

*На правах рукописи*

**ЧУМАКОВ Владимир Геннадьевич**



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПОСЛЕУБОРОЧНОЙ  
ОБРАБОТКИ ЗЕРНА НА ОСНОВЕ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ  
ПОТОКОВ ЗЕРНОВОГО ВОРОХА**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства  
механизации сельского хозяйства

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Челябинск – 2012

Работа выполнена на кафедрах «Уборочные машины» и «Эксплуатация машинно-тракторного парка» ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия».

Научные консультанты: доктор технических наук, профессор  
**Косилов Николай Иванович**

доктор технических наук, профессор  
**Окунев Геннадий Андреевич**

Официальные оппоненты: **Лапшин Петр Николаевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка и ремонт машин»  
Курганской государственной сельскохозяйственной академии им. Т.С. Мальцева

**Ковриков Иван Тимофеевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Машины и аппараты химических и пищевых производств»  
Оренбургского государственного университета

**Мударисов Салават Гумерович,**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Сельскохозяйственные машины» Башкирского государственного аграрного университета

Ведущая организация: ГНУ Сибирский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства Сибирского отделения РАСХН

Защита состоится «25» мая 2012 г., в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.069.01 на базе ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 75.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия».

Автореферат разослан «12» апреля 2012 г. и размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве образования и науки России <http://vak.ed.gov.ru>.

Ученый секретарь  
диссертационного  
совета



Возмилов  
Александр Григорьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Зерновое производство является основой устойчивого функционирования агропромышленного сектора, носит системообразующий характер для других отраслей экономики страны, определяет уровень продовольственной безопасности населения.

В себестоимости производства зерна доля очистки и сортирования при послеуборочной обработке составляет не более десяти процентов, но отказ от этих операций или недостаточно качественное их выполнение приводит к большим финансовым потерям, цена которых может значительно превышать затраты на их проведение. Имеющаяся в сельском хозяйстве зерноочистительная техника морально устарела, физически изношена и количественно недостаточна. Проведённые исследования показывают, что построение технологических схем зерноочистительных линий, машин и рабочих органов на базе известных принципов не позволяет получить семена, отвечающие требованиям ГОСТ, за один технологический цикл. Кроме того, как правило, не учитывается биологическая разнокачественность зерна, благодаря которой возможно улучшение урожайных свойств семян и снижение себестоимости зерна на продовольственные и технические цели.

В связи с изложенным совершенствование технологии послеуборочной обработки зерна, создание на ее основе новых и модернизация существующих технических средств являются актуальными проблемами, имеющими важное хозяйственное значение.

Актуальность направления исследований подтверждается соответствием темы диссертационной работы разделу федеральной программы по научному обеспечению АПК Российской Федерации: шифр 01.02 «Разработать перспективную систему технологий и машин для производства продукции растениеводства и животноводства на период до 2015 г.»; Государственной программе развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2008–2012 годы.

**Цель исследования** – повышение эффективности работы зерноочистительно-сушильных комплексов на основе дифференцирования потоков зернового вороха.

**Объект исследования** – технологический процесс обработки зернового вороха на зерноочистительно-сушильных комплексах на основе дифференциации параметров технологических режимов и технических средств.

**Предмет исследования** – взаимосвязи качественных показателей партий семенного, товарного зерна и зерна на технические цели с параметрами комплектования и функционирования зерноочистительно-сушильных комплексов и поступающего на обработку зернового вороха.

**Методы исследований.** Общей методологической основой исследований являлось использование системного подхода, обеспечивающего рассмотрение процессов обработки зернового вороха с учетом взаимосвязей качества семян и зерна с производительной способностью и технологическими параметрами технических средств. При проведении исследований использовались методы математического моделирования, статистики, системного анализа, теории вероятности, лабораторные и производственные испытания.

**Научная новизна основных положений, выносимых на защиту:**

- технологические схемы обработки зернового вороха, основанные на дифференциации зерна по технологическому назначению;
- зависимости, раскрывающие взаимосвязи качественных показателей зерна с параметрами функционирования зерноочистительно-сушильных комплексов и параметрами исходного зернового вороха;
- параметры и режимы работы зерноочистительных машин, сушильных агрегатов и компенсирующих ёмкостей с учетом качественных показателей зерна;
- технические решения по совершенствованию оборудования для очистки и сушки зерна, защищённые авторскими свидетельствами и патентами.

**Практическая ценность и реализация работы:**

- разработаны механико-технологические основы создания зерноочистительно-сушильных комплексов с разделением вороха на потоки и процессов сушки зерна, обобщена и развита теория и практика сепарирования зерна решетом и в наклонной воздушной струе;
- разработаны практические рекомендации по проектированию новых и реконструкции существующих зерноочистительных агрега-

тов и зерноочистительно-сушильных комплексов, одобренные НТС межрегионального комитета по сельхозмашиностроению Ассоциации экономического взаимодействия областей и республик Уральского региона;

– результаты научных исследований, технологии и машины, рекомендации используются ОАО «Государственный проектный институт Мясомолпром» г. Курган, ОАО ГСКБ «Зерноочистка» г. Воронеж;

– в соответствии с рекомендациями и участием автора выполнен монтаж новых и реконструкция существующих (всего более семидесяти) зерноочистительных агрегатов и комплексов, при этом изготовлено и установлено четырнадцать камерных зерносушилок;

– результаты теоретических и экспериментальных исследований используются в учебном процессе Курганской ГСХА и Челябинской ГАА.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены и одобрены на международных научно-технических конференциях Курганской ГСХА (КСХИ) (с. Лесниково, 1985–2011 гг.); на международных научно-технических конференциях Челябинской ГАА (ЧИМЭСХ/ЧГАУ) (г. Челябинск, 1986–2011 гг.), в том числе в 2011 г. на пленарном заседании; на научно-практической конференции НПО «Целинсельхозмеханизация» (г. Кустанай, 1992 г.); на Международной научно-технической конференции ВНИИСХ им. Бараева (г. Шортанды, 1993 г.); на заседаниях научно-технического совета департамента сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности Курганской области (г. Курган, 1989, 2007 гг.); на заседании научно-технического совета Межрегионального комитета по сельхозмашиностроению Ассоциации экономического взаимодействия областей и республик Уральского региона (г. Челябинск, 2007 г.); на международных научно-технических конференциях ФГБОУ ВПО МГАУ (г. Москва, 2010, 2011 гг.); на Международной научно-технической конференции ГНУ ВИМ Россельхозакадемии (г. Москва, 2011 г.); на областных совещаниях, посвященных вопросам послеуборочной обработки зерна и семян (г. Курган, 2006–2011 гг.); на выставке-ярмарке инновационных проектов Курганской области (диплом победителя «Лучшая инновация в сельском хозяйстве», 2011 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 70 научных и методических работ, в том числе 14 в изданиях, рекомендуемых

ВАК РФ, два проекта, прошедших государственную экспертизу, и 8 научных отчетов; получено четыре авторских свидетельства РФ, четыре патента на изобретения и три патента на полезные модели.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованной литературы, включающего 268 наименований, 29 приложений. Работа изложена на 343 страницах машинописного текста, содержит 9 таблиц, 87 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** раскрыта актуальность проблемы, определены направления исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** *«Современные проблемы реализации и развития механизированных процессов послеуборочной обработки зерна»* проведен анализ состояния технологий и технических средств для послеуборочной обработки зерна, определены перспективы их развития. Обобщены результаты исследований в области проектирования технологических процессов очистки, сортирования и сушки зерна и семян, сформулированы задачи исследований.

Задача послеуборочной обработки – сохранение собранного урожая и доведение зернового материала до необходимого качества, т.е. получение семенного, продовольственного зерна и зерна на технические цели в соответствии с требованиями, предусмотренными стандартами и базисными кондициями.

Вопросам разработки, совершенствования рабочих органов и в целом технологии послеуборочной обработки зерна посвящены работы В.И. Анискина, В.И. Василенко, Е.Ф. Ветрова, С.А. Васильева, В.В. Гортинского, В.П. Горячкина, А.Г. Громова, Ю.И. Ермольева, В.П. Елизарова, П.М. Заики, А.Н. Зюлина, А.И. Климка, И.Е. Кожуховского, Н.И. Косилова, В.А. Кубышева, П.Н. Лапшина, А.А. Лопана, Е.А. Непомнящего, Г.Т. Павловского, В.В. Пивень, Н.П. Сычугова, А.П. Тарасенко, Ю.В. Терентьева, Г.Д. Терскова, Н.Н. Ульриха, А.В. Фоминых, В.М. Цециновского и других ученых.

Основные положения современной теории сушки влажных зерновых материалов базируются на работах А.В. Авдеева, В.И. Анотазе-



вича, И.Ф. Бородина, А.С. Гинзбурга, А.В. Голубковича, Г.А. Егорова, В.И. Жидко, Н.М. Иванова, Н.И. Малина, Г.С. Окуня, С.Д. Птицина, В.С. Уколова, Н.В. Цугленка и других.

Результаты этих исследований послужили основой для создания рабочих органов, машин для очистки и сушки зерна, поточных технологических линий для послеуборочной обработки зерна и семян. Однако анализ использования оборудования в процессе послеуборочной обработки зерна и семян в хозяйствах показал, что типовые зерноочистительные линии не в состоянии производить качественную очистку зерна и сортировку семян за один технологический цикл с учетом их биологической разнокачественности. Многократный пропуск приводит к высокому уровню травмирования семян зерноочистительными агрегатами, увеличению энергозатрат, которые составляют до 5 кВт на одну тонну обработанного зерна, не считая сушки. По данным Госсеминаспекций, в последние годы в России высевается до 20% некондиционных семян, площадь, засеваемая элитными семенами, составляет треть от научно обоснованной нормы.

**Научная проблема.** Стремление получить биологически ценные и качественные по чистоте семена на основе известных принципов построения технологических схем очистки требует дополнительных операций и разномарочности сепарирующих органов зерноочистительных агрегатов и зерноочистительно-сушильных комплексов. Это приводит к увеличению общей продолжительности технологического цикла, повышению степени травмирования семян, энергоемкости процесса, снижению выхода семян.

В качестве научной гипотезы выдвинуто предположение о том, что обоснованное разделение зернового вороха по фракциям, а в последующем объединение их в потоки по технологическому назначению позволит в процессе обработки уменьшить количество и степень воздействия рабочих органов на материал, повысить производительность технологических линий и сократить ресурсоемкость процесса.

Для достижения поставленной цели и реализации выдвинутой гипотезы сформулированы следующие задачи исследования.

1. Обосновать и разработать технологические схемы обработки зернового вороха на зерноочистительно-сушильных комплексах на основе его фракционирования и формирования потоков зерна по технологическому назначению.

2. Установить взаимосвязи выходных показателей обработки зернового вороха при его фракционировании и формирования потоков зерна по технологическому назначению с параметрами и режимами работы зерноочистительно-сушильных комплексов.

3. Обосновать основные параметры и режимы работы технических средств зерноочистительно-сушильных комплексов с учетом дифференцирования потоков зернового вороха.

4. Провести исследования реализации процесса обработки зернового вороха на зерноочистительно-сушильных комплексах с установленными параметрами и режимами работы их технических средств, дать технико-экономическую оценку эффективности результатов исследований, разработать рекомендации по совершенствованию зерноочистительных агрегатов и зерноочистительно-сушильных комплексов.

Во **второй главе** «Обоснование технологической схемы обработки зерна с дифференцированием по технологическому назначению» на основе системного анализа проблемной ситуации и использования оптимизационных моделей обоснованы пути совершенствования процессов обработки зернового вороха на зерноочистительно-сушильных комплексах с разделением материала по его технологическому назначению.

Эффективность послеуборочной обработки зернового вороха можно рассматривать как сложный многофакторный процесс, функционал которого имеет вид

$$WK(t) = F[VX(t), VT(t), VP(t), \dots, BK], \quad (1)$$

где  $WK(t)$  – показатели работы зерноочистительно-сушильного комплекса (производительность, полнота выделения примесей, потери зерна);

$[VX(t), VT(t), VP(t), \dots, BK]$  – группы факторов во времени, обеспечивающие и реализующие качество обработки на операциях соответственно измерения параметров исходного вороха и продуктов деления, выбор технологической схемы обработки вороха, количество потоков деления вороха, выбор режимов сушки и очистки каждого потока, количество и объём компенсирующих ёмкостей и другие;



$BK$  – фактор, отражающий наличие возмущений и нерегулируемые изменения конструктивных параметров оборудования, входящего в состав зерноочистительно-сушильного комплекса.

Повышение эффективности послеуборочной обработки зернового вороха возможно на основе оптимизационных моделей, что предопределяет рассмотрение составляющих функционала (1) как самостоятельных объектов исследования, так и в их взаимосвязи. Элемент любого уровня – это система, включающая в себя подсистемы низшего уровня.

Процесс обработки зернового вороха как система состоит из четырех подсистем: приемка, предварительная очистка, или фракционирование, сушка и очистка (рисунок 1).

Зерновой ворох, поступающий от комбайнов, представляет собой смесь зерна основной культуры и семян различных культурных и сорных растений, а также содержит примеси органического и минерального происхождения. Засорители, как правило, имеют повышенную влажность, которая при совместном их хранении с семенами основной культуры быстро передается последним. Известно, что семена, расположенные в колосьях главных стеблей и в средней части колоса, относятся к ранним срокам образования, обладают более высокой физиологической зрелостью и продуктивностью. Поэтому для повышения стойкости семян, снижения уровня травмирования и использования биологической разнокачественности целесообразно выделение их в процессе предварительной очистки как наиболее ценной фракции. Остальная часть зерна основной культуры должна использоваться на продовольственные и технические цели. Наибольший эффект можно достичь при использовании технологии послеуборочной обработки зернового вороха с делением его на разнокачественные фракции, которые в последующем объединяются в потоки по технологическому назначению (см. рисунок 1).

В общем виде при разделении многокомпонентного зернового вороха получается пять фракций –  $q_a, q_b, q_c, q_d, q_e$ . Фракции крупных  $q_d$  и лёгких  $q_e$  примесей поступают в бункер незерновых отходов  $B_{нз}$ . Из фракций зерна  $q_a, q_b, q_c$  в зависимости от назначения зерна формируется один, два или три потока. Состав потоков может быть: первый поток  $q_1 = q_a$  – семена; второй поток  $q_2 = q_b$  – продовольственное зерно; третий поток  $q_3 = q_c$  – зерно на технические цели.

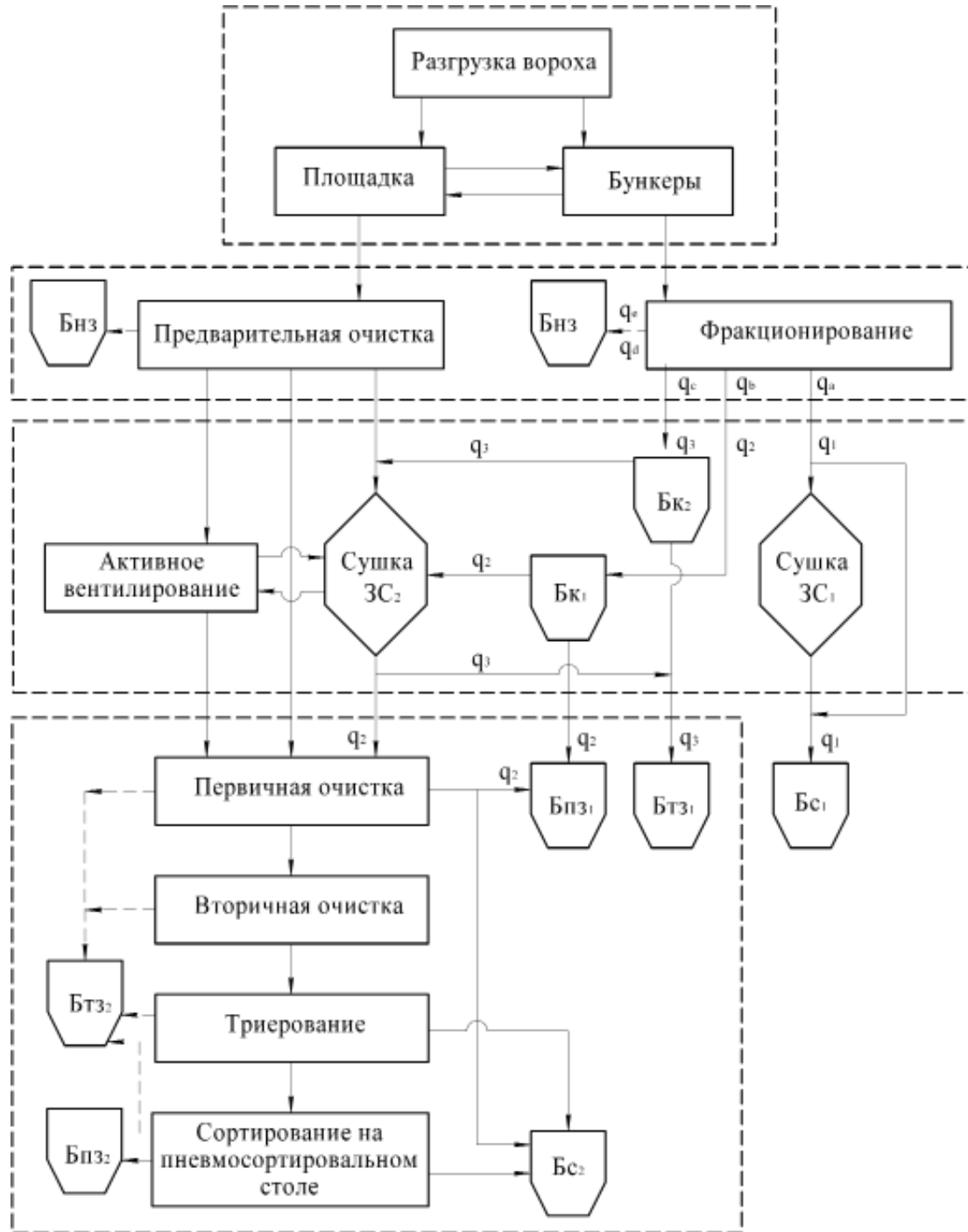


Рисунок 1 – Принципиальная структурная схема технологического процесса фракционирования зернового вороха и деления его на потоки:

ЗС<sub>1</sub> – зерносушилка 1-го потока; ЗС<sub>2</sub> – зерносушилка 2-го и 3-го потоков; Бк, Бс, Бпз, Бтз, Бнз – бункеры: компенсационные, семян, продовольственного зерна, зерна на технические цели, незерновых отходов.  $q_a, q_b, q_c, q_e, q_d$  – фракции семян, продовольственного зерна, зерна на технические цели и незерновых отходов;  $q_1, q_2, q_3$  – поток семян, продовольственного зерна и зерна на технические цели

Дальнейшая обработка сформированных потоков проводится набором сепарирующих органов, соответствующих виду примесей в них (воздушный канал, решето, триер). При необходимости сушку потока семян  $q_1$  следует осуществлять на зерносушилке ЗС-1 в мягком режиме, после чего его направляют в бункер семян  $B_{c_1}$ . Сушку оставшихся потоков зерна  $q_2$  и  $q_3$  можно вести попеременно на зерносушилке ЗС-2 и производить сушку при более жестких и экономичных режимах. Очередность сушки этих потоков определяется товарной ценностью конечного продукта.

Эффективность работы такой технологической линии будет зависеть от количественных и качественных показателей работы сепаратора-фракционера, гибкости технологической связи между отдельными рабочими органами и рациональности их загрузки, оптимального количества компенсирующих бункеров  $B_k$  и их вместимости. Большое значение имеет выбор признака разделения при фракционировании, очередность расположения и компоновка рабочих органов в технологической линии.

Наиболее перспективным представляется использование воздушного потока, поскольку, во-первых, эффективность его работы в меньшей степени зависит от состава исходного материала, во-вторых, большинство биологических свойств семян тесно коррелирует с их аэродинамическими свойствами. Для рационального ввода исходного материала в воздушный поток и усиления аэродинамического признака целесообразно предварительное разделение зерна на решетках.

С целью реализации технологического процесса фракционирования зернового вороха и деления его на потоки на основе предварительных исследований разработана технологическая схема пневморешетного сепаратора (рисунок 2).

Процесс сепарирования и деления вороха на фракции осуществляется решетками и в затопленной воздушной струе, ограниченной стенками сепаратора. Высота канала определяется структурой воздушного потока, соответствующей затопленной струе. Это позволяет увеличить время взаимодействия компонентов смеси с воздушным потоком и тем самым повысить эффективность сепарирования.

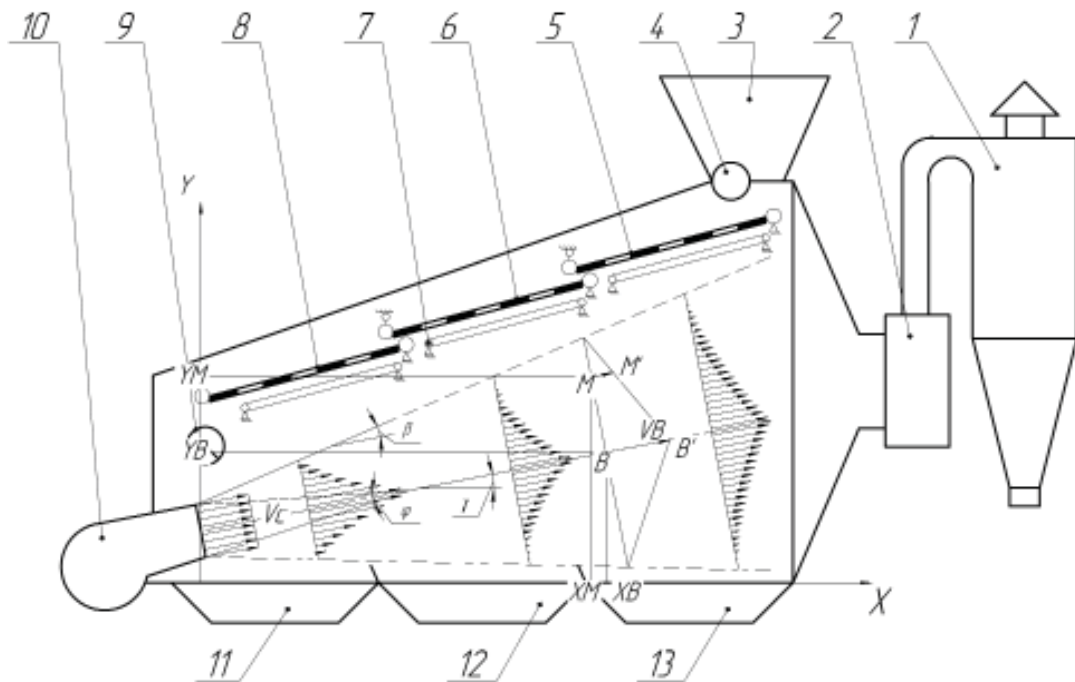


Рисунок 2 – Схема пневморешетного сепаратора:

1 – циклон; 2, 10 – вытяжной и нагнетающий вентиляторы; 3 – приемный бункер; 4 – дозатор, 5, 6, 8 – подсевное, делительное и вороховое решета; 7 – механизм очистки решет; 9 – транспортер грубых отходов, 11, 12, 13 – приемники фракций крупного  $q_a$ , среднего  $q_b$  и мелкого  $q_c$  зерна

Повышение качества сепарирования достигается также за счет рассредоточенного ввода компонентов (частиц) и дискретного воздействия на них воздушной струи. Это обеспечивает каскад решет 5, 6 и 8, установленный по линии верхней границы воздушной струи. Размеры отверстий решет по мере приближения к нагнетающему патрубку вентилятора 10 увеличиваются. В нижней части камеры расположены приемники фракций 11, 12 и 13.

Эффективность фракционирования пневморешетным сепаратором определяется эффективностью работы его решетной части и воздушной струи, физико-механическими свойствами исходного вороха:

$$E_{\phi} = f(\omega, A, \alpha, L, B, Q, a_i, V_0, V_e, \gamma), \quad (2)$$

где  $\omega$  – частота колебаний решета,  $\text{с}^{-1}$ ;

$A$  – амплитуда колебаний решета, м;

$\alpha$  – угол наклона решета, град.;  
 $L$  – длина решета, м;  
 $B$  – ширина решета, м;  
 $Q$  – подача на сепаратор, кг/с;  
 $a_i$  – содержание зерна в ворохе в долях единицы;  
 $V_0$  – начальная скорость воздушного потока, м/с;  
 $V_e$  – скорость витания компонентов вороха, м/с;  
 $\gamma$  – угол наклона оси воздушной струи, град.

Процессы, происходящие с частицей на сепарирующей поверхности, рассматриваются как система, состоящая из семи подсистем: покоя; движения; полета; перехода из одного состояния в другое; разворота частицы относительно оси, проходящей через её центр масс; удара о решето; воздействия соседних частиц. Критериями оптимизации работы колосового решета являются просеиваемость, делительного и подсеивного решёт – полнота разделения. Наиболее полное представление об изучаемом процессе дает совмещение детерминированного и стохастического подходов. При создании математической модели принимаются следующие допущения: зерновки имеют форму эллипсоида, засорители – сферическую форму, перемычки и частицы – абсолютно твердые тела. Нормальная составляющая скорости частицы после удара рассчитывалась как для частично упругого удара с коэффициентом восстановления скорости  $k$ , касательная – по гипотезе вязкого трения. Решение нелинейных дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты позволило построить траектории движения центра масс множества частиц и определить, просеялись они или нет.

После установления координат места ввода компонентов зернового вороха в воздушную струю с учетом физико-механических свойств и градиента скорости воздушной струи по высоте и длине рассчитываются траектории полета их в канале сепаратора (см. рисунок 2). На каждый компонент действуют сила тяжести  $mg$  и сила аэродинамического сопротивления  $R$ . Дифференциальные уравнения движения в проекциях на оси координат имеют вид

$$\begin{cases} m\ddot{x} = R_x; \\ m\ddot{y} = R_y - mg. \end{cases} \quad (3)$$

Уравнения (3) решены численным методом Рунге-Кутты. Результатом расчетов являются траектории, которые позволяют определить место падения компонентов по длине приемников фракций (рисунок 3).

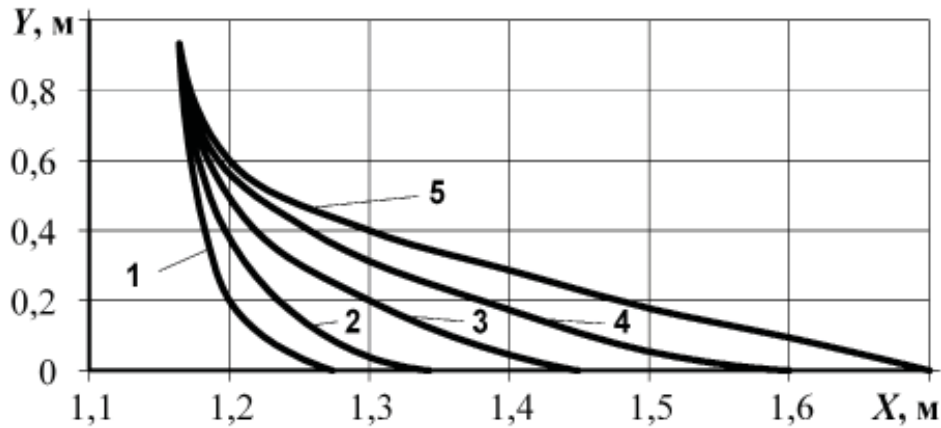


Рисунок 3 – Распределение компонентов зернового вороха при  $V_e = 10,49$  м/с и  $\gamma = 15^\circ$  по длине приемников фракций  $X$  в зависимости от координат ввода их в струю

1 –  $V_0 = 10$  м/с; 2 –  $V_0 = 15$  м/с; 3 –  $V_0 = 20$  м/с; 4 –  $V_0 = 25$  м/с; 5 –  $V_0 = 30$  м/с

Для определения состава фракций и сформированных из них потоков зерна по технологическому назначению разработана методика расчета. Решётная часть сепаратора делит исходный ворох массой  $Q_0$  на четыре фракции:  $Rq_a$  – проход через колосовое решето 8;  $Rq_b$  – проход через делительное решето 6;  $Rq_c$  – проход через подсевное решето 5 и  $Rq_d$  – сход с колосового решета крупных примесей, которые выводятся из пневморешётного сепаратора и поступают в бункер незерновых отходов (см. рисунок 2).

Первая фракция массой  $Rq_a$  поступает на очистку в наклонную воздушную струю и делится на четыре фракции по скорости витания компонентов:  $Vq_a$  – крупные тяжёлые зёрна;  $Vq_b$  – крупные лёгкие и средние тяжёлые зёрна;  $Vq_c$  – средние лёгкие, мелкие, дроблёные зёрна и мелкие тяжёлые примеси;  $Vq_e$  – лёгкие примеси. Первые три фракции ( $Vq_a$ ,  $Vq_b$ ,  $Vq_c$ ) попадают в соответствующие приёмники сепаратора, а четвертая фракция  $Vq_e$  лёгких примесей удаляется из сепаратора воздушной струёй в циклон и далее в бункер отходов.

Вторая фракция  $Rq_b$ , полученная после сепарации решётной частью, делится воздушной струёй на три фракции:  $Wq_b$ ,  $Wq_c$ ,  $Wq_e$ ,  $Wq_b$ ,



$Wq_c$  попадают во второй и третий приёмники, а фракция  $Wq_e$  лёгких примесей выводится воздушной струёй в отходы.

Третья фракция  $Rq_c$ , полученная после сепарации решётной частью, делится воздушной струёй по скорости витания компонентов на две фракции:  $Fq_c$ ,  $Fq_e$ .  $Fq_c$  попадает в третий приёмник, а вторая фракция  $Fq_e$  лёгких примесей удаляется струёй из сепаратора.

Таким образом, в три приёмника пневморешётного сепаратора поступает три разнокачественные фракции зерна, из которых формируется один, два или три потока зерна, направленных на дальнейшую обработку. Количественный и качественный состав фракций и формируемых из них потоков при постоянном режиме работы пневморешётного сепаратора определяется длиной приёмников фракций и скоростью воздушной струи. В общем виде он может быть представлен:

- первый поток – семена:

$$q_a = Vq_a; \quad (4)$$

- второй поток – продовольственное зерно:

$$q_b = Vq_{VAb} + Vq_{VAb} + Vq_{VBb} + Vq_{VCb} + Wq_{WBb} + Wq_{Wcb} + Wq_{WEb}; \quad (5)$$

- третий поток – зерно на технические цели:

$$q_c = Vq_{VAc} + Vq_{Vbc} + Vq_{Vcc} + Vq_{VEc} + Wq_{Wbc} + Wq_{Wcc} + Wq_{WEc} + \\ + Fq_{FCc} + Fq_{FEc}, \quad (6)$$

где первые две прописные буквы индекса указывают компонент, третья строчная буква – фракцию.

Каждый поток обрабатывают отдельно. Фракции крупных  $q_d = Rq_d$  и лёгких  $q_e = Vq_e + Wq_e + Fq_e$  примесей поступают в бункер отходов.

Подсчитав, сколько каких частиц в какой приёмник поступило, определяем состав смеси в каждом приёмнике. Результаты расчета очистки фракции  $Rq_a$ , состоящей из крупного зерна  $VA$  и примесей  $VH$ , представлены на рисунке 4.

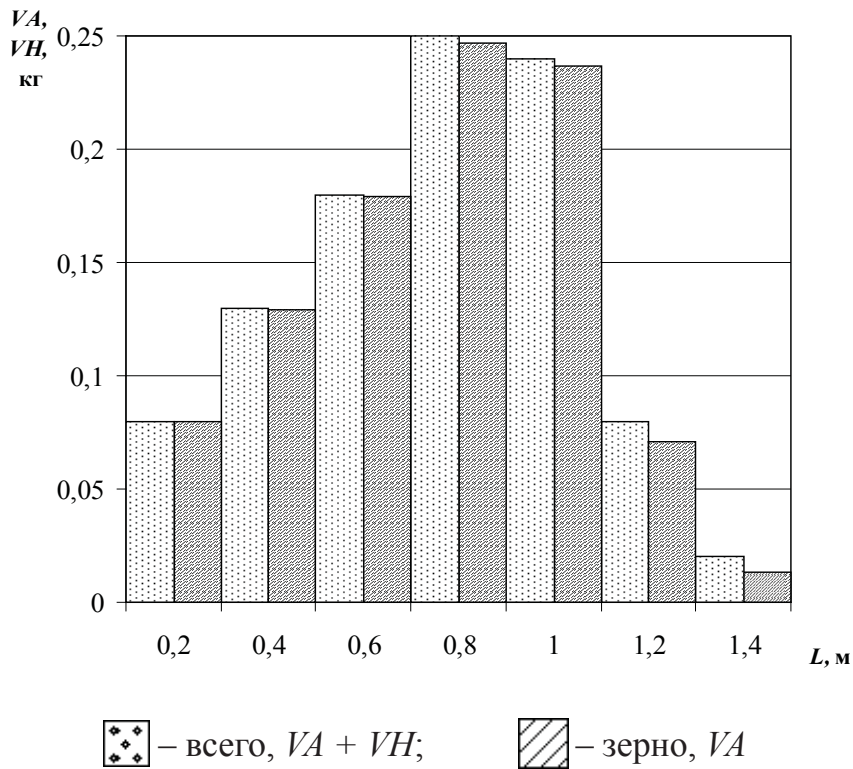


Рисунок 4 – Распределение зерна  $VA$  и примесей  $VH$  по длине приемника фракции крупного зерна  $L$

По мере увеличения длины приемника фракции крупного зерна  $Rq_a$  (приемник разделен на семь приемников по 0,2 метра) количество примесей в ней возрастает. Чистота первой фракции в зависимости от длины приёмника определяется из выражения

$$VK_{li} = VA / (VA + VH); \quad (7)$$

Технологическая эффективность сепарирования фракции  $Rq_a$ :

$$E = VP_a (VK_{Aa} - VK_A) / (VK - VK_A), \quad (8)$$

где  $VP_a$  – выход первой фракции в долях единицы;

$VK_{Aa}$  – содержание компонента в предназначенной для него фракции или фактическая чистота фракции в долях единицы;

$VK$  – содержание компонента в предназначенной для него фракции при предельном разделении или предельная чистота фракции в долях единицы;

$VK_A$  – содержание крупного зерна в исходной смеси в долях единицы.

На рисунке 5 представлены результаты расчетов изменения чистоты (а) и технологической эффективности (б) первой фракции от длины приемника фракции. В качестве исходных данных для расчетов были приняты: начальная скорость воздушного потока  $V_0 = 15$  м/с; угол наклона воздушного потока  $\gamma = 15^\circ$ ; частота колебаний решета  $\omega = 115$  с<sup>-1</sup>; амплитуда колебаний решета  $A = 1,25$  мм; угол наклона решета  $\alpha = 18^\circ$ ; диаметр отверстий колосового решета 6,5 мм. Скорости витания компонентов зернового вороха от  $V_{\text{в min}} = 4,0$  м/с до  $V_{\text{в max}} = 11,2$  м/с. Расчеты проведены с использованием программы Statistica. Чистота зерна в приёмниках по мере увеличения их длины уменьшается (рисунок 5 а).

Уравнение, описывающее характер кривой, имеет вид

$$VK_{li} = 0,9986 + 0,0035 \cdot L + 0,0138 \cdot L^2. \quad (9)$$

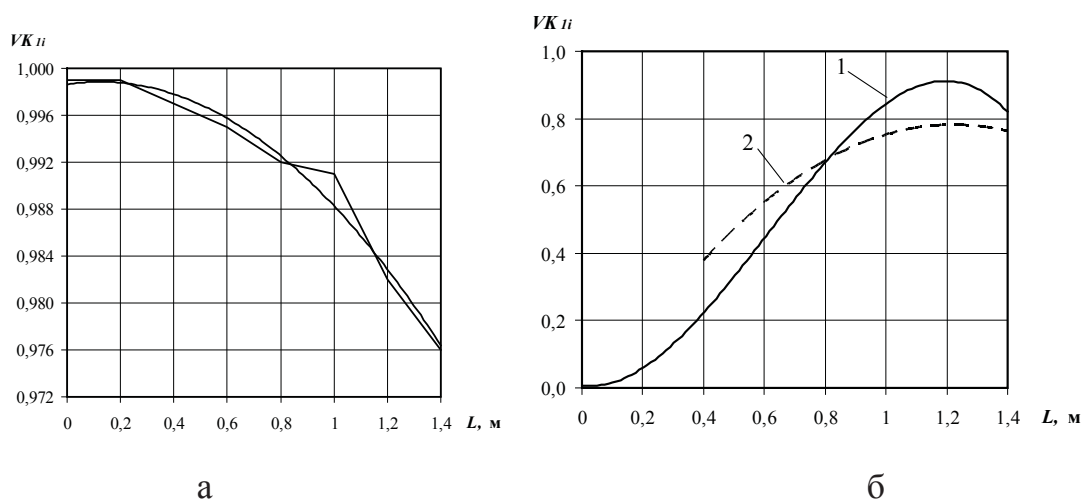


Рисунок 5 – Зависимость чистоты  $VK_{li}$  (а) и технологической эффективности  $E$  (б) первой фракции от длины приемника  $L$  этой фракции: 1 – расчетные данные; 2 – экспериментальные данные

При очистке партий оригинальных и элитных семян увеличение длины приёмника более одного метра недопустимо, так как чистота первой фракции становится менее 0,99 и не соответствует требованиям ГОСТа. При сортировании категории репродукционных семян длина приемника первой фракции может быть увеличена до 1,2 метра.

Зависимости технологической эффективности первой фракции от длины приемника этой фракции представлены на рисунке 5 б. Уравнение, описывающее характер расчетной кривой 1, имеет вид

$$E = 0,0118 - 0,1212 \cdot L + 2,0787 \cdot L^2 - 1,1291 \cdot L^3, \quad (10)$$

кривой 2, полученной по результатам экспериментов, –

$$E = -0,0115 + 1,4705 \cdot L - 0,6027 \cdot L^2. \quad (11)$$

Требуемое по критерию качества значение длины приемника первой фракции составляет 1000...1200 мм. При этом выход фракции крупного зерна составляет 25...35%. Расчеты показывают, что выход второй и третьей фракций должен быть, соответственно, в пределах 40...60% и 5...10% при длине приемников фракций 1000...1200 мм. Общий технологический эффект фракционирования пневморешетным сепаратором может быть определен по выражению

$$E_{\phi} = \sum_{i=1}^n \frac{W_i(\varphi_{ii} - a_i)}{(a_{ii} - a_i)}, \quad (12)$$

где  $W_i$  – выход  $i$ -й фракции в долях единицы;

$\varphi_{ii}$  – количество  $i$ -го компонента в  $i$ -ой фракции или фактическая чистота фракции в долях единицы;

$a_{ii}$  – количество  $i$ -го компонента в  $i$ -ой фракции при предельном разделении, или предельная чистота фракции в долях единицы;

$a_i$  – содержание  $i$ -го компонента в исходной смеси в долях единицы.

На рисунке 6 представлена зависимость технологической эффективности очистки пневморешетным сепаратором от удельной нагрузки. При проведении экспериментальных исследований в качестве исходного материала использовалась пшеница сорта «Жигулевская» со следующими характеристиками: семена основной культуры – 90%, мелкие тяжелые примеси – 9,4%, крупные примеси – 0,5%, в том числе овсюг – 84 шт./кг, и легкие примеси 0,1%.

Данные зависимости позволяют определить параметры пневморешетного сепаратора, обеспечивающие требуемое качество очистки различных партий зерна с учётом вариации параметров поступающего вороха.

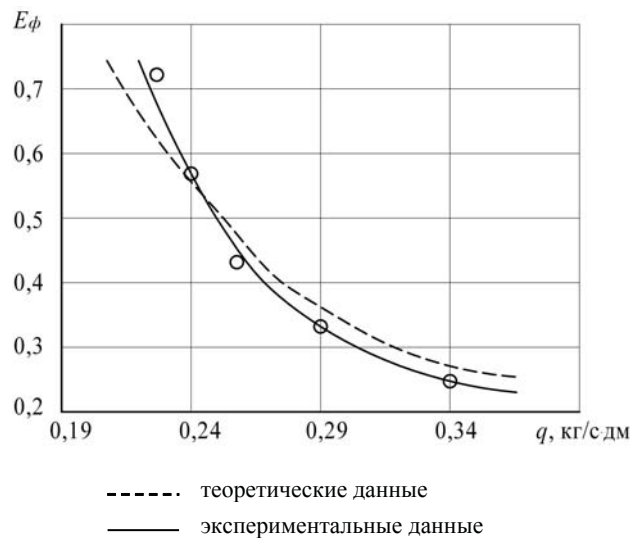


Рисунок 6 – Влияние удельной нагрузки  $q$  на эффективность фракционирования пневморешетным сепаратором  $E_\phi$

В третьей главе «Оптимизация решетных станов» представлены результаты исследований вибрационного перемещения материала по решетку, предлагаемые схемы решётных станов и параметры их работы.

Характер движения материала по решетной поверхности определяется углом наклона решета к горизонту; коэффициентом трения материала о решето; направлением колебаний решета; амплитудой и частотой колебания решета. Поэтому расчетное определение скорости частиц сыпучего тела в потоке составляет первую задачу теории вибрационного сепарирования. Схемы серийных решётных устройств не обеспечивают оптимальных условий разделения зернового вороха в зависимости от нагрузки, так как все точки рабочих поверхностей имеют одинаковую амплитуду колебаний при постоянном угле наклона, а следовательно, постоянное значение относительной скорости перемещения зернового материала по решетку.

Режим работы решетных устройств пневморешетного сепаратора протекает в условиях смешанных нагрузок. По мере движения по решетным поверхностям толщина слоя зернового материала уменьшается от максимума до минимума. Поэтому скорость перемещения зерна по решетку с изменением удельной нагрузки должна меняться, возрастая с увеличением толщины

зернового слоя. На основании исследований предложены схемы решетчатых устройств с изменяющимися кинематическими параметрами (рисунок 7).

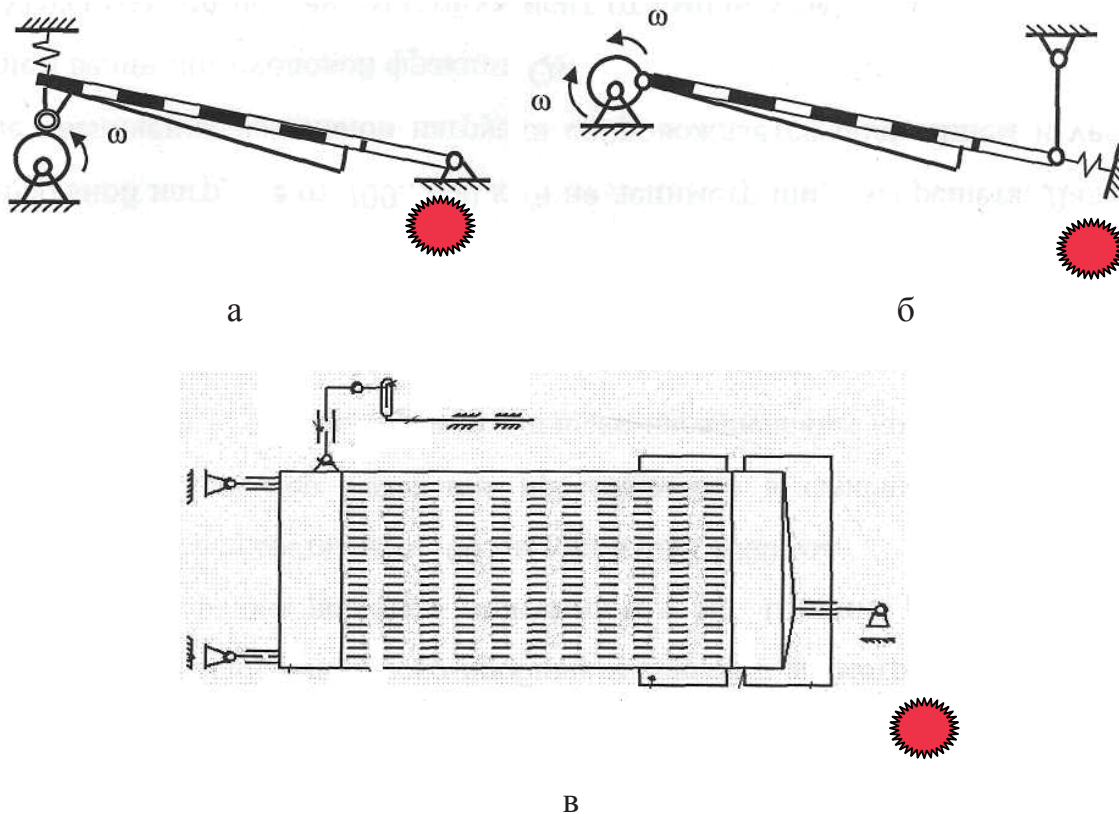


Рисунок 7 – Кинематические схемы предлагаемых решетчатых устройств:  
 а – сепарирующая поверхность с уменьшающейся амплитудой перпендикулярных колебаний по длине (кулачковый привод);  
 б – сепарирующая поверхность с уменьшающейся амплитудой перпендикулярных колебаний по длине и постоянной амплитудой колебаний вдоль поверхности (эксцентрикковый привод);  
 в – сепарирующая поверхность с уменьшающейся амплитудой поперечных колебаний по длине поверхности

В качестве критерия оценки оптимизации работы колосового решета целесообразно использовать просеваемость  $W$ , кг/(ч·м<sup>2</sup>), которая определяется технологическими, конструктивными и кинематическими параметрами. Некоторые из них, влияя на просеваемость, тем не менее в качестве независимой изменяемой величины выступать не могут. Влияние независимых параметров на просеваемость может быть выражено функционально:



$$W = f_k(q_k, \omega, A, \omega), \quad (13)$$

где  $q_k$  – начальная нагрузка на решето, кг/(ч·м<sup>2</sup>).

При работе решетного стана (рисунок 7 б) амплитуда колебаний  $A_1$  вдоль оси  $X$  является неизменной по длине решета величиной, а величина амплитуды колебаний  $A_2$  вдоль оси  $Y$  изменяется по длине решета по линейному закону. Таким образом, в начале решета его точки движутся по круговым траекториям, а по мере продвижения вниз по решету траектория точек решета плавно превращается во всё более вытянутый эллипс.

При создании математической модели с учётом принятых допущений (стр. 13) определяли траекторию движения центра масс сферической частицы размером  $2r$  относительно линии  $abc$  и  $klm$  (рисунок 8). Эти линии являются траекторией движения центра масс частицы при её безотрывном от перемычки движении.

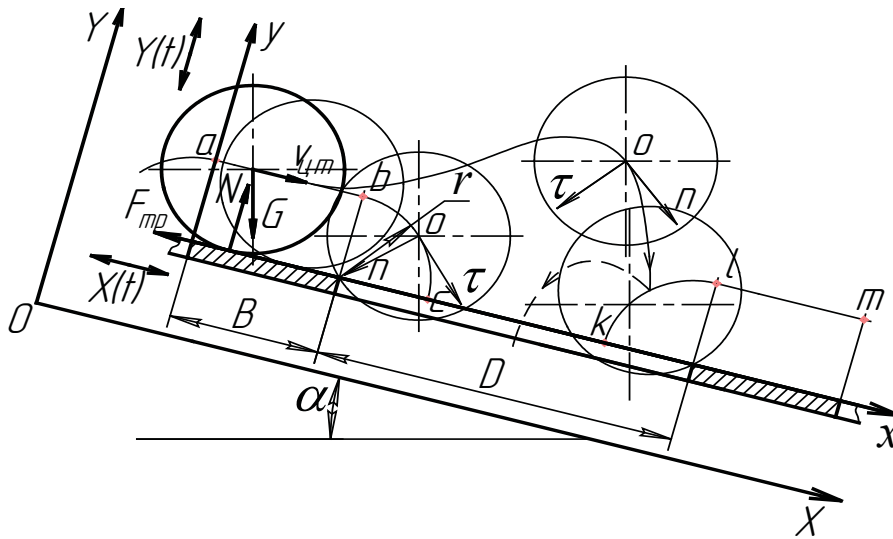


Рисунок 8 – Расчетная схема вибрационного перемещения и просеивания частицы

Для зерновки эллипсоидной формы траектория, в отличие от эквидистант  $abc$  и  $klm$ , представляет собой более сложную кривую, координаты точек которой последовательно определялись в ходе численного эксперимента на каждом шаге интегрирования. Координаты точек  $a, b, c, k, l, m$  рассчитываются через форму и размеры перемычек  $B$ , размер отверстий решета  $D$ , форму и размеры частицы.

Для расчёта траектории движения частицы относительно решета использовали нелинейные дифференциальные уравнения относительного движения в системе координат  $xoy$ :

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= mA_1\omega^2\cos\omega t + mg\sin\alpha + F_x + N_x; \\ m\ddot{y} &= mA_2\omega^2\cos(\omega t \pm 90^\circ) - mg\cos\alpha + F_y + N_y, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $m$  – масса частицы, кг;

$t$  – время, с;

$G = mg$  – сила тяжести частиц, Н;

$F_x, F_y, N_x$  и  $N_y$  – составляющие силы трения и нормального давления вдоль соответствующих осей при движении частицы по линии  $abcklm$ , Н.

Расчёт движения частицы относительно линии  $abcklm$  проводится с использованием дополнительной системы координат  $top$ , начало которой совпадает в рассматриваемый момент времени с центром масс частицы. В первую очередь определяется скорость вибрационного перемещения частицы вдоль решета. Случайным образом задаются исходные параметры, и после этого пошагово рассчитывается дальнейшее движение частицы. Исходными параметрами являются: положение эллипсоида в пространстве (10 положений), сила воздействия вороха на частицу (5 значений силы в диапазоне от веса одной зерновки до веса пяти зерновок), точка приложения силы к частице (5 вариантов), точка подхода частицы к решету (19 точек на участке от центра перемычки до центра отверстия), фаза колебания решета (72 значения через 5 градусов поворота кривошипа). Каждый случайный набор указанных параметров являлся начальным условием для численного решения нелинейных дифференциальных уравнений (14). Пошаговое определение последовательных положений частицы даёт траекторию её движения. Считается, что частица просеялась, если центр масс её окажется ниже прямой  $ck$ , т.е.  $y < 0$ . Число комбинаций указанных выше случайных начальных данных, а значит и число результатов «просеялось – не просеялось», составляет  $10 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 19 \cdot 72 = 342\,000$ , что соответствует массе зерновой смеси 10...11 кг.

На рисунке 9 показана укрупненная блок-схема алгоритма расчёта просеиваемости решета и решения задачи по оптимизации работы решета.

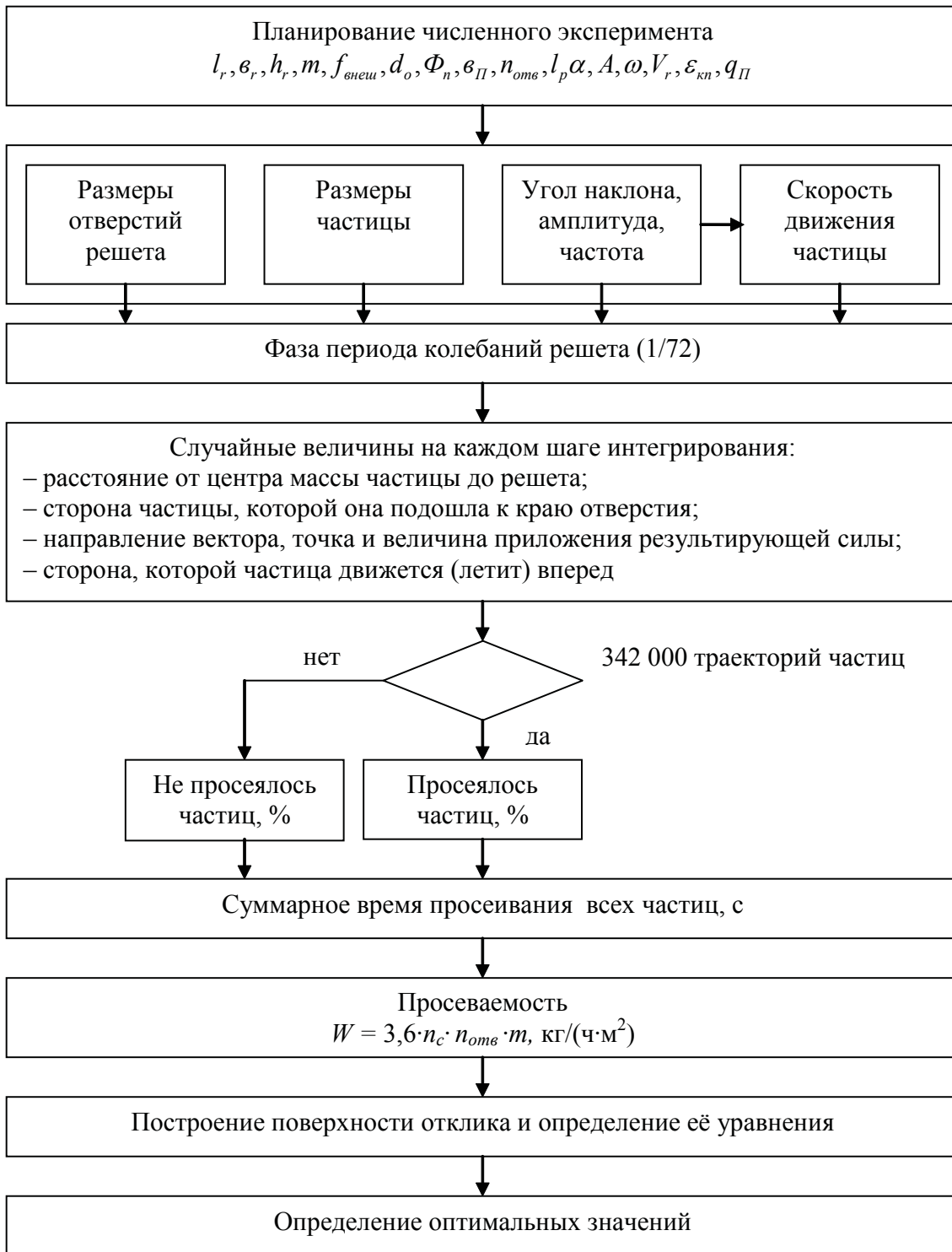


Рисунок 9 – Укрупненная блок-схема алгоритма расчета оптимальных параметров работы колосового решета

В специальном блоке программы ведётся суммирование просеявшихся частиц. Число просеявшихся в рассматриваемое отверстие

частиц в секунду  $n_c$ , шт./( $\text{с}\cdot\text{отв.}$ ), определяется делением числа просевшихся частиц на время, которое находились над этим отверстием все 342 000 частиц.

После чего вычисляется просеваемость по формуле

$$W = 3,6 \cdot n_c \cdot n_{\text{отв}} \cdot m, \quad (15)$$

где  $n_{\text{отв}}$  – число отверстий на  $1 \text{ м}^2$  решета,  $\text{отв./м}^2$ ;

$m$  – масса тысячи частиц вороха,  $\text{кг}/1000 \text{ шт.}$

В качестве примера графического представления результатов исследований показано два независимых параметра: частота колебаний решета  $\omega$  и угол наклона решета  $\alpha$ . Проведённые многофакторный численный и лабораторный эксперименты позволили определить зависимости просеваемости  $W$  от этих параметров. Для каждого параметра выбиралось 5 уровней, так что поверхности отклика строились по 25 точкам (рисунок 10).

При численном эксперименте каждая из 25 точек поверхности представляла собой значения просеваемости  $W$ , полученные по результатам расчета всех 342 000 траекторий частиц. Диапазон изменения независимых переменных составлял: частоты колебаний решета  $\omega = 90 \dots 110 \text{ с}^{-1}$ ; угла наклона решета  $\alpha = 11 \dots 19 \text{ град.}$  Остальные параметры имели следующие значения. Решето плоскопробивное, с круглыми отверстиями диаметром 6,5 мм и количеством отверстий 18 800  $\text{отв./м}^2$ , ширина перемычки – 3,0 мм, длина решета – 1,0 м. Частица сферической формы с эквивалентным диаметром 4,0 мм, размеры эллипсоида вращения – 7,5 мм и 2,8 мм, коэффициент трения скольжения зерна по решету 0,32, коэффициент трения покоя – 0,38. Амплитуды колебаний в начале решета  $A_1 = A_2 = 1,25 \text{ мм.}$  Результаты расчетных исследований по формуле (15) обработаны с использованием программы Statistica. Получена поверхность отклика (рисунок 10 а) и её уравнение

$$W = -138000 + 2379 \cdot \alpha + 254 \cdot 2 \cdot \omega - 56,25 \cdot \alpha^2 - 4,05 \cdot \alpha \cdot \omega - 12,04 \cdot \omega^2. \quad (16)$$

Видно, что функция имеет экстремум. Для определения координат максимального значения просеваемости необходимо взять частные производные уравнения (16) по каждой переменной и, при-

равняв их к нулю, решить полученную систему уравнений, например, в программе MathCAD. Максимальное значение просеваемости составляет 13 200 кг/(ч·м<sup>2</sup>) при угле наклона решета  $\alpha = 17,5^\circ$  и частоте колебаний  $\omega = 102,6 \text{ с}^{-1}$ .

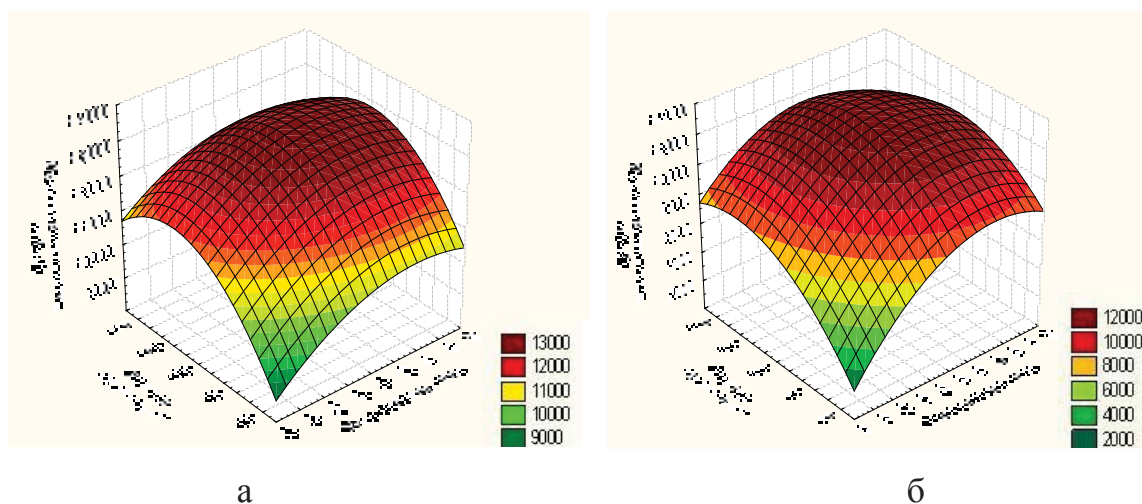


Рисунок 10 – Зависимость просеваемости колосовых решет  $W$  от частоты колебаний  $\omega$  и угла наклона решета  $\alpha$ : а – расчет, б – эксперимент

Полнофакторный пятиуровневый лабораторный эксперимент был задан в тех же пределах изменения независимых переменных  $\alpha$  и  $\omega$ . Лабораторные опыты проводились рандомизированно, с трехкратной повторностью. Поверхность отклика представлена на рисунке 10 б. Уравнение поверхности отклика, полученное с использованием программы Statistica по результатам эксперимента, имеет вид

$$W = -25350 + 6063 \cdot \alpha + 4222 \cdot \omega - 126,61 \cdot \alpha^2 - 18,90 \cdot \alpha \cdot \omega - 19,03 \cdot \omega^2. \quad (17)$$

Максимальное значение просеваемости  $W = 12\,900 \text{ кг}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$  достигается при угле наклона решета  $\alpha = 16,2^\circ$  и частоте колебаний решета  $\omega = 103,2 \text{ с}^{-1}$ .

В качестве критерия оптимизации работы подсевного решета целесообразно использовать полноту выделения мелкой примеси  $E_p$ . Построенные по результатам экспериментов поверхности отклика (рисунок 11) и их уравнения позволили определить оптимальные значения полноты выделения  $E_p$  в зависимости от нагрузки  $q_k$ , амплитуды  $A$  (18) и частоты колебаний решета  $\omega$  (19):

$$E = 1,627 - 1,9319 \cdot A - 0,0222 \cdot q_k + 0,5 \cdot A^2 + 0,005 \cdot A \cdot q_k - 0,002 \cdot q_k^2, \quad (18)$$

$$E = -5,4511 + 0,09 \cdot \omega - 0,0177 \cdot q_k + 0,0009 \cdot \omega^2 + \\ + 0,0008 \cdot \omega \cdot q_k - 0,0003 \cdot q_k^2. \quad (19)$$

Уменьшение угла наклона решета от оптимального значения приводит к увеличению кинематического режима.

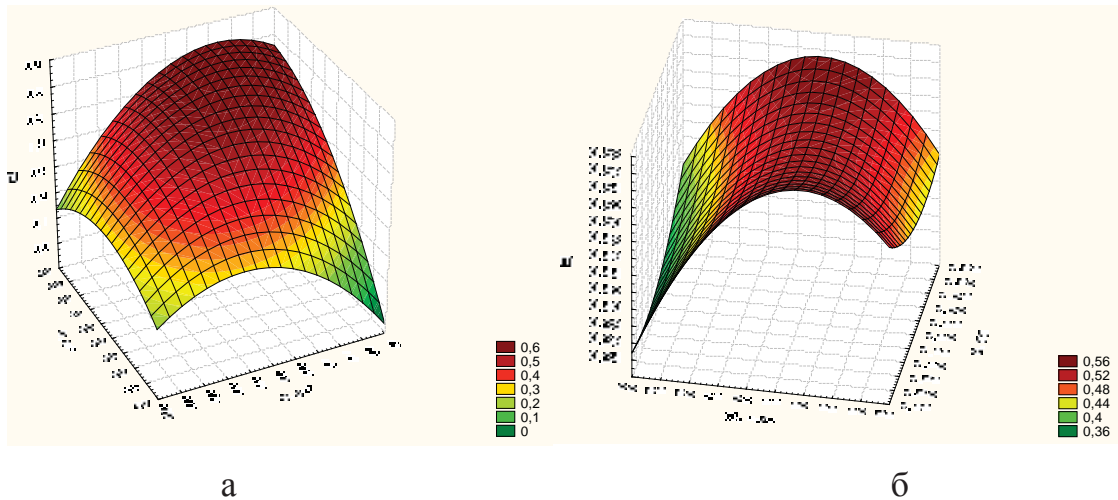


Рисунок 11 – Зависимость полноты выделения подсевного решета  $E_p$  от кинематических параметров:

а –  $A = 1,4$  мм,  $\alpha = 18$  град; б –  $\omega = 160$  с<sup>-1</sup>,  $\alpha = 18$  град

Выбор оптимальных значений кинематических параметров решета и угла его наклона при заданной производительности имеет ряд решений, для которых скорость перемещения материала приобретает оптимальные значения. Например, при нагрузке  $q_k = 5000$  кг/(ч·м<sup>2</sup>) скорость  $V = 0,2$  м/с; при  $q_k = 8500$  кг/(ч·м<sup>2</sup>) –  $V = 0,4$  м/с.

Выполненные исследования и разработанная методика позволяют глубже изучить процесс перемещения сепарируемого материала по решетам, проводить расчётные исследования и определять оптимальные конструктивные и кинематические параметры работы решёт и решётных станов на стадии проектирования и эксплуатации.

В четвертой главе «Обоснование параметров и режимов работы сушилки зерна» обоснована технологическая схема камерной жалюзийной зерносушилки непрерывного действия с инверсией зернового слоя (рисунок 12).



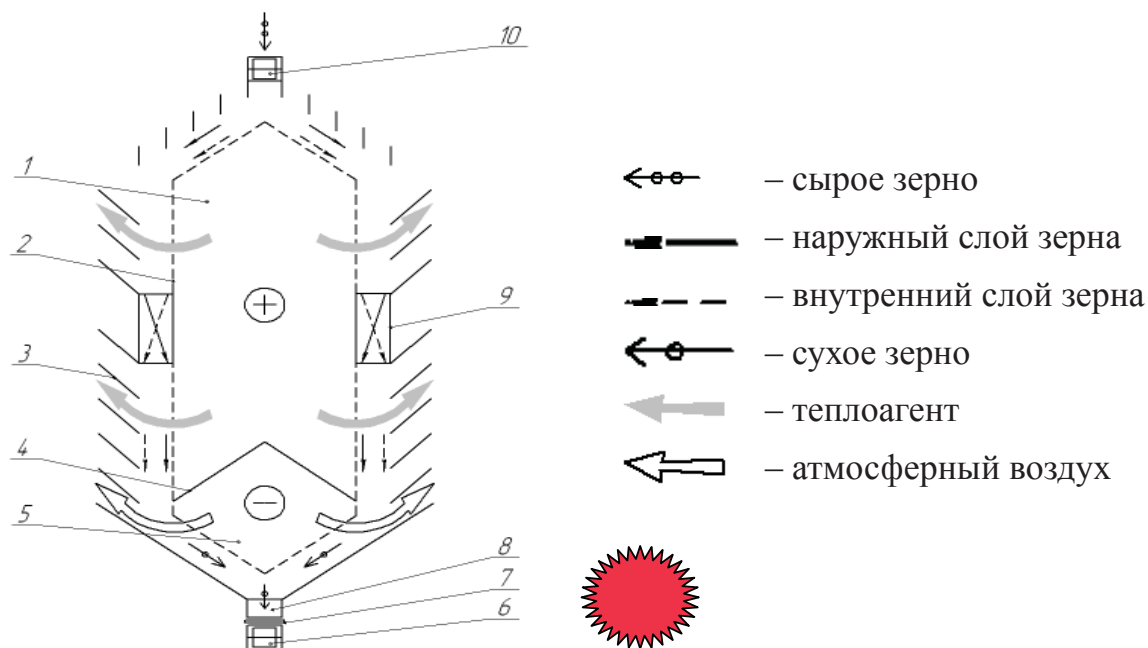


Рисунок 12 – Схема технологического процесса камерной зерносушилки непрерывного действия с инверсией зернового слоя:

1, 5 – камеры нагрева и охлаждения; 2 – внутренняя перфорированная стенка; 3 – наружная жалюзийная стенка; 4 – перегородка; 6 – выгрузной транспортер; 7 – каретка; 8 – приемники; 9 – инвертор; 10 – загрузочный транспортер

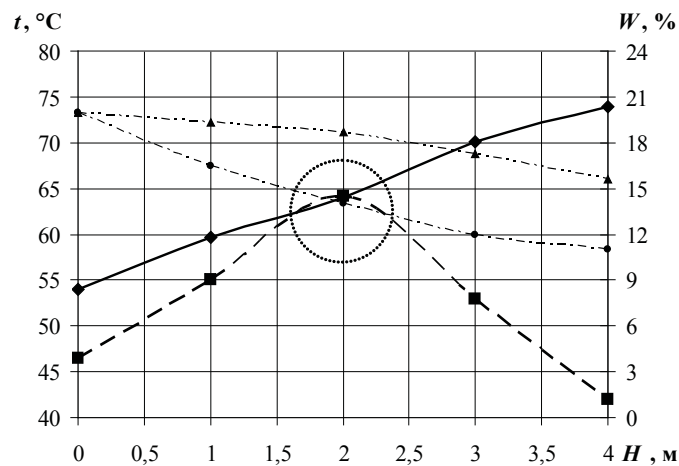
При работе сушилки зерно, находящееся в каналах между стенками 2 и 3, опускается вниз под действием силы тяжести. Агент сушки из полости камеры нагрева 1 проникает через перфорированную поверхность и слой зерна, нагревает последнее и выносит с собой в атмосферу испарившуюся влагу через жалюзийную поверхность. Далее внутренний и наружный слои меняются местами при помощи инвертора 9. Опускаясь ниже, зерно попадает в зону охлаждения 5, где продувается атмосферным воздухом.

Зерновой слой в сушильной камере условно разбиваем на тонкие элементарные слои (толщина 0,0625 м), в которых расход воздуха в секунду составляет не менее 0,017 кг на один килограмм сухого вещества зерна. Весь период сушки разбиваем на малые отрезки времени, в течение которых скорость сушки принимается постоянной. Расчет начинаем с определения количества влаги, испаренной из первого (на входе воздуха) элементарного слоя за первый малый промежуток времени. Определяем снижение влажности зерна в первом элементарном слое, повышение влажности и снижение температуры воздуха, прошедшего этот слой. С такими параметрами воздух

входит во второй элементарный слой. Найдя снижение влажности во всех элементарных слоях за первый период времени, переходим к расчету процесса сушки в последующих интервалах времени. Влажность зерна в сушилке определяем как среднеарифметическую величину влажности элементарных слоев.

Расчеты показали, что зерно в первом элементарном слое нагревается до температуры агента сушки за 10...15 мин. При этом исходная влажность зерна 20% за первые 10 минут уменьшается на 3,27%, далее на 2,96% и 2,60%. Всего за 0,5 часа влажность зерна уменьшается на 7,5%. При этом зерно по высоте сушилки прошло 3,0 м, влажность зерна в последнем четвертом элементарном слое снизилась на 2%.

Исследования в производственных условиях (рисунок 13) подтвердили выявленные теоретические закономерности и позволили определить место установки инвертора на расстоянии 2,0 м от верхнего края сушильной камеры. Эксперимент проведен при температуре агента сушки  $t_{ac} = 70^\circ\text{C}$  и влажности зернового вороха  $W = 19,6\%$ . Обоснованы конструктивные параметры инвертора и стенок камер зерносушилки. Установка инвертора позволила снизить неравномерность влажности слоев на 2,0...3,5%, повысить производительность сушилки на 12...15%.



- — — допустимая температура нагрева зерна;
- — — температура нагрева зерна внутреннего слоя;
- · — · — влажность зерна внутреннего слоя;
- · — · — влажность зерна наружного слоя

Рисунок 13 – Изменение температуры нагрева зерна  $t$  и влажности  $W$  по высоте зерносушилки  $H$

В пятой главе «Эффективность результатов исследования и рекомендации производству» приведен расчет эффективности и предложены перспективы использования результатов исследования в АПК.

На рисунке 14 представлена принципиальная технологическая схема послеуборочной обработки зернового вороха с делением на потоки. Особенностью данной схемы является то, что сушка трех потоков зерна с учетом различного их целевого назначения проводится на двух зерносушилках. После деления зернового вороха пневморешетным сепаратором первый поток семян направляется в зерносушилку 16, где сушится непрерывно при производительности, соответствующей выходу первого потока с пневморешетного сепаратора. Сушка потоков товарного зерна и зерна на технические цели проводится циклами на зерносушилке 17 с использованием бункеров-компенсаторов 18 и 21.

Один цикл работы линии от пуска до остановки состоит из трёх этапов: сушки зерна второго потока до его полной выработки из бункера 21; сушки зерна третьего потока и накопившегося в бункере 18 за время сушки зерна второго потока до его полной выработки; сушки зерна второго потока, накопившегося за время сушки зерна третьего потока, до полной выработки последнего из бункера 21. Цикл завершается в момент, когда зерно в бункере 21 второго потока полностью переработано. Дальнейшая очистка и сортирование потоков осуществляется по самостоятельным схемам.

При очистке и сушке категории репродукционных семян (РСт) влажностью 20% и производительности линии 20 т/ч рекомендуется следующий количественный состав фракций и потоков зерна: репродукционные семена – 30%, товарное зерно – 45%, зерно на технические цели – 24%, остальную часть составляют незерновые отходы. Производительность сушилки 17 по продовольственному зерну составляет 11...12 т/ч (время сушки – 6...8 часов), по зерну на технические цели – 15...17 т/ч. При этом производительность всей линии – 17...19 т/ч, вместимость компенсационного бункера 21 товарного зерна – 30...35 т, бункера 18 зерна на технические цели – 55...60 т. Время досушивания зерна третьего потока, оставшегося после окончания цикла, – 3 часа. При сушке исходного вороха без деления на потоки производительность двух сушилок в семенном режиме составит 12 т/ч. Следовательно, обработка вороха с делением на потоки позволяет повысить производительность линии на 40...60%.



В результате выполненных исследований, проектных и монтажных работ внедрены и рекомендуются для дальнейшего использования на предприятиях АПК: 1) поточная линия с пневморешетным сепаратором для фракционной очистки зерна производительностью 10 т/ч; 2) зерноочистительные линии с пневмоинерционным сепаратором для фракционной очистки зерна; 3) модернизация зерноочистительных линий на базе строительной части агрегатов ЗАВ-20, ЗАВ-40 с использованием оборудования фирмы «Petkus», ОАО ГСКБ «Зерноочистка» и других отечественных машин нового поколения; 4) конструкция камерной зерносушилки непрерывного действия производительностью 6, 10 и 16 плановых т/ч. В соответствии с рекомендациями выполнен монтаж новых и реконструкция существующих (всего более семидесяти) зерноочистительных агрегатов и комплексов, при этом изготовлено и установлено четырнадцать камерных зерносушилок.

Экономический эффект при эксплуатации линий фракционной очистки зерна достигается за счет: увеличения удельной производительности до 60%, повышения эффективности сепарирования и выхода семян на 10...20%, снижения травмирования и повышения всхожести семян на 3...5%, снижения эксплуатационных издержек. Подтвержденный экономический эффект от внедрения в производство результатов исследований в ценах 2011 года составляет свыше 9 млн рублей.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ**

1. Существующая поточная технология послеуборочной обработки зерна не в полной мере отвечает сложившимся темпам и объемам поступления зернового вороха на тока хозяйств, при этом не учитывается биологическая разнокачественность зерна. Решением проблемы могут быть обоснованные технологические схемы процессов с фракционированием зернового вороха и делением его на потоки по технологическому назначению. Это позволит сформировать однородные по качеству потоки зерна, подобрать соответствующие, более эффективные режимы воздействия на них и на этой основе существенно повысить эффективность очистки и сушки зерна.

2. Установлены закономерности и взаимосвязи качественных показателей обработки зернового вороха при его фракционировании и разделении на потоки по технологическому назначению с параметрами и режимами работы технических средств зерноочистительно-сушильных комплексов, что является методической основой их проектирования.

3. Разработаны методика, алгоритм и математические модели фракционирования зернового вороха и формирования потоков обрабатываемого материала по технологическому назначению, которые позволили обосновать параметры и режимы работы технических средств: пневморешетного сепаратора с дифференцированным вводом компонентов в воздушный поток, решёт с изменяющимися кинематическими и конструктивно-технологическими параметрами, камерной зерносушилки непрерывного действия с инверсией зернового слоя.

4. Обоснованы рациональные параметры пневморешетного сепаратора: угол наклона воздушной струи  $10...15^\circ$ ; скорость воздушного потока  $15...20$  м/с; высота выходного отверстия сопла  $275$  мм; длина приемников фракций  $1000...1200$  мм; ширина пневмоканала и каскада решет  $1600$  мм; длина рабочих поверхностей решет  $1500$  мм. Установка пневморешетного сепаратора перед зерноочистительными агрегатами позволяет получить две разнокачественные фракции семян первого класса за один пропуск. При этом производительность линии увеличилась на  $45...60\%$ , выход семян – на  $10...20\%$  и их всхожесть – на  $3...5\%$ . Удельная энергоёмкость очистки снизилась на  $1,2$  МДж/т, затраты труда – на  $0,15$  чел.-ч/т.

5. Установлены закономерности движения зернового вороха по решету с учетом внутрислойных процессов самосортирования и просеивания компонентов сквозь отверстия, определены оптимальные параметры решетных станов пневморешетного сепаратора. Для колосового решета угол наклона –  $15...17^\circ$ , частота колебаний –  $90...100$  с<sup>-1</sup> и амплитуда колебаний –  $1,2...1,4$  мм. Для достижения максимальной полноты выделения подсевным и сортировальными решётами на предлагаемых решётных станах при нагрузке  $5000...8000$  кг/(ч·м<sup>2</sup>) оптимальной является скорость перемещения материала по решету  $0,2...0,35$  м/с.



6. Определены конструктивно-технологические параметры камерной зерносушилки непрерывного действия: внутренние рабочие поверхности камер нагрева и охлаждения выполнены из перфорированного листа с коэффициентом живого сечения  $k = 0,06 \dots 0,10$ , наружные – жалюзийные; толщина рабочей зоны сушки зерна  $H = 250$  мм; инвертора, установленного на расстоянии  $h = 2$  м от места загрузки в зерносушилку. Сушилка с установленными параметрами позволила снизить неравномерность влажности слоев с  $6 \dots 7\%$  до  $2,5 \dots 3,5\%$ , повысить производительность сушилки на  $12 \dots 15\%$ , экономию топлива и электроэнергии довести до  $30\%$ .

7. Обоснована технологическая линия с разделением зернового вороха на потоки и их сушкой двумя зерносушилками. При очистке и сушке семян с исходной чистотой  $90\%$  и влажностью  $20\%$ , предназначенных для посева на товарные цели, рациональными являются следующие соотношения состава потоков: репродукционные семена –  $30 \dots 35\%$ , продовольственное зерно  $40 \dots 45\%$ , зерно на технические цели –  $20 \dots 25\%$ . Первая сушилка непрерывно сушит поток семян с производительностью  $6 \dots 7$  т/ч, вторая поочередно сушит продовольственное зерно с производительностью  $12 \dots 13$  т/ч и зерно на технические цели с производительностью  $15 \dots 17$  т/ч. Вместимость компенсационного бункера товарного зерна –  $30 \dots 35$  т, бункера фуражного зерна –  $55 \dots 60$  т.

8. В результате проведенных исследований разработаны практические рекомендации по совершенствованию технических средств, проектированию новых и реконструкции существующих зерноочистительных агрегатов и зерноочистительно-сушильных комплексов, одобренные НТС межрегионального комитета по сельхозмашиностроению Ассоциации экономического взаимодействия областей и республик Уральского региона.

Разработанные технические средства, зерноочистительные агрегаты и зерноочистительно-сушильные комплексы представлены в завершённом виде и внедрены в производство. Подтверждённый экономический эффект от использования в производстве результатов исследований в ценах 2011 года составляет 9 млн рублей.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Чумаков, В. Г. Алгоритм расчёта процесса сепарации на решётных устройствах [Текст] / А. В. Фоминых, В. Г. Чумаков // Аграрный вестник Урала. – 2010. – № 7. – С. 77–79.
2. Чумаков, В. Г. Деление зернового вороха на фракции пневморешётным сепаратором [Текст] / В. Г. Чумаков // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2011. – № 12. – С. 31–33.
3. Чумаков, В. Г. Исследование структуры воздушного потока в канале пневморешётного сепаратора [Текст] / В. Г. Чумаков // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2008. – № 7. – С. 100–104.
4. Чумаков, В. Г. Методика расчёта процесса просеивания проходных частиц в круглые отверстия решёт [Текст] / А. В. Фоминых, В. Г. Чумаков, И. В. Шевцов, А. М. Косовских // Аграрный вестник Урала. – 2010. – № 7. – С. 80–81.
5. Чумаков, В. Г. Моделирование процессов послеуборочной обработки зерна [Текст] / В. Г. Чумаков, А. С. Жанахов, А. Г. Надточий, С. С. Низавитин // Инновационные технологии и техника нового поколения – основа модернизации сельского хозяйства : материалы Междунар. науч.-практ. конф. ГНУ ВИМ Россельхозакадемии. – М., 2011. – С. 85–86.
6. Чумаков, В. Г. Оптимизация процесса сепарирования на колосовых решётах [Текст] / А. В. Фоминых, В. Г. Чумаков, С. И. Родионова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011. – № 9. – С. 26–28.
7. Чумаков, В. Г. Оценка эффективности работы пневморешётного сепаратора с рассредоточенным вводом зернового вороха в воздушный поток [Текст] / В. Г. Чумаков // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2010. – № 4. – С. 92–94.
8. Чумаков, В. Г. Результаты исследования жалюзийной зерносушилки камерного типа [Текст] / Н. И. Косилов, В. Г. Чумаков, А. С. Жанахов // Достижения науки и техники АПК. – 2009. – № 4. – С. 60–62.

9. Чумаков, В. Г. Реконструкция зерноочистительных агрегатов [Текст] / С. И. Оплетаев, В. Г. Чумаков, Ю. Н. Мекшун, И. В. Шевцов // Сельский механизатор. – 2006. – № 10. – С. 40.

10. Чумаков, В. Г. Семена по ранжиру в строй [Текст] / Н. И. Косилов, А. В. Фоминых, В. Г. Чумаков // Сельский механизатор. – 2006. – № 2. – С. 18–19.

11. Чумаков, В. Г. Сепарация зернового вороха наклонным воздушным потоком [Текст] / В. Г. Чумаков // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2009. – № 3. – С. 83–88.

12. Чумаков, В. Г. Сеялка зерновая безрядковая [Текст] / А. С. Архипов, В. Г. Чумаков // Сельский механизатор. – 2004. – № 3. – С. 9–10.

13. Чумаков, В. Г. Технологическая линия послеуборочной обработки зерна с делением на потоки [Текст] / Г. А. Окунев, В. Г. Чумаков, А. С. Жанахов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2011. – № 9. – С. 18–22.

14. Чумаков, В. Г. Экспериментальные исследования косоугольного удара [Текст] / В. Г. Чумаков, С. И. Родионова // Инновационные технологии и техника нового поколения – основа модернизации сельского хозяйства : материалы Междунар. науч.-практ. конф. ГНУ ВИМ Россельхозакадемии. – М., 2011. – С. 42–43.

### **Публикации в других изданиях**

15. Чумаков, В. Г. Агробиологическое обоснование фракционирования [Текст] / В. Г. Чумаков // Тез. докл. на XI науч.-техн. конф. – Челябинск, 2001. – С. 204–206.

16. Чумаков, В. Г. Газовое сопротивление слоя [Текст] / В. Г. Чумаков, А. С. Жанахов // Аграрная наука – основа инновационного развития АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф. : в 2-х т. – Курган, 2011. – Т. 1. – С. 414–417.

17. Чумаков, В. Г. Зерноочистительный сушильный комплекс [Текст] / В. Г. Чумаков, А. С. Жанахов, А. М. Косовских, И. В. Счастливых // Инновационные пути решения проблем АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию Курганской ГСХА : в 2-х т. – Курган, 2009. – Т. 2. – С. 391–394.

18. Чумаков, В. Г. Зерносушилки и направления их развития [Текст] / В. Г. Чумаков, А. С. Жанахов // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству», посвящ. 100-летию со дня рождения И. Е. Ульямана. – Челябинск, 2008. – Ч. 3. – С. 38–42.

19. Чумаков, В. Г. Инверсия зернового слоя в камерной зерносушилке непрерывного действия [Текст] / В. Г. Чумаков, А. С. Жанахов // Вестник КГУ. – Сер. «Технические науки». – Курган, 2011. – Вып. 6. – С. 115–117.

20. Чумаков, В. Г. Исследование работы решётного стана при больших нагрузках [Текст] / В. Г. Чумаков // Проблемы механизации сельскохозяйственного производства Северного Казахстана – Тез. докл. VIII науч.-практ. конф. – Кустанай, 1992. – С. 98–99.

21. Чумаков, В. Г. Камерная зерносушилка непрерывного действия [Текст] / В. Г. Чумаков, А. С. Жанахов // Материалы I Междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск, 2011. – Ч. IV. – С. 115–119.

22. Чумаков, В. Г. Математическое описание процесса фракционирования зернового вороха в пневморешетном сепараторе [Текст] / В. В. Пивень, А. А. Лопан, А. В. Фоминых, В. Г. Чумаков // Рук. депонирована в ВИНТИ № 903-В 99 от 24 марта 1999. – 6 с.

23. Чумаков, В. Г. Методика расчёта траектории движения частицы в свободно затопленной струе [Текст] / А. В. Фоминых, А. А. Лопан, В. Г. Чумаков // Материалы региональной науч.-практ. конф. Через опыт в науку. – Курган, 1995. – С. 96–97.

24. Чумаков, В. Г. Модернизация поточных линий на базе пневмоинерционного сепаратора [Текст] / В. Г. Чумаков, Ю. Н. Мекшун, И. В. Шевцов, С. И. Оплетаев // Сто лет сибирской маслодельной кооперации : материалы Междунар. науч.-практ. конф. : в 4-х т. – Куртамыш, 2007. – Т. 4. – С. 137–140.

25. Чумаков, В. Г. Обоснование и исследование способа решётной очистки семенных смесей [Текст] / А. А. Лопан, В. Г. Чумаков // Индустриальные технологии и перспективные рабочие органы машин для послеуборочной обработки зерна : сб. науч. трудов / ВАСХНИЛ, Сиб. отделение. – Новосибирск, 1986. – С. 112–115.

26. Чумаков, В. Г. Оптимизация инвертора зерносушилки [Текст] / В. Г. Чумаков, А. С. Жанахов // Вестник Международной

академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. – Курган : РИЦ КГУ, 2011. – Т. 16. – № 3. – С. 100–101.

27. Чумаков, В. Г. Повышение эффективности пневмосепарирования зерна [Текст] / Х. Х. Гималов, В. Г. Чумаков // Информационный листок № 167–84. – Курган : ЦНТИ, 1984. – 4 с.

28. Чумаков, В. Г. Повышение эффективности работы зерноочистительных агрегатов [Текст] / В. Г. Чумаков // Материалы региональной науч.-практ. конф. – Курган, 2001. – С. 79–81.

29. Чумаков, В. Г. Послеуборочная обработка зерна и сортирование семян, проблемы и пути решения [Текст] / И. П. Лапшин, В. Г. Чумаков, Ю. Н. Мекшун, И. В. Шевцов, С. И. Оплетаев // Нивы Зауралья. – 2007. – № 7. – С. 40–41.

30. Чумаков, В. Г. Пути снижения энергозатрат при сушке зерна [Текст] / В. Г. Чумаков, А. С. Жанахов // Устойчивое развитие агропромышленного комплекса и сельских территорий : материалы Междунар. науч.-практ. конф. : в 4-х т. – Курган, 2008. – Т. 4. – С. 17–20.

31. Чумаков, В. Г. Расчёт сезонной производительности зерносушилок [Текст] / В. Г. Чумаков, А. С. Жанахов, А. М. Косовских // Проблемы модернизации АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф. : в 2-х т. – Курган, 2010. – Т. 2. – С. 394–397.

32. Чумаков, В. Г. Результаты исследования решётного стана с изменяющимся по длине решета кинематическим режимом [Текст] / В. Г. Чумаков, И. В. Счастливых, А. М. Косовских // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству», посвящ. 100-летию со дня рождения И. Е. Ульмана. – Челябинск, 2008. – Ч. 3. – С. 42–47.

33. Чумаков, В. Г. Результаты производственных испытаний пневморешетного сепаратора [Текст] / В. Г. Чумаков, А. А. Лопан // Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам интенсификации сельского хозяйства. – Шортанды, 1993. – С. 127–128.

34. Чумаков, В. Г. Рекомендации по модернизации и реконструкции зерноочистительных агрегатов и комплексов в хозяйствах АПК Российской Федерации [Текст] / В. Г. Чумаков // Материалы НТС. – Курган, 2007. – 40 с.

35. Чумаков, В. Г. Решётный конвейер для сепарации зерновых смесей [Текст] : в 2-х т. / Ю. Н. Мекшун, В. Г. Чумаков,

С. И. Оплетаев // Научные результаты агропромышленному производству : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Курган, 2004. – Т. 2. – С. 388–390.

36. Чумаков, В. Г. Семяочистительная линия [Текст] / В. Г. Чумаков, С. И. Оплетаев, Ю. Н. Мекшун, И. В. Шевцов // Достижение науки в реализацию национального проекта «Развитие АПК» : материалы Междунар. науч.-практ. конф. : в 3-х т. – Куртамыш, 2006. – Т. 3. – С. 57–59.

37. Чумаков, В. Г. Сепаратор с горизонтальным кольцевым воздушным каналом [Текст] / В. Г. Чумаков, И. В. Шевцов, А. Г. Надточий // Материалы XLIX Междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск, 2010. – Ч. 2. – С. 277–280.

38. Чумаков, В. Г. Сепарирование на решетках с увеличивающимися по длине отверстиями [Текст] / В. В. Пивень, В. Г. Чумаков // Рук. депонирована в ВИНТИ № 901-В 99 от 24 марта 1999. – 5 с.

39. Чумаков, В. Г. Состояние и перспективы развития технологии и технических средств для послеуборочной обработки зерна [Текст] / В. Г. Чумаков // Сто лет сибирской маслодельной кооперации : материалы Междунар. науч.-практ. конф. : в 4-х т. – Куртамыш, 2007. – Т. 4. – С. 131–137.

### **Авторские свидетельства, патенты**

40. А. с. № 1274781 СССР, МКИ В 07 В 1/28 Решётный стан / А. А. Лопан, Х. Х. Гималов, В. В. Неволин, В. Г. Чумаков (СССР). – № 3858072/28-13 ; заяв. от 19.02.85 ; опубл. 07.12.86, Бюл. № 45.

41. А. с. № 1407581 СССР, МКИ В 07 В 1/28 Решётный стан / А. С. Архипов, А. А. Лопан, В. Г. Чумаков (СССР). – № 4019060/29-03 ; заяв. от 06.02.86 ; опубл. 07.07.88, Бюл. № 25.

42. А. с. № 1435321 СССР, МКИ В 07 В 1/28 Решётный стан / А. А. Лопан, А. С. Архипов, Х. Х. Гималов, В. Г. Чумаков (СССР). – № 4014824/29-03 ; заяв. от 30.01.86 ; опубл. 07.11.88, Бюл. № 41.

43. А. с. № 1579592 СССР, МКИ В 07 В 13/065 Устройство для сепарирования сыпучих материалов / А. А. Лопан, В. Г. Чу-



маков (СССР). – № 4381207 ; заяв. от 23.02.88 ; опубл. 23.07.90, Бюл. № 27.

44. Пат. 2238804 Российская Федерация, МПК В 07 В 13/00. Устройство для сепарации зерна / А. С. Архипов, В. М. Овчинников, Д. Н. Овчинников, В. Г. Чумаков, Ю. Н. Мекшун ; заявитель и патентообладатель КГСХА имени Т. С. Мальцева. – № 2003103841 ; заявл. 10.02.03 ; опубл. 27.10.04, Бюл. № 30.

45. Пат. на полезную модель 78701 Российская Федерация, МПК В 07 В 1/04. Сито / А. С. Архипов, О. Р. Глухих, В. Г. Чумаков ; заявитель и патентообладатель А. С. Архипов. – № 2008113647/22 ; заявл. 07.04.08 ; опубл. 10.12.08, Бюл. № 34.

46. Пат. 2344004 Российская Федерация, МПК В 07 В 9/02 Сепаратор зерновой / А. С. Архипов, О. Р. Глухих, В. Г. Чумаков ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО КГСА имени Т. С. Мальцева. – № 2007119858/03 ; заявл. 28.05.07 ; опубл. 20.01.09, Бюл. № 2.

47. Пат. 2370328 Российская Федерация, МПК В 07 В 9/02 Сепаратор пневморешетный радиальный / А. С. Архипов, О. Р. Глухих, В. Г. Чумаков, И. В. Счастликов ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО КГСХА имени Т. С. Мальцева. – № 2008104599/03 ; заявл. 06.02.08 ; опубл. 20.10.09, Бюл. № 29.

48. Пат. 2343669 Российская Федерация, МПК В 07 В 9/02 Сепаратор зерновая безрядковая стерневая / А. С. Архипов, И. В. Вороков, С. И. Оплетаев, В. Г. Чумаков ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО КГСХА имени Т. С. Мальцева. – № 2007119855/12 ; заявл. 28.05.07 ; опубл. 20.01.09, Бюл. № 2.

49. Пат. на полезную модель 105727 Российская Федерация, МПК F 26 В 17/12. Зерносушилка / В. Г. Чумаков, А. С. Архипов, А. С. Жанахов, И. В. Шевцов, Ю. Н. Мекшун, С. И. Оплетаев, А. М. Косовских ; заявитель и патентообладатель В. Г. Чумаков. – № 2010151881/06 ; заявл. 17.12.10 ; опубл. 20.06.11, Бюл. № 17.

50. Пат. на полезную модель 107492 Российская Федерация, МПК В 07 В 4/02. Пневмосепаратор сыпучих материалов / А. С. Архипов, В. Г. Чумаков, И. В. Шевцов, А. Г. Надточий ; заявитель и патентообладатель И. В. Шевцов. – № 2011112225/03 ; заявл. 30.03.11 ; опубл. 20.08.11, Бюл. № 23.

---

Подписано в печать 13.02.2012 г. Формат 60×84/16  
Гарнитура Times. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 25

---

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Челябинская государственная агроинженерная академия»  
454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 75