушится при более жестких тепловых режимах, чем семенное зерно, что приводит к экономии затрат энергии. Срок окупаемости произведенных затрат - 1,4 года.

Экономический эффект от применения машины СВМ-7 в поточной зерноочистительной линии в сравнении с универсальной семяочистительной воздушно-решетной машиной СВУ-5А обусловлен повышением пропускной способности, снижением удельного расхода электроэнергии при выполнении технологического процесса и металлоемкости и составляет 196,9 тыс. рублей в год (в ценах 2010 г.). Срок окупаемости произведенных затрат - 1,6 года.

Использование в составе поточной технологической линии мини-зерноток пневмосепаратора ПС-10 дает малому фермерскому хозяйству годо-

вой экономический эффект 81,038 тыс. рублей (в ценах 2010 г.), а срок окупаемости составляет 1,7 года. Положительный экономический эффект от применения данной машины в сравнении с ближайшим аналогом ПС-15 обусловлен снижением расхода электроэнергии при выполнении технологического процесса и металлоемкости при ее изготовлении.

Расчеты энергетической эффективности внедренных технических средств послеуборочной обработки зерна в поточные линии показывают, что уровень интенсификации в сравнении с базовыми машинами составляет 12,0...46,2%.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований для использования при создании перспективных зерноочистительных машин предложен ряд технических решений, направленных на повышение эффективности сепарации зернового материала за счет предварительного его расслоения перед вводом в ПСК, расширение возможности использования ДВ в пневмосепараторах, увеличение диапазона равномерного регулирования скорости воздуха и придания необходимой его структуры в зоне сепарации, снижение удельной энерго- и металлоемкости машин и улучшение санитарно-гигиенических условий труда обслуживающего персонала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа научных исследований установлено, что повышение эффективности функционирования зерноочистительных машин с минимальными материальными затратами можно достичь применением в них пневмофракционных технологий при использовании высоких скоростей воздушного потока в зоне сепарирования с последующим выделением тяжелой и фуражной фракций, а также совершенствованием основных рабочих органов: диаметральных вентиляторов, устройств ввода материала в ПСК, регулирования скорости воздушного потока и очистки отработанного воздуха в пневмосистеме, ПТК и цилиндрических решет.

2. Получены аналитические зависимости, позволяющие выбрать конструктивно-технологические параметры основных рабочих органов зерноочистительных машин: ПОУ ввода ПСК ($\mu_p = 0,2...0,4$), наклонного ПСК ($H_B = 0,135...0,140$ м для $h = 0,20...0,25$ м) и разделительной камеры ПФСУ ($Y_{II} = 0,48...0,65$ м при $h(h_{II}) = 0,20...0,25$ м и $h_{II2}/h_{II1} = 0,7...0,9$; $H_C = 0,30...0,50$ м), криволинейного ПТК ($h_{II2}/h_{II1} = 0,7...0,8$), осадочной камеры при фракционировании легких отходов ($x = 0,20...0,28$ м; $y = 0,13...0,20$ м) и осаждении примесей ($x = 0,24...0,36$ м; $y = 0,08...0,24$ м), входного окна пылеотделителя и его расположения в выходном канале ДВ ($\beta_{II} = 150...190^\circ$), ЖВ с криволинейным отводным каналом ($h_{ex} = 0,112...0,128$ м, $h_{вых} \geq 0,011...0,026$ м, $S_{жв} = 1,57...1,97$ м), входного патрубка противоточного ДВ ($0,90 < \tilde{H}_{ВП} < 2,43$, $\tilde{H}_{ВП} \geq 1,1$), ЦР для выделения мелких примесей ($n_p = 20...40$ мин⁻¹, $n_{ц} < 200...240$ мин⁻¹).

3. Разработана технологическая схема машины предварительной очистки зерна, содержащей приемную часть, снабженную сетчатым транспортером и размещенным под ним ЦР для выделения мелких примесей, и пневмосистему, включающую ДВ с расположенным в его выходном канале пылеотделителем с жалюзийным входным окном, воздухоподводящий и пневмосепарирующий с

ПОУ ввода каналы, осадочную камеру, оборудованную устройством для выделения зерновых примесей из фракции легких отходов, регулировочную заслонку и устройства вывода фракций.

Получены регрессионные модели процесса функционирования разработанной машины, из которых следует, что наиболее эффективное функционирование ПСК с ПОУ ввода обеспечивается при $\mu_p = 0,38$ и $\mu_e = 1,0$ ($E = 82\%$, $P_3 = 2,2\%$). Оптимальные параметры входного окна пылеотделителя для ДВ с $D_2 = 0,4$ м составляют $\Delta = 0,03$ м, $\delta_{жс} = 0,012$ м, $S_{жс} = 0,16$ м, $\beta_{П} = 155^\circ$. Максимальное значение $a_1 = 80\%$ ($P_3 \leq 0,05\%$) достигается при использовании воздушной струи в зоне выходного окна ПТК с параметрами размещения кромки разделительной стенки отсеков осаждения фракций $x = 0,21...0,23$ м и $y = 0,160...0,175$ м. Максимальная степень извлечения мелких примесей скальператором ($D_p = 0,5$ м, $\Gamma = 3$ Гц, $A = 0,025$ м, $q_{y\partial} = 38,07$ кг/(с·м²) с использованием пробивного решета № 22 продолговатыми отверстиями составляет $\psi_p = 29\%$ ($P_3 = 0,022\%$) при $n = 30$ мин⁻¹ и $n_{щ} = 112$ мин⁻¹.

4. Разработано ПФСУ машины предварительной очистки зерна, включающее ДВ, наклонный ПСК, разделительную и осадочную камеры, ПК, дроссельную заслонку, устройства для ввода зернового материала и вывода его фракций и инерционный жалюзийно-противоточный пылеуловитель.

Получены регрессионные модели процесса функционирования данного устройства, по которым определены оптимальные конструктивно-технологические параметры наклонного ПСК и разделительной камеры с нижней подачей зернового материала питающим валиком: $H_B = 0,05$ м; $h = 0,20$ м; $\alpha_K = 70^\circ$; $H_C = 0,40$ м; $n_B = 140$ мин⁻¹; $h_{П} = 0,20$ м; $Y_{П} = 0,50$ м; $l_{П} = 0,20$ м; $\gamma_{П} = 0^\circ$. При этом относительная масса фуражной фракции составляет $a_2 = 28,2\%$ при $P_3 = 0,05\%$.

5. Разработана замкнутая малогабаритная пневмосистема зерноочистительной машины, включающая две пневмосепарирующие системы, содержащие противоточный ДВ, первый и второй ПСК, ПТК, дополнительный и воздухоподводящий каналы, осадочную камеру, инерционный жалюзийный пылеуловитель, регулировочные заслонки, загрузочные и выводные устройства.

Получены регрессионные модели функционирования разработанной пневмосистемы и определены ее оптимальные конструктивно-технологические параметры: $h_1 = 0,1$ м, $h_2 = 0,1$ м, $h_{Д} = 0,75$ м; $\tilde{H}_{ВП} = 1,83...2,23$, $\tilde{L}_{ВП} = 1,53$. Выявлены режимы наиболее эффективного регулирования пневмосистемы при помощи двух регулировочных заслонок, установленных в отводе первого ПСК и в выходном окне осадочной камеры.

6. Разработана технологическая схема замкнутого малогабаритного пневмосепаратора, содержащего ДВ с пылеотделителем в его выходном канале, ПСК, воздухоподводящий канал и криволинейный ПТК, установленный во входном патрубке вентилятора ЖВ с криволинейным отводным каналом, осадочную камеру, которая сообщается с пылеотделителем и ЖВ через их выводные патрубки, а также с ПСК через перепускное окно.

Получены регрессионные модели процесса функционирования разработанного пневмосепаратора и определены оптимальные конструктивно-техноло-

гические параметры криволинейного ПТК ($h_{П2} = 0,125$ м, $R_{П} = 0,325$ м, $h_{П2}/h_{П1} = 0,78$), ЖВ с криволинейным отводным каналом ($h_{ex} = 0,125$ м, $R_B = 0,8$ м, $h_{вых} = 0,05$ м, $S_{жсв} = 1,35$ м), жалюзийного входного окна пылеотделителя для ДВ с $D_2 = 0,3$ м ($\Delta = 0,02$ м, $\beta_{П} = 155^\circ$, $\delta_{жс} = 0,01$ м и $S_{жсв} = 0,12$ м), малогабаритной осадочной камеры ($H_{П} = 0,56$ м, $x = 0,24...0,32$ м при $y = 0,025...0,08$ м).

7. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено согласно полученным регрессионным моделям, что значение погрешности $\Delta\mu_e$ выбора режима работы у перфорированных и блочной двухплечей заслонок с увеличением цены деления механизма управления $\Delta\alpha$ и $\Delta\tilde{I}$ возрастают и при $\Delta\alpha = 10^\circ$ ниже в 1,7...5,2 раза, чем у глухих и блочной консольной. Данные заслонки обеспечивают требуемую структуру воздушного потока и плавную настройку рабочего режима зерноочистительной машины.

8. Разработаны машины предварительной очистки зерна МПО-50П,-50Ф,-50Р с фракционированием легких отходов в осадочной камере и выделением мелкой фракции ЦР. Максимальные значения a_1 при работе машины МПО-50П с $q_{yd} = 38,06$ кг/(с·м²) составляют 60...62% при $E \geq 50\%$ и отсутствии потерь $П_3$ полноценного зерна в отходы, а у машины МПО-50Ф эффект $E = 63...78\%$, $a_1 = 78...84\%$ при $П_3 = 0,02...0,03\%$. Извлечение в машине МПО-50Р скальператором мелких сорных примесей из очищаемого материала до поступления его в ПСК повышает эффект E выделения примесей на 10...13% в сравнении с работой машины без скальператора при $П_3 \leq 0,043\%$.

Разработана машина предварительной очистки зерна МПО-25Ф, работающая по пневмофракционной технологии. При обработке зернового вороха по фракционной технологии в сушилку семенного зерна поступает более чистое зерно ($Ч = 96,04...99,58\%$) по сравнению с работой по поточной технологии ($Ч = 94,99...99,37\%$), что повышает производительность в технологической линии комплекса последующих машин, их более эффективное использование и снижает затраты на обработку зернового материала и повышает качество семян.

Разработана зерноочистительная машина СВМ-7, оборудованная замкнутой пневмосистемой с каналами до- и послерешетной аспирации и противоточным ДВ, которая по сравнению с машиной СВУ-5А имеет в 1,2 раза большую производительность, в 1,6 раза меньшую удельную энергоемкость и в 1,23 раза - удельную металлоемкость. Имеет полноту выделения примесей $E_{np} = 65,43...76,83\%$ при $П_3 \leq 0,5\%$.

Разработан замкнутый пневматический сепаратор ПС-10, который в сравнении с замкнутым пневмосепаратором ПС-15, являющимся ближайшим аналогом по конструктивному исполнению, имеет в 1,58 раза меньшую удельную энергоемкость и в 1,07 раза удельную металлоемкость. Пневмосепаратор ПС-10 обеспечивает при подачах $q = 3,1...12,9$ т/ч эффект E очистки зерна от легких примесей 53,3...66,9%, эффект E_1 выделения щуплого зерна 14,3...45,5% при $П_3 = 3\%$.

9. Разработанные с участием автора зерноочистительные машины успешно прошли производственную проверку и испытания. Суммарный годовой экономический эффект от внедренных в производство зерноочистительных машин МПО-50Ф, МПО-25Ф, СВМ-7, ПС-10 в поточные зерноочистительные линии

по приведенным затратам и от изменения качества продукции составляет 758,84 тыс. рублей (в ценах 2010 г.), срок окупаемости затрат - 1...2 года. Индекс изменения прямых затрат на единицу продукции составляет 0,31...0,70. Уровень интенсификации использования разработанных машин в сравнении с базовыми МПО-50, МЗУ-25/15, СВУ-5А, ПС-15 равен 12,0...46,2%.

Предложенные аналитические зависимости процессов очистки зернового вороха, технические средства послеуборочной обработки зерна представлены в завершенном виде, пригодном для широкого практического применения. Результаты, полученные при решении поставленной научной проблемы, явились основой для выработки рекомендаций по совершенствованию технологического процесса зерноочистительных машин. Для дальнейших исследований и создания зерноочистительных машин с более эффективным технологическим процессом предложены оригинальные технические решения, защищенные охраняемыми документами Роспатента.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Монографии и рекомендации для науки, производства и образования

1. Разработка и совершенствование малогабаритных пневмосепараторов с замкнутым циклом воздушного потока: монография / В.Е. Саитов, В.Г. Фарафонов, А.Н. Суворов, Д.В. Григорьев. - Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2012. - 209 с.
2. Саитов, В.Е. Совершенствование технологического процесса воздушно-решетных зерно- и семяочистительных машин (рекомендации) / В.Е. Саитов. - Киров: Вятская ГСХА, 2008. - 87 с.
3. Саитов, В.Е. Инновации в послеуборочной обработке зернового материала: монография / В.Е. Саитов. - Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. - 150 с.
4. Саитов, В.Е. Исследование процессов в рабочих органах сепараторов зерна: монография / В.Е. Саитов, В.Г. Фарафонов, А.Н. Суворов. - Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. - 200 с.
5. Сычуглов, Н.П. Повышение эффективности функционирования семяочистительных машин путем совершенствования рабочих органов пневмосистем: монография / Н.П. Сычуглов, В.Е. Саитов, Р.Г. Гатауллин. - Киров: ФГОУ ВПО Вятская ГСХА, 2006. - 193 с.
6. Физико-математическое моделирование процессов разделения зерновых материалов для повышения эффективности функционирования зерно- и семяочистительных машин: монография / В.Е. Саитов, В.Г. Фарафонов, А.Н. Суворов, С.В. Синяков. - Киров: ФГОУ ВПО Вятская ГСХА, 2011. - 176 с.

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ

7. Бурков, А.И. Машина для пневмофракционной технологии обработки зернового вороха / А.И. Бурков, А.Л. Глушков, В.Е. Саитов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2008. - № 11. - С. 3-6.
8. Саитов, В.Е. Совершенствование машины предварительной очистки зерна / В.Е. Саитов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2007. - № 4. - С. 17-20.
9. Саитов, В.Е. Математическое моделирование разделения воздушным потоком отходов при очистке зерна / В.Е. Саитов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2007. - № 5. - С. 39-41.
10. Саитов, В.Е. Совершенствование приемного отделения зерноочистительного агрегата / В.Е. Саитов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2007. - № 12. - С. 10.
11. Саитов, В.Е. Снижение запыленности воздуха при обработке и хранении зерна / В.Е. Саитов // Хранение и переработка сельхозсырья. - 2007. - № 11. - С. 15-18.
12. Саитов, В.Е. Регулирование скорости воздуха в пневмосистеме зерноочиститель-

ных машин / В.Е. Саитов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2008. - № 3. - С. 38-39.

13. Саитов, В.Е. Математическое моделирование движения частиц в выхлопном диффузоре диаметрального вентилятора / В.Е. Саитов // Техника в сельском хозяйстве. - 2008. - № 2. - С. 11-13.

14. Саитов, В.Е. Оптимизация параметров пневмосепарирующего канала зерноочистительной машины / В.Е. Саитов, Р.Г. Гатауллин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2008. - № 5. - С. 38-40.

15. Саитов, В.Е. Экологические вопросы на зерноперерабатывающих предприятиях / В.Е. Саитов, Р.Г. Гатауллин // Хранение и переработка сельхозсырья. - 2009. - № 6. - С. 75-78.

16. Саитов, В.Е. Моделирование разделения зернового материала в наклонном пневмосепарирующем канале / В.Е. Саитов, В.Г. Фарафонов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2010. - № 6. - С. 3-5.

17. Саитов, В.Е. Техничко-экономическая эффективность применения зерноочистительных машин / В.Е. Саитов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2010. - № 9. - С. 6-7.

18. Саитов, В.Е. Конструктивно-технологические параметры скальператора / В.Е. Саитов, В.Г. Фарафонов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2010. - № 10. - С. 47-48.

19. Саитов, В.Е. Исследование процесса очистки цилиндрического решета при выделении мелких примесей / В.Е. Саитов, В.Г. Фарафонов, С.В. Синяков // Техника в сельском хозяйстве. - 2011. - № 1. - С. 3-6.

20. Саитов, В.Е. Распределение компонентов зернового материала на решетке пневмоожигающего устройства / В.Е. Саитов, А.Н. Суворов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2011. - № 1. - С. 31-33.

21. Саитов, В.Е. Определение параметров криволинейного пневмотранспортирующего канала малогабаритного пневмосепаратора / В.Е. Саитов, В.Г. Фарафонов, Д.В. Григорьев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2011. - № 4. - С. 9-11.

22. Саитов, В.Е. Обоснование параметров пылеотводящего канала сепарирующего устройства зерноочистительной машины / В.Е. Саитов, В.Г. Фарафонов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2011. - № 11. - С. 20-21.

23. Саитов, В.Е. Применение статистического метода к фракционированию легких отходов в осадочной камере / В.Е. Саитов, В.Г. Фарафонов, А.Н. Суворов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2011. - № 6. - С. 30-33.

24. Саитов, В.Е. Малогабаритная машина для первичной очистки зерна / В.Е. Саитов, Р.Г. Гатауллин // Техника в сельском хозяйстве. - 2011. - № 4. - С. 7-10.

25. Саитов, В.Е. Устройство для параметров воздушного потока в пневмосистеме зерноочистительной машины / В.Е. Саитов, Д.В. Григорьев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2011. - № 11. - С. 21-22.

26. Саитов, В.Е. Основные параметры конструкции малогабаритной осадочной камеры / В.Е. Саитов, Д.В. Григорьев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2012. - № 1. - С. 16-18.

27. Саитов, В.Е. Исследование процесса отделения примесей в криволинейном отводном канале жалюзийного воздухоочистителя / В.Е. Саитов, В.Г. Фарафонов, А.Н. Суворов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2012. - № 1. - С. 3-5.

28. Саитов, В.Е. Замкнутый малогабаритный пневматический сепаратор для очистки зерна / В.Е. Саитов, Д.В. Григорьев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2012. - № 7. - С. 15-18.

29. Саитов, В.Е. Конструкционно-технологические параметры жалюзийного воздухоочистителя с криволинейным отводным каналом / В.Е. Саитов, В.Г. Фарафонов, А.Н. Суворов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2012. - № 11. - С. 35-38.

30. Саитов, В.Е. Регулирование скорости воздушного потока в пневмосепарирующем

канале дроссельным устройством / В.Е. Саитов, В.Г. Фарафонов, А.Н. Суворов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2012. - № 5. - С. 6-8.

Статьи в материалах международных конференций

31. Саитов, В.Е. Повышение эффективности очистки зерна использованием максимальных свойств воздушного потока / В.Е. Саитов // Problem recykling : V Międzynarodowa Konferencja Naukowa-Techniczna. - Warszawa, 2007. - P. 338-348.

32. Саитов, В.Е. Оптимизация конструктивно-технологических параметров первого пневмосепарирующего и дополнительного каналов замкнутой малогабаритной пневмосистемы / В.Е. Саитов, Р.Г. Гатауллин // Problemy intensyfikacji produkcji zwierzęcej z uwzględnieniem ochrony środowiska i standardów UE: XIV Międzynarodowa Konferencja Naukowa. - Warszawa, 2008. - P. 71-79.

33. Саитов, В.Е. Разработка устройства для измерения параметров запыленного воздушного потока / В.Е. Саитов, Д.В. Григорьев // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. Мосоловские чтения: материалы XI Международ. науч.-практ. конф. - Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2009. - С. 242-249.

34. Саитов, В.Е. Анализ технологического процесса вращающегося цилиндрического решета (скальператора) с наружной рабочей поверхностью при выделении мелких примесей / В.Е. Саитов, В.Г. Фарафонов // Problemy intensyfikacji produkcji zwierzęcej z uwzględnieniem ochrony środowiska i standardów UE: XV Międzynarodowa Konferencja Naukowa. - Warszawa, 2009. - P. 150-157.

35. Саитов, В.Е. Анализ процесса поступления зернового материала в пневмосепарирующий канал применением пневмоожижающего устройства ввода / В.Е. Саитов, А.Н. Суворов // Problemy intensyfikacji produkcji zwierzęcej z uwzględnieniem ochrony środowiska i standardów UE: XV Międzynarodowa Konferencja Naukowa. - Warszawa, 2009. - P. 139-149.

36. Саитов, В.Е. Анализ режимов движения зерна в зоне сепарации по стенке, расположенной напротив питающего устройства / В.Е. Саитов, В.Г. Фарафонов // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики. Материалы I Международ. науч.-практ. конф. «Наука-Технология-Ресурсосбережение»: сб. науч. тр. - Киров: Вятская ГСХА, 2009. - Вып. 9. - С. 219-223.

37. Саитов, В.Е. Оптимизация геометрических параметров входного окна пылеотделителя с жалюзийным участком / В.Е. Саитов, Д.В. Григорьев // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики. Материалы III Международ. науч.-практ. конф. «Наука-Технология-Ресурсосбережение», посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.М. Гуревича: сб. науч. тр. - Киров: Вятская ГСХА, 2010. - Вып. 11. - С. 162-166.

38. Саитов, В.Е. Статистический анализ процесса фракционирования легких отходов в осадочной камере воздушным потоком, подведенным в зону всасывающего окна диаметального вентилятора / В.Е. Саитов, А.Н. Суворов, В.Г. Фарафонов // Problemy intensyfikacji produkcji zwierzęcej z uwzględnieniem poprawy struktury obszarowej gospodarstw rodzinnych, ochrony środowiska i standardów UE: XVI Międzynarodowa Konferencja Naukowa. - Warszawa, 2010. - P. 74-85.

39. Саитов, В.Е. Обоснование параметров входного патрубка противоточного диаметального вентилятора / В.Е. Саитов, Р.Г. Гатауллин // Problemy intensyfikacji produkcji zwierzęcej z uwzględnieniem struktury obszarowej gospodarstw rodzinnych, ochrony środowiska i standardów UE: XVII Międzynarodowa Konferencja Naukowa. - Warszawa, 2011. - P. 181-188.

40. Саитов, В.Е. Методика получения расходной характеристики регулировочной заслонки / В.Е. Саитов, В.Г. Фарафонов, А.Н. Суворов // Проблемы интенсификации животноводства с учетом пространственной инфраструктуры сельского хозяйства и охраны окружающей среды: монография под науч. ред. проф. докт. Вацлава Романюка. - Фаленты-Варшава, 2012. - С. 225-229.

41. Саитов, В.Е. Технические решения для повышения эффективности технологиче-

ского процесса и совершенствования основных рабочих органов зерноочистительных машин / В.Е. Саитов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований: материалы Международных научных конференций. - 2012. - № 7. - С. 132-133.

42. Сычугов, Н.П. Решение экологических проблем при послеуборочной обработке зерна / Н.П. Сычугов, В.Е. Саитов // *Ecologiczne aspekty mechanizacji nawożenia, ochrony roślin, uprawy gleby i zbioru roślin uprawnych: VII International symposium*. - Warszawa, 2000. - P. 234-242.

43. Сычугов, Н.П. Исследование функционирования машин предварительной очистки зерна фракционированием легких отходов в осадочной камере и выделением мелкой фракции цилиндрическим решетом / Н.П. Сычугов, В.Е. Саитов // *Problemy intensyfikacji produkcji zwierzęcej z uwzględnieniem struktury obszarowej gospodarstw rodzinnych, ochrony środowiska i standardów UE: XVII Międzynarodowa Konferencja Naukowa*. - Warszawa, 2011. - P. 212-227.

44. Saitov, V.E. Determination technique of key parameters the closed small-sized grain separators / V.E. Saitov, V.G. Farafonov, A.N. Suvorov // *International Journal Of Applied And Fundamental Research*. - 2013. - № 2 (Электронный журнал). - URL: <http://www.science-sd.com/455-24135> (дата обращения 06.11.2013).

Авторские свидетельства и патенты на изобретения

45. Диаметральный вентилятор: пат. 2266433 Рос. Федерация: МПК⁷ F04D 17/04 / Саитов В.Е.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО Вятская ГСХА. - № 2004110277/06; заявл. 05.04.04; опубл. 20.12.05, Бюл. № 35. - 5 с.

46. Замкнутая пневмосистема зерноочистительной машины: а.с. 1637888 СССР: МКИ⁵ B07B 4/00 / Н.П. Сычугов, А.И. Бурков, В.Е. Саитов (СССР). - № 4621772/13; заявл. 20.12.88; опубл. 30.03.91, Бюл. № 12. - 3 с.

47. Зерноочистительная машина: а.с. 1456255 СССР: МКИ⁴ B07B 4/02, 4/08 / Н.П. Сычугов, А.И. Бурков, В.Е. Саитов (СССР). - № 4257425/29-03; заявл. 05.06.87; опубл. 07.02.89, Бюл. № 5. - 2 с.

48. Зерноочистительная машина: а.с. 1710145 СССР: МКИ⁵ B07B 4/00 / Н.П. Сычугов, А.И. Бурков, В.Е. Саитов, Ю.П. Полунин, Н.И. Грабельковский, А.А. Гехтман, В.В. Антюхин (СССР). - № 4793938/03; заявл. 27.12.89; опубл. 07.02.92, Бюл. № 5. - 5 с.

49. Зерноочистительная машина: а.с. 1726061 СССР: МКИ⁵ B07B 4/08, 11/08 / Н.П. Сычугов, В.Е. Саитов, А.А. Гехтман, В.В. Антюхин (СССР). - № 4773774/03; заявл. 26.12.89; опубл. 15.04.92, Бюл. № 14. - 5 с.

50. Зерноочистительная машина: а.с. 1794498 СССР: МКИ⁵ B07B 4/00 / Н.П. Сычугов, А.И. Бурков, В.Е. Саитов, А.А. Гехтман, В.В. Антюхин (СССР). - № 4793937/03; заявл. 27.12.90; опубл. 15.02.93, Бюл. № 6. - 4 с.

51. Зерноочистительная машина: пат. 2172217 Рос. Федерация: МПК⁷ B07B 4/02, A01F 12/44 / Саитов В.Е.; заявитель и патентообладатель Вятская гос. с.-х. академия. - № 2000110083/03; заявл. 19.04.00; опубл. 20.08.01, Бюл. № 23. - 5 с.

52. Зерноочистительная машина: пат. 2198040 Рос. Федерация: МПК⁷ B07B 4/00 / Саитов В.Е., Гатауллин Р.Г., Нигматуллин И.Н.; заявитель и патентообладатель Вятская гос. с.-х. академия. - № 2000131016/13; заявл. 13.12.00; опубл. 10.02.03, Бюл. № 4. - 6 с.

53. Зерноочистительная машина: пат. 2213442 Рос. Федерация: МПК⁷ A01F 12/44, B07B 4/02 / Бурков А.И., Саитов В.Е., Глушков А.Л.; заявитель и патентообладатель ГУ Зональный НИИСХ Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого. - № 2001124127/13; заявл. 29.08.01; опубл. 10.10.03, Бюл. № 28. - 4 с.

54. Зерноочистительная машина: пат. 2242112 Рос. Федерация: МПК⁷ A01F 12/44, B07B 4/02 / Бурков А.И., Саитов В.Е., Глушков А.Л.; заявитель и патентообладатель ГУ Зональный НИИСХ Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого. - № 2003117519/12; заявл. 11.06.03; опубл. 20.12.04, Бюл. № 35. - 4 с.

55. Зерноочистительная машина: пат. 2267906 Рос. Федерация: МПК⁷ A01F 12/44, B07B 4/02 / Бурков А.И., Саитов В.Е., Ефремов Д.Ф., Кутюков А.М., Глушков А.Л., Конышев Н.Л.; заявитель и патентообладатель ГУ Зональный НИИСХ Северо-Востока им. Н.В.

Рудницкого. - № 2004109965/12; заявл. 01.04.04; опубл. 20.01.06, Бюл. № 2. - 5 с.

56. Зерноочистительная машина: пат. 2279932 Рос. Федерация: МПК⁷ B07B 4/02, A01F 12/44 / Сайтов В.Е.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО Вятская ГСХА. - № 2005100114/03; заявл. 11.01.05; опубл. 20.07.06, Бюл. № 20. - 6 с.

57. Зерноочистительная машина: пат. 2280514 Рос. Федерация: МПК⁷ B07B 4/02, A01F 12/44 / Сайтов В.Е.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО Вятская ГСХА. - № 2004135687/13; заявл. 06.12.04; опубл. 27.07.06, Бюл. № 21. - 5 с.

58. Зерноочистительная машина: пат. 2283704 Рос. Федерация: МПК⁷ B07B 4/02, A01F 12/44 / Сайтов В.Е., Гатауллин Р.Г.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО Вятская ГСХА. - № 2004135685/03; заявл. 06.12.04; опубл. 20.09.06, Бюл. № 26. - 7 с.

59. Зерноочистительная машина для очистки и фракционирования зернового материала: пат. 2194580 Рос. Федерация: МПК⁷ B07B 4/02 / Сайтов В.Е., Сычуглов Н.П., Гатауллин Р.Г.; заявитель и патентообладатель Вятская гос. с.-х. академия. - № 2000131252/13; заявл. 13.12.00; опубл. 20.12.02, Бюл. № 35. - 4 с.

60. Пневматический сепаратор: пат. 2223829 Рос. Федерация: МПК⁷ B07B 11/06, 4/02 / Сайтов В.Е., Бурков А.И., Гатауллин Р.Г.; заявитель и патентообладатель Вятская гос. с.-х. академия. - № 2002108084/03; заявл. 29.03.02; опубл. 20.02.04, Бюл. № 5. - 5 с.

61. Пневмосепарирующее устройство зерноочистительной машины: пат. 2104099 Рос. Федерация: МПК⁶ B07B 4/02 / Сычуглов Н.П., Сайтов В.Е., Гатауллин Р.Г.; заявитель и патентообладатель Вятская гос. с.-х. академия. - № 96110770 /03; заявл. 28.05.96; опубл. 10.02.98, Бюл. № 4. - 5 с.

62. Пневмосепарирующее устройство зерноочистительной машины: пат. 2131784 Рос. Федерация: МПК⁶ B07B 4/02 / Сычуглов Н.П., Сайтов В.Е., Гатауллин Р.Г.; заявитель и патентообладатель Вятская гос. с.-х. академия. - № 97118588/03; заявл. 04.11.97; опубл. 20.06.99, Бюл. № 17. - 5 с.

63. Пневмосепарирующее устройство зерноочистительной машины: пат. 2177841 Рос. Федерация: МПК⁷ B07B 4/02 / Сычуглов Н.П., Сайтов В.Е., Гатауллин Р.Г.; заявитель и патентообладатель Вятская гос. с.-х. академия. - № 2000109754/03; заявл. 17.04.00; опубл. 10.01.02, Бюл. № 1. - 7 с.

64. Пневмосистема зерноочистительной машины: пат. 2199402 Рос. Федерация: МПК⁷ B07B 4/02, A01F 12/44 / Сайтов В.Е.; заявитель и патентообладатель Вятская гос. с.-х. академия. - № 2001102102/03; заявл. 23.01.01; опубл. 27.02.03, Бюл. № 6. - 5 с.

65. Противоточный диаметральный вентилятор: пат. 2251026 Рос. Федерация: МПК⁷ F04D 17/04 / Сайтов В.Е.; заявитель и патентообладатель Вятская гос. с.-х. академия. - № 2003103799/06; заявл. 10.02.03; опубл. 27.04.05, Бюл. № 12. - 5 с.

66. Устройство для измерения скорости запыленного газового потока: пат. 2176395 Рос. Федерация: МПК⁷ G01P 5/16 / Сайтов В.Е.; заявитель и патентообладатель Вятская гос. с.-х. академия. - № 2000109755/28; заявл. 17.04.00; опубл. 27.11.01, Бюл. № 33. - 6 с.

67. Устройство для регулирования скорости воздушного потока в пневмосепарирующем канале: а.с. 1532091 СССР: МКИ⁴ B07B 11/04, F24F 13/08 / Н.П. Сычуглов, В.Е. Сайтов (СССР). - № 4311309/29-03; заявл. 01.10.87; опубл. 30.12.89, Бюл. № 48. - 4 с.

68. Устройство для регулирования скорости воздушного потока в пневмосепарирующем канале: а.с. 1577887 СССР: МКИ⁵ B07B 11/04 / Н.П. Сычуглов, В.Е. Сайтов (СССР). - № 4379042/29-03; заявл. 18.02.88; опубл. 15.07.90, Бюл. № 26. - 4 с.

Подписано в печать 14.01.2014 г. Формат 60x84¹/₁₆

Усл. печ. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ № 1.

Отпечатано с оригинал-макета.

Типография ГНУ НИИСХ Северо-Востока Россельхозакадемии.

610007, г. Киров, ул. Ленина, 166-а.