

На правах рукописи



**ЖИГЖИТОВ АЛЕКСЕЙ ОЛЕГОВИЧ**

**ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ВОЗДУШНО-ГРАВИТАЦИОННОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ  
ОЧИСТКИ ЗЕРНА**

Специальность 05.20.01 —  
«Технологии и средства механизации сельского хозяйства»

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Улан-Удэ — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» (ФГБОУ ВО ВСГУТУ) в период с 2010 по 2016 г.

Научный руководитель: **Ямпилев Сэнгэ Самбуевич**,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Дринча Василий Михайлович**,  
доктор технических наук, профессор,  
ООО Агроинженерный инновационно-исследовательский центр «ИНАГРО»,  
генеральный директор

**Стрикунов Николай Иванович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет»,  
доцент кафедры «Сельскохозяйственной техники и технологий»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья»

Защита состоится « 3 » марта 2017 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.039.06 при ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» по адресу: 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская 40в.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская 40в, ученому секретарю диссертационного совета ДМ 212.039.06.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
ДМ 212.039.06,  
кандидат технических наук

 Цыдендоржиев Б. Д.

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы.** В настоящее время производство зерновых материалов характеризуется тенденцией обработки всего валового сбора урожая непосредственно в хозяйствах, а постоянный рост цен на энергоносители приводит к тому, что многие хозяйства не могут уже сохранить собранное зерно без существенных его потерь из-за несвоевременной обработки, которые составляют 22...35%.

Имеющаяся в сельском хозяйстве зерноочистительная техника морально устарела, так как не соответствует современным условиям зернопроизводства и физически изношена на 70—90%. Обеспеченность крупных и средних хозяйств не превышает 35%, а малые и фермерские хозяйства вообще не имеют требуемой техники.

В связи с этим поиск путей повышения эффективности сепарации зерна при минимальных капитальных и энергетических затратах в воздушных и гравитационных сепараторах без особого их удорожания, является актуальной задачей, приводящая к повышению качества разделения зернового материала и уменьшению его потерь.

Исследования по разработке нового воздушно-гравитационного сепаратора для очистки зерна выполнены в Восточно-Сибирском государственном университете технологий и управления по планам госбюджетных научно-исследовательских работ по теме: «Ресурсо-энергосберегающие технологии и технические средства по обработке и переработке сырья растительного происхождения» (гос. регистрация №01201254456).

**Целью** является повышение эффективности очистки зерна от крупных, мелких и легких примесей за счет применения новой конструкции воздушно-гравитационного сепаратора и обоснования его параметров.

### **Основные задачи исследования:**

- разработать математическую модель процесса разделения зерновых смесей на воздушно-гравитационном сепараторе для очистки зернового материала от примесей;
- изучить влияние основных параметров воздушно-гравитационного сепаратора для очистки зерна, а также физико-механических свойств зернового материала на эффективность выделения крупных, мелких и легких примесей. Экспериментально обосновать его основные параметры.
- изучить работоспособность воздушно-гравитационного сепаратора для очистки зерна в хозяйственных условиях.

### **Научная новизна:**

- математическая модель процесса сепарации зернового материала воздушно-гравитационным сепаратором;
- конструктивно-технологические параметры воздушно-гравитационного сепаратора для очистки зерна для одновременного выделения легких,

мелких и крупных примесей из зернового материала (защищен патентом РФ № 2471572).

**Практическая ценность.** Разработаны рекомендации по выбору основных конструктивных параметров и режимов работы воздушно-гравитационного сепаратора для очистки зерна от легких, мелких и крупных примесей. Обоснована технологическая схема очистки зерна с использованием воздушно-гравитационного сепаратора.

**Реализация результатов исследования.** В результате проведенных исследований разработан воздушно-гравитационный сепаратор для очистки зерна и внедрен в ООО «Племзавод Боргойский» Джидинского района и СПК «Михайловка» Закаменского района Республики Бурятия.

**Апробация работы.** Материалы диссертации доложены, обсуждены и одобрены на научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава и аспирантов ВСГУТУ (2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016), на международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию БГСХА и 50-летию инженерного факультета Бурятской сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова, «Инженерное обеспечение и технический сервис в АПК» (2011), на международной научно-практической конференции «Проблемы динамики и прочности современных машин» (2016).

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 11 печатных изданиях, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 1 патент на изобретение РФ.

## Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования и дана краткая характеристика работы и сформулированные основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен анализ урожайности и валового сбора зерновых культур в Республике Бурятия с 2012 по 2014 гг., анализ конструкций гравитационных сепараторов и пневмосепарирующих систем как отечественных, так и зарубежных компаний.

Вопросам сепарирования зерновых смесей посвящены работы М.Н. Летошнев, И.Е. Кожуховского, Г.Д. Терского, П.М. Василенко, В.И. Анискина, В.В. Гортинского, В.М. Цециновского, А.С. Матвеева, А.Я. Малис, А.Н. Зюлина, Ю.И. Ермольева, Н.А. Урханова, В.М. Дринчи, Н.М. Иванова, Г.Ф. Ханхасаева, Н.И. Стрикунова и многих других.

На основе анализа всех существующих зерноочистительных машин, можно сделать вывод о том, что наиболее перспективным направлением в разработке машин для очистки зерна является объединение положительных качеств воздушных и гравитационных сепараторов, благодаря чему за одну технологическую операцию можно выделить легкие, мелкие и крупные примеси из зерновой смеси одновременно.

**Во второй главе** получены аналитические зависимости процесса движения частиц зернового материала по наклонной скатной доске и сепарирующей гребенке, разработаны математические модели процесса разделения частиц зерновой смеси воздушно-гравитационным сепаратором.

Воздушно-гравитационный сепаратор для очистки зерна отличается от всех существующих сепараторов тем, что:

- при входе в пневмоканал, в котором имеются несколько перегородок прямоугольного сечения установлено приемное решето для выделения особо крупных примесей;
- для разделения зернового материала на две фракции: - основное зерно с мелкой примесью и основное зерно с крупной примесью вначале гравитационного сепаратора установлен блок предварительного распределения, который состоит из системы гребенок с отверстиями пропускающими частицы мелкой примеси и часть основного зерна;
- для эффективного выделения проходовых частиц над сплошными скатными досками установлены отражатели.

На рисунке 1 показано распределение частиц по высоте пневмосепарирующего канала, где  $B$  - глубина пневмосепарирующего канала;  $V$  - скорость воздушного потока;  $h_1, h_2, h_3 \dots h_n$  - уровни, на которых находятся препятствия (частицы зерна основной культуры, витающие в пневмоканале); 1 - загрузочный бункер; 2 - заслонка подачи материала; 3 - приемное решето; 4 - пневмоканал; 5 - перегородки; 6 - патрубок для вывода сходовой фракции.

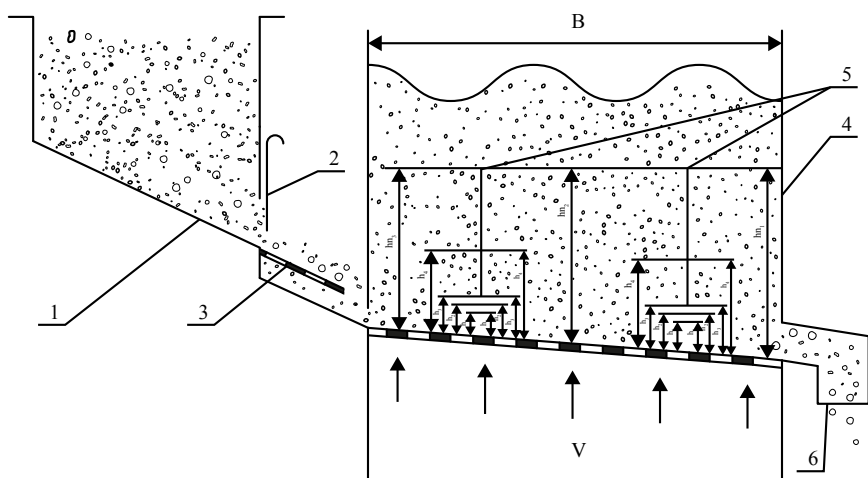


Рис. 1 — Распределение частиц по высоте пневмосепарирующего канала

Полнота выделения проходовых частиц приемного решета определяется по формуле:

$$\varepsilon = P_{\text{прох}} - P_{\text{прох}} \cdot e^{-\mu_{\text{прох}} t} = P_{\text{прох}} \cdot e^{-\mu_{\text{прох}} x_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{прох}}$  - общее количество проходových частиц;

$\mu_{\text{прох}}$  - интенсивность просеивания проходových частиц через приемное решето;

$t$  - время просеивания проходových частиц в отверстия приемного решета;

$\mu_x$  - интенсивность просеивания проходových частиц по длине решета;

$x_{\text{пр}}$  - длина приемного решета.

Полнота выделения легких частиц в пневмоканале, в котором установлены перегородки прямоугольного сечения определяется известной формулой:

$$\varepsilon = \frac{1}{K} \left\{ \frac{Q_0^n \cdot \left[ 1 - e^{-\mu_{n1} t} \cdot \left( 1 + \frac{\mu_{n1} t}{1!} + \frac{(\mu_{n1} t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\mu_{n1} t)^{n_1 - 1}}{(n_1 - 1)!} \right) \right]}{Q_0^n} - \frac{\left[ e^{-\mu_{n2} t} \cdot \left( 1 + \frac{\mu_{n2} t}{1!} + \frac{(\mu_{n2} t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\mu_{n2} t)^{n_2 - 1}}{(n_2 - 1)!} \right) \right]}{Q_0^n} - \frac{\left[ e^{-\mu_{n3} t} \cdot \left( 1 + \frac{\mu_{n3} t}{1!} + \frac{(\mu_{n3} t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\mu_{n3} t)^{n_3 - 1}}{(n_3 - 1)!} \right) \right]}{Q_0^n} \right\}, \quad (2)$$

где  $n_3$  - равные уровни пневмоканала по высоте третьего отсека;

$\mu_{n1}$  - интенсивность выноса легких частиц,  $c^{-1}$ , в первом отсеке;

$K$  - коэффициент, учитывающий пространство препятствий, который зависит от концентрации витающего слоя зерновок.

Полнота выделения легких частиц воздушным потоком за время  $\Delta t$  определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{л}}(\Delta t, t) = \frac{Q_{\text{л}}(\Delta t, t)}{Q_0^n - Q_{\text{л}}(t)}. \quad (3)$$

где  $Q_{\text{л}}(\Delta t, t)$  - количество легких частиц выделившихся в следующий за  $t$  малый промежуток времени  $\Delta t$ ;

$Q_0^n$  - количество легких частиц в общем потоке зернового материала, поступивших в пневмоканал в момент времени  $t = 0$ .

Таким образом, формула (3) описывает процесс сепарации компонентов зернового материала в пневмоканале с перегородками.

Для теоретического определения оптимальных параметров гравитационного сепаратора с блоком предварительного распределения, необходимо представить процесс сепарации компонентов зернового материала математической моделью.

Рассмотрим процесс сепарации зернового материала гравитационным сепаратором с блоком предварительного распределения (рисунок 2).

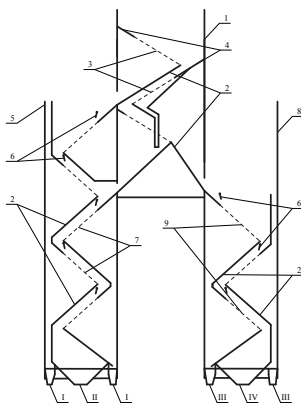


Рис. 2 — Конструктивная схема гравитационного сепаратора

Гравитационный сепаратор с блоком предварительного распределения (рисунок 2) содержит блок предварительного распределения 1, дефлекторы 2, сепарирующие гребенки 3 для выделения основного зерна и мелкой примеси (проходовая фракция), скатные доски 4, левую колонку 5, отражатели 6, сепарирующие гребенки 7 для выделения мелкой примеси (проходовая фракция), правую колонку 8, сепарирующие гребенки 9 для выделения основного зерна (проходовая фракция), патрубки I для вывода проходовой (мелкой) фракции с сепарирующих гребенок 7, патрубок II для вывода сходовой (средней) фракции (основного зерна) с гребенок 7, патрубок III для вывода проходовой (средней) фракции (основного зерна) с гребенок 9, патрубок IV для вывода сходовой (крупной) фракции с гребенок 9.

Отличается данный сепаратор от всех существующих тем, что вначале имеется блок предварительного распределения компонентов зернового материала. Данный блок предназначен для предварительного разделения зернового материала на две фракции:

- 1 фракция — основное зерно с крупными примесями;
- 2 фракция — основное зерно с мелкими примесями.

Дальше эти фракции обрабатываются отдельно друг от друга. Первая фракция основного зерна с крупными примесями обрабатываются на гравитационном сепараторе (колонке) с гребенками пропускающими частицы основного зерна и не пропускающими частицы крупной примеси. А вторая фракция основного зерна с мелкими примесями обрабатывается на отдельной колонке гравитационного сепаратора с гребенками пропускающими частицы мелкой примеси, но не пропускающими частицы основного зерна.

Рассмотрим процесс сепарации зернового материала в блоке предварительного распределения. Предположим, что исходный зерновой материал после обработки в пневмоканале состоит из трех компонентов: основное зерно – компонент пшеница, которое составляет до 85% от массы исходного зернового материала поступившая после обработки в пневмоканале. И крупная и мелкая примесь составляющие до 15% от массы исходного зернового материала.

Согласно конструктивной схеме, блок предварительного распределения (рисунок 2) имеет: гребенки установленные зигзагообразно, отверстиями пропускающими часть основного зерна и частицы мелкой примеси.

Блок предварительного распределения работает следующим образом: исходный зерновой материал поступает на первую гребенку установленную под определенным углом к горизонту. Гребенка представляет собой сваренные параллельно друг другу на определенном расстоянии стальные прутки. Причем расстояние между прутками выбраны таким образом, чтобы все частицы мелкой примеси проходят в отверстия гребенки и часть основного зерна также проходит в отверстия гребенки. Под действием сил гравитации все частицы зернового материала перемещаются вниз по гребенке. Подача исходного зернового материала на первую гребенку осуществляется равномерно по всей ширине гребенки. При этом частицы мелкой примеси и часть основного зерна идут проходом через верхнюю первую гребенку и поступают на скатную доску, при этом направление движения зернового потока меняется. Мелкие частицы зернового материала опускаются в нижние слои зернового материала. А затем – на верхнюю вторую гребенку, где мелкие примеси и часть основного зерна проходят в отверстия второй гребенки, а частицы крупной примеси и не прошедшие частицы основного зерна идут сходом и поступают на нижерасположенную скатную доску. Перемещаясь по этой скатной доске, зерновой материал поступает на верхнюю третью гребенку, где частицы мелкой примеси и основного зерна проходят в отверстия гребенки, а частицы крупной примеси и основного зерна не прошедшие в отверстия третьей гребенки идут сходом, поступая в правую колонку гравитационного сепаратора. А прошедшие в отверстия первой, второй и третьей гребенки частицы мелкой примеси и основного зерна поступают в левую колонку гравитационного сепаратора.

Для описания процесса сепарации зернового материала в блоке предварительного распределения предположим, что процесс просеивания осуществляется в однородных условиях, так как частицы компонентов зернового материала (частицы мелкой, крупной примеси и основного зерна) одинаковы и гребенки установленные в блоке предварительного распределения одинаковы (размеры отверстий между прутками, длина, ширина, угол наклона к горизонту), при этом полнота просеивания проходных частиц (мелкой примеси)  $\varepsilon_{1np}^M$  на участке гребенки длиной  $x_{1np}$  на верхней первой гребенке, где расстояния между прутками в гребенках одинаково и выбрано таким образом, что частицы мелкой примеси и часть частиц основного зерна проходят в отверстия гребенок, а частицы круп-



ной примеси не проходят, при подаче зернового материала слоем определенной толщины определяется выражением:

$$\varepsilon_{1 \text{ пр}}^M = p^M \cdot (1 - e^{-\mu_{\text{м пр}} x_{1 \text{ пр}}}), \quad (4)$$

где  $\mu_{\text{м пр}}$  - интенсивность просеивания проходových частиц (мелкой примеси),  $\text{дм}^{-1}$ ;

$x_{1 \text{ пр}}$  - длина верхней первой гребенки блока предварительного распределения;

$p^M$  - исходное количество проходových частиц (мелкой примеси), поступающего на верхнюю первую гребенку блока предварительного распределения.

Интенсивность просеивания частиц мелкой примеси  $\mu_{\text{м пр}}$  зависит от следующих факторов: размеров частиц мелкой примеси, физико-механических свойств мелкой примеси, характера распределения материала на гребенке, удельной нагрузки, параметров гребенки (угол наклона к горизонту, длина гребенок, размера отверстий между прутками, состояние поверхности гребенок) и конструкции гребенок.

Частицы мелкой примеси прошедшие через верхнюю первую гребенку попадают на скатную доску, а затем в левую колонку гравитационного сепаратора.

Частицы основного зерна, крупная и мелкая примеси не прошедшие в отверстия верхней первой гребенки блока предварительного распределения поступают сходом на скатную доску, при этом направление движения зернового потока меняется. А затем – на верхнюю вторую гребенку блока предварительного распределения.

Не прошедшие частицы мелкой примеси через верхнюю вторую гребенку блока предварительного распределения и основное зерно, а также крупная примесь поступают сходом на скатную доску, направление зернового потока меняется и дальше на верхнюю третью гребенку блока предварительного распределения.

Полнота просеивания частиц мелкой примеси на верхней третьей гребенке блока предварительного распределения определяется следующим выражением:

$$\varepsilon_{3 \text{ пр}}^M = [(p^M - p^M \cdot e^{-\mu_{\text{м пр}} x_{1 \text{ пр}}}) \cdot (1 - e^{-\mu_{\text{м пр}} x_{2 \text{ пр}}}) \cdot (1 - e^{-\mu_{\text{м пр}} x_{3 \text{ пр}}})], \quad (5)$$

где  $x_{3 \text{ пр}}$  - длина верхней третьей гребенки блока предварительного распределения,  $\text{дм}$ .

Полнота просеивания проходových частиц (основного зерна)  $\varepsilon_{1 \text{ пр}}^0$  на участке гребенки длиной  $x_{1 \text{ пр}}$  на верхней первой гребенке блока предварительного распределения при подаче зернового материала слоем определенной толщины определяется выражением:

$$\varepsilon_{1 \text{ пр}}^0 = p^0 \cdot (1 - e^{-\mu_{0 \text{ пр}} x_{1 \text{ пр}}}), \quad (6)$$

где  $\mu_{0 \text{ пр}}$  - интенсивность просеивания проходowych частиц (основного зерна),  $\text{дм}^{-1}$ ;

$x_{1 \text{ пр}}$  - длина верхней первой гребенки блока предварительного распределения;

$p^0$  - исходное количество проходowych частиц (основного зерна), поступающего на верхнюю первую гребенку блока предварительного распределения.

Интенсивность просеивания проходowych частиц (основного зерна)  $\mu_{0 \text{ пр}}$  зависит от следующих факторов: размеров частиц основного зерна, физико-механических свойств основного зерна, характеристика распределения материала на гребенке, удельной нагрузки, параметров гребенки (угол наклона гребенок к горизонту, длины гребенок, размера отверстий между прутками, состояние поверхности гребенок) и конструкции гребенок.

Сход – частицы основного зерна, крупная и мелкая примесь не прошедшие в отверстия верхней первой гребенки блока предварительного распределения поступают сходом на скатную доску, при этом направление движения зернового потока меняется. После скатной доски они поступают на верхнюю вторую гребенку блока предварительного распределения.

Частицы основного зерна прошедшие в отверстия верхней второй гребенки поступают на скатную доску, скатываясь по ней поступают в левую колонку гравитационного сепаратора.

Не прошедшие частицы основного зерна через вторую верхнюю гребенку блока предварительного распределения и частицы крупной, мелкой примеси поступают сходом на скатную доску третьей гребенки, где направление движения их меняется.

Полнота просеивания частиц основного зерна на верхней третьей гребенке блока предварительного распределения определяется:

$$\varepsilon_{3 \text{ пр}}^0 = [(p^0 - p^0 \cdot e^{-\mu_{0 \text{ пр}} x_{1 \text{ пр}}}) \cdot (1 - e^{-\mu_{0 \text{ пр}} x_{2 \text{ пр}}})] \cdot (1 - e^{-\mu_{0 \text{ пр}} x_{3 \text{ пр}}}), \quad (7)$$

где  $x_{3 \text{ пр}}$  - длина верхней третьей гребенке блока предварительного распределения.

Количество частиц мелкой примеси, поступившие на верхнюю левую гребенку левой колонки, составляет  $P_{\text{л.к.}}^{(M)}$ . В левой колонке гравитационного сепаратора установлены гребенки под определенным углом к горизонту, с отверстиями пропускающими частицы мелкой примеси и не пропускающие частицы основного зерна.

Полнота просеивания частиц мелкой примеси на верхней первой гребенке левой колонки определяется следующей формулой:

$$\varepsilon_{1 \text{ л.к.}}^{(M)} = P_{\text{л.к.}}^{(M)} \left( 1 - e^{-\mu_{\text{л.к.}}^M \cdot x_{1 \text{ л.к.}}} \right), \quad (8)$$

где  $\mu_{\text{л.к.}}$  - интенсивность просеивания частиц мелкой примеси через верхнюю левую гребенку левой колонки,  $\text{дм}^{-1}$ ;

$x_{1 \text{ л.к.}}$  - длина верхней первой гребенки левой колонки, дм.

Не прошедшие частицы мелкой примеси вместе с основным зерном через верхнюю первую гребенку левой колонки наступают сходом на скатную доску, где направление движения зернового потока меняется и дальше на верхнюю вторую гребенку левой колонки.

Полнота просеивания частиц мелкой примеси через  $n$ -ю гребенку левой колонки определяем:

$$\varepsilon_{n \text{ л.к.}}^{(M)} = \left\{ \left[ \left( P_{\text{л.к.}}^{(M)} - P_{\text{л.к.}}^{(M)} \cdot e^{-\mu_{\text{л.к.}}^M \cdot x_{1 \text{ л.к.}}} \right) \cdot \left( 1 - e^{-\mu_{\text{л.к.}} \cdot x_{2 \text{ л.к.}}} \right) \cdot \left( 1 - e^{-\mu_{\text{л.к.}}^M \cdot x_{3 \text{ л.к.}}} \right) \cdot \dots \cdot \left( 1 - e^{-\mu_{\text{л.к.}} \cdot x_{n \text{ л.к.}}} \right) \right], \quad (9)$$

где  $x_{n \text{ л.к.}}$  - длина  $n$ -ой гребенки левой колонки, дм.

Количество частиц основного зерна, поступившие на верхнюю первую гребенку левой колонки, составляет  $P_{\text{л.к.}}^{(0)}$ .

Полнота просеивания частиц основного зерна на  $n$ -ой гребенке левой колонки определяется следующей формулой:

$$\varepsilon_{n \text{ л.к.}}^{(0)} = \left\{ \left[ \left( P_{\text{л.к.}}^{(0)} - P_{\text{л.к.}}^{(0)} \cdot e^{-\mu_{\text{л.к.}}^{(0)} \cdot x_{1 \text{ л.к.}}} \right) \cdot \left( 1 - e^{-\mu_{\text{л.к.}}^{(0)} \cdot x_{2 \text{ л.к.}}} \right) \right] \cdot \left( 1 - e^{-\mu_{\text{л.к.}}^{(0)} \cdot x_{3 \text{ л.к.}}} \right) \cdot \dots \cdot \left( 1 - e^{-\mu_{\text{л.к.}}^{(0)} \cdot x_{n \text{ л.к.}}} \right) \right], \quad (10)$$

где  $x_{n \text{ л.к.}}$  - длина  $n$ -ой гребенки левой колонки, дм.

Количество частиц основного зерна поступившие на верхнюю гребенку правой колонки составляет  $P_{\text{п.к.}}^{(0)}$ . В правой колонке воздушно-гравитационного сепаратора установлены гребенки под определенным углом к горизонту, с отверстиями пропускающими частицы основного зерна и не пропускающие частицы крупной примеси.

Полнота просеивания частиц основного зерна на верхней гребенке правой колонки определяется следующей формулой:

$$\varepsilon_{1 \text{ п.к.}}^{(0)} = P_{\text{п.к.}}^{(0)} \left( 1 - e^{-\mu_{\text{п.к.}}^0 \cdot x_{1 \text{ п.к.}}} \right), \quad (11)$$

где  $\mu_{\text{п.к.}}^0$  - интенсивность просеивания частиц основного зерна через верхнюю гребенку правой колонки,  $\text{дм}^{-1}$ ;

$x_{1 \text{ п.к.}}$  - длина верхней первой гребенки правой колонки,  $\text{дм}^{-1}$ .

Не прошедшие частицы основного зерна с крупной примесью поступают сходом на скатную доску, где направление движения зернового потока меняется дальше на вторую гребенку.

Полнота просеивания частиц основного зерна через  $n$ -ю гребенку правой колонки определяем:

$$\varepsilon_{n \text{ п.к.}}^{(0)} = \left\{ \left[ \left( P_{\text{п.к.}}^{(0)} - P_{\text{п.к.}}^{(0)} \cdot e^{-\mu_{\text{п.к.}}^0 \cdot x_{1 \text{ п.к.}}} \right) \cdot \left( 1 - e^{-\mu_{\text{п.к.}}^0 \cdot x_{2 \text{ п.к.}}} \right) \right] \cdot \left( 1 - e^{-\mu_{\text{п.к.}}^0 \cdot x_{3 \text{ п.к.}}} \right) \cdot \dots \cdot \left( 1 - e^{-\mu_{\text{п.к.}}^0 \cdot x_{n \text{ п.к.}}} \right) \right\}, \quad (12)$$

где  $x_{n \text{ п.к.}}$  - длина n-ой гребенки правой колонки, дм.

Количество частиц крупной примеси поступившие на верхнюю первую гребенку правой колонки составляет  $P_{\text{п.к.}}^{(k)}$ . Иногда в крупной примеси находят такие частицы крупной примеси, которые имеют малые размеры и они проходят в отверстия гребенок правой колонки. Поэтому, полнота просеивания частиц крупной примеси через верхнюю первую гребенку правой колонки определяется следующей формулой:

$$\varepsilon_{1 \text{ п.к.}}^{(k)} = P_{\text{п.к.}}^{(k)} \cdot \left( 1 - e^{-\mu_{\text{п.к.}}^k \cdot x_{1 \text{ п.к.}}} \right), \quad (13)$$

где  $\mu_{\text{п.к.}}^k$  - интенсивность просеивания частиц крупной примеси через отверстия гребенки правой колонки, дм.

Полнота просеивания частиц крупной примеси на n-ой гребенке правой колонки определяется следующей формулой:

$$\varepsilon_{n \text{ п.к.}}^{(k)} = \left\{ \left[ \left( P_{\text{п.к.}}^{(k)} - P_{\text{п.к.}}^{(k)} \cdot e^{-\mu_{\text{п.к.}}^k \cdot x_{1 \text{ п.к.}}} \right) \cdot \left( 1 - e^{-\mu_{\text{п.к.}}^k \cdot x_{2 \text{ п.к.}}} \right) \right] \cdot \left( 1 - e^{-\mu_{\text{п.к.}}^k \cdot x_{3 \text{ п.к.}}} \right) \cdot \dots \cdot \left( 1 - e^{-\mu_{\text{п.к.}}^k \cdot x_{n \text{ п.к.}}} \right) \right\}, \quad (14)$$

где  $x_{n \text{ п.к.}}$  - длина n-ой гребенки правой колонки, дм.

Полноту просеивания частиц основного зерна через n-ые гребенки левой и правой колонок воздушно-гравитационного сепаратора определяем по следующей формуле:

$$\sum \varepsilon_n^{(0)} = \varepsilon_n^{(0)}_{\text{л.к.}} + \varepsilon_n^{(0)}_{\text{п.к.}} \quad (15)$$

Для проверки математической модели и обоснования основных параметров воздушно-гравитационного сепаратора использовали экспериментальную установку (рисунок 4). Были проведены эксперименты при следующих условиях:

- расстояние между прутками сепарирующих гребенок, установленных в блоке предварительного распределения составляло 3,3 мм, угле наклона гребенок  $36^\circ$ , количестве сепарирующих гребенок до 3 шт.;

- в левой и правой колонках расстояние между прутками составляли соответственно 2 и 4 мм, угле наклона гребенок  $36^\circ$  (выделение мелких примесей) и  $32^\circ$  (выделение крупных примесей), количестве сепарирующих гребенок до 10 шт.

При этом ширина рабочей части сепарирующих гребенок составляла 300 мм, длина – 155 мм, при удельной подаче зернового материала 10 т/ч·м.

Данные, полученные экспериментально, были сопоставлены с расчетными формулами и представлены на рисунке 3. Расчет полноты просеивания  $\varepsilon$  зерна пшеницы, мелкой, крупной примеси в воздушно-гравитационном сепараторе произведен исходя из интенсивности просеивания компонентов  $\mu$  через сепарирующие гребенки, у которых расстояние между прутками в блоке предварительного распределения, левой и правой колонках составляли соответственно 3,3; 2 и 4 мм при вышеуказанных параметрах.

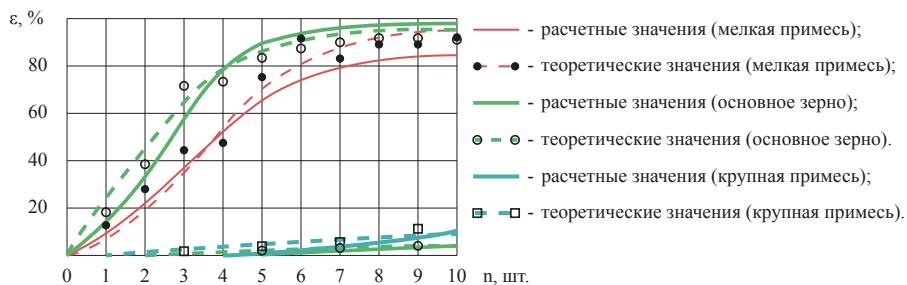


Рис. 3 — Полнота выделения компонентов зернового материала в зависимости от количества сепарирующих гребенок

Сопоставление теоретических и экспериментальных зависимостей изменения полноты просеивания компонентов от числа установленных сепарирующих гребенок в воздушно-гравитационном сепараторе свидетельствует об адекватности математической модели процесса.

Воздушно-гравитационный сепаратор (рисунок 4) содержит загрузочный бункер 1, приемное решето с вибрацией 21, заслонку 2, регулируемую подачу зернового материала, установленные зигзагообразно в вертикальном канале сепарирующие гребенки 3 в блоке предварительного распределения, ниже по бокам которого установлены сепарирующие гребенки 6 и 7, образующие соответственно левую и правую колонки. В начале сепарирующих гребенок 3, 6 и 7 установлены скатные доски 4. Под гребенками 3, 6 и 7 размещены дефлекторы 5.

В пневмоканале 9 размещены перегородки 20, в конце которого установлена осадочная камера 18, в нижней части которой размещено разгрузочное устройство 19. Над осадочной камерой 18 размещен сетчатый фильтр 14. В конце пневмоканала на выходе из осадочной камеры 18 установлен вентилятор 12, на выходе которого размещен матерчатый фильтр 13. Справа от вентилятора 12 установлен электродвигатель 15.

Сепаратор содержит патрубки вывода разделенных фракций: патрубки I для вывода проходовой (мелкой) фракции с сепарирующих гребенок 6, патрубков

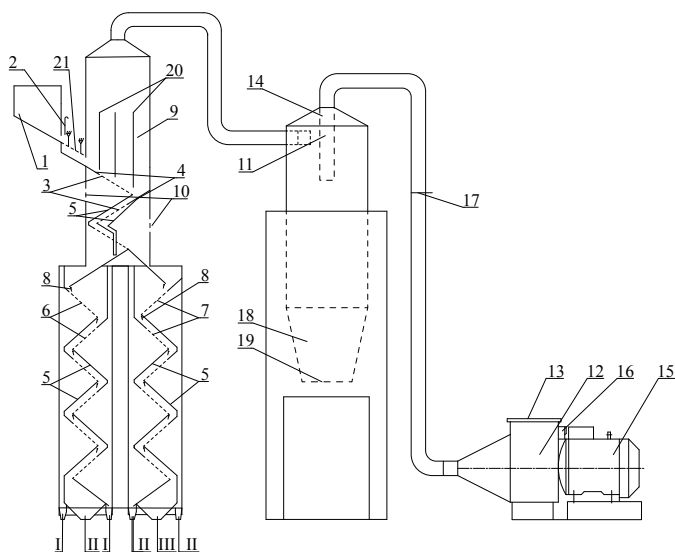


Рис. 4 — Схема воздушно-гравитационного сепаратора для очистки зерна II для вывода сходовой (средней) фракции (основного зерна) с гребенок 6, патрубков III для вывода проходовой (средней) фракции (основного зерна) с гребенок 7, патрубков IV для вывода сходовой (крупной) фракции с гребенок 7, разгрузочное устройство 19 для вывода легкой фракции с осадочной камеры 18.

**В третьей главе** изложены программа и методика исследований, описаны экспериментальные установки, использованные приборы и оборудование, общепринятые методики исследований и обработки экспериментальных данных.

Исследование основных параметров блока предварительного распределения на эффективность разделения зернового материала на два потока (основное зерно и мелкая примесь; основное зерно и крупная примесь) осуществляли на экспериментальной установке, схема которой представлена на рисунке 5.

Экспериментальная установка (рисунок 5) содержит корпус 1, загрузочный бункер 2, заслонка 3, регулирующая подачу зернового материала, сепарирующие гребенки 4, дефлекторы 5, станина 6, лоток для мелкой примеси 7, лоток для крупной примеси 8.

Изучение основных параметров воздушно-гравитационного сепаратора для очистки зерна на эффективность выделения легкой, мелкой и крупной примесей осуществляли на экспериментальной установке, технологическая схема и общий вид которой представлен на рисунке 4.

При исследованиях применялись методы теории математического планирования эксперимента, статистические и численные методы с использованием вычислительной техники.

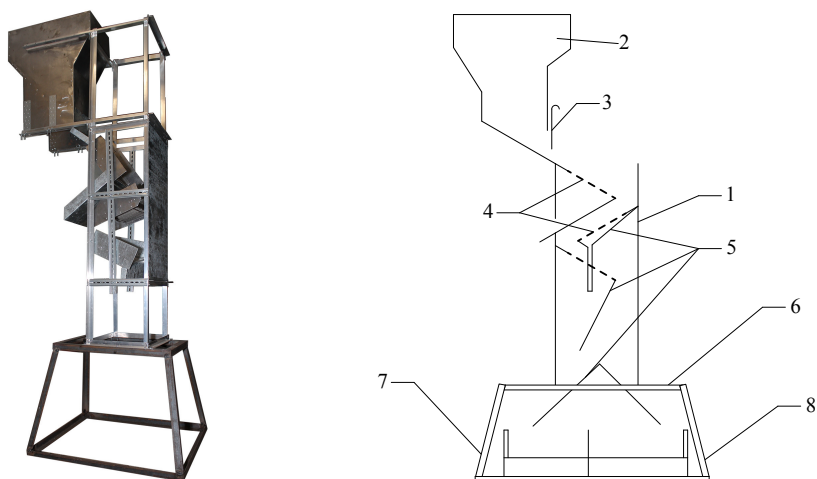


Рис. 5 — Общий вид и схема экспериментальной установки для обоснования основных параметров блока предварительного распределения

Обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью среды программирования R, программной оболочки RStudio.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментального обоснования основных параметров воздушно-гравитационного сепаратора для очистки зерна.

В ходе исследований процесса работы пневмоканала воздушно-гравитационного сепаратора реализован центрально-композиционный ротатбельный равномер-план (ЦКРУП) второго порядка. Получены адекватные регрессионные модели (F-критерий Фишера, вероятность  $p = 0,95$ ) анализировались методом построение трехмерных поверхностей отклика (рисунок 6, 7, 8):

$$y = 88,91 - 5,97x_1 + 3,77x_2 + 5,91x_3 + 3,6x_1x_3 - 5,94x_1^2 - 4,76x_2^2 - 5,22x_3^2. \quad (16)$$

В результате исследований эффективности очистки  $E$  от легкой примеси в пневмоканале воздушно-гравитационного сепаратора установлено, что при удельной подаче 11 т/ч·м, количестве перегородок 2 шт, скорости воздушного потока 5,4 м/с, эффективность очистки от легкой примеси составляет 85 %.

Для обоснования количества гребенок в блоке предварительного распределения были проведены экспериментальные исследования по изучению влияния количества гребенок на эффективность разделения примесей, при следующих параметрах:

- количество сепарирующих гребенок составляли 1, 2, 3 шт;

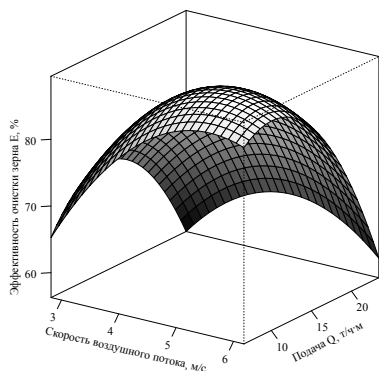


Рис. 6 — Эффективность выделения легкой примеси в зависимости от удельной подачи зернового материала и скорости воздушного потока

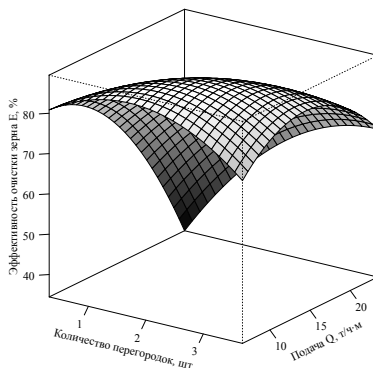


Рис. 7 — Эффективность выделения легкой примеси в зависимости от удельной подачи зернового материала и количества перегородок

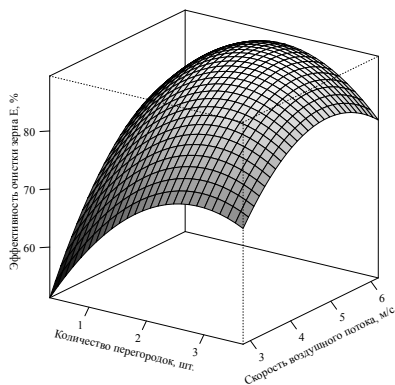


Рис. 8 — Эффективность выделения легкой примеси в зависимости от скорости воздушного потока и количества перегородок

- диаметр проволоки гребенок составлял 2 мм;
- длина гребенок 155 мм;
- ширина гребенок 300 мм.

Предварительными исследованиями было установлено, что наибольшая эффективность очистки мелких примесей от основного зерна в блоке предварительного распределения достигается при угле наклона гребенок к горизонту  $36^\circ$ .



При увеличении количества гребенок полнота просеивания основного зерна и мелких примесей повышается (таблица 1, 2).

Таблица 1 — Полнота просеивания мелкой примеси в блоке предварительного распределения

№ п/п	Полнота просеивания	Количество гребенок		
		1	2	3
Подача $Q = 12$ т/ч·м				
1	$\varepsilon, \%$	33,78	64,96	94,33
Подача $Q = 10$ т/ч·м				
2	$\varepsilon, \%$	35,56	68,89	100
Подача $Q = 8$ т/ч·м				
3	$\varepsilon, \%$	37,85	72,93	100

Таблица 2 — Полнота просеивания основного зерна (пшеницы) в блоке предварительного распределения

№ п/п	Полнота просеивания	Количество гребенок		
		1	2	3
Подача $Q = 12$ т/ч·м				
1	$\varepsilon, \%$	16,66	32,92	49,2
Подача $Q = 10$ т/ч·м				
2	$\varepsilon, \%$	16,88	34,88	52,28
Подача $Q = 8$ т/ч·м				
3	$\varepsilon, \%$	18,66	36,68	52,28

В результате экспериментальных исследований установлено, что установка гребенок с зазором 3,3 мм при количестве гребенок 3 шт., угле наклона гребенок к горизонту  $36^\circ$ , длине гребенок 155 мм позволяет распределить исходный зерновой материал на две фракции:

- 1 фракция — около 50 % основного зерна (пшеница) и мелкая примесь;
- 2 фракция — около 50 % основного зерна (пшеница) и крупная примесь.

Для выделения мелких примесей гравитационной частью воздушно-гравитационного сепаратора реализован центрально-композиционный ротатальный равномерный план (ЦКРУП) второго порядка: зазор между пальцами гребенок для блока предварительного распределения составлял 3,3 мм, левой колонки – 2 мм; правой колонки – 4 мм. Получены адекватные регрессионные модели (F-критерий Фишера, вероятность  $p = 0,95$ ) анализировались методом построение трехмерных поверхностей отклика (рисунок 9,10,11,12):

$$y = 43,14 - 3,79x_1 + 4,79x_2 - 4,58x_3 - 6,58x_1^2 - 1,28x_2^2 - 1,4x_3^2. \quad (17)$$

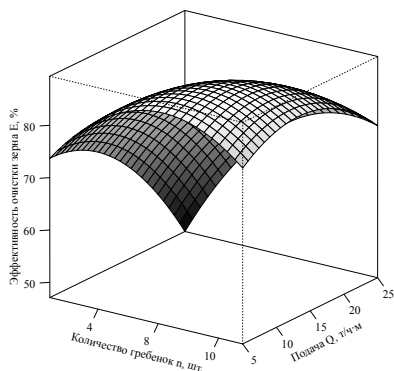


Рис. 9 — Эффективность выделения мелкой примеси в зависимости от удельной подачи зернового материала и количества гребенок

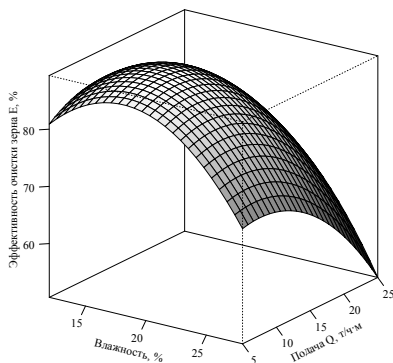


Рис. 10 — Эффективность выделения мелкой примеси в зависимости от удельной подачи зернового материала и влажности зернового материала

В результате исследований эффективности очистки  $E$  от мелкой примеси в гравитационной части воздушно-гравитационного сепаратора при ширине и длине гребенок соответственно  $B = 300$  мм и  $L = 155$  мм, при этом угол наклона сепарирующих гребенок относительно горизонтальной плоскости составлял: для блока предварительного распределения -  $36^\circ$ , для левой колонки (мелкая примесь) -  $36^\circ$ , для правой колонки (крупная примесь) -  $32^\circ$  установлено, что при удельной подаче 11 т/ч-м, количестве гребенок — 6 шт., влажности зернового материала — 18 %, засоренности зернового материала — 5 %, эффективность очистки от мелкой примеси составляет 85 %.

Для оценки возможности использования воздушно-гравитационного сепаратора на очистке основных зерновых культур (ржи и ячменя) от мелких и крупных примесей были проведены эксперименты при удельной подаче 11 т/ч-м. Установлено, что эффективность очистки ржи и ячменя от крупных примесей составляет 96 % и 93 % соответственно, а эффективность очистки ржи и ячменя от мелких примесей составляет более 79 % и 80 %.

Таким образом, возможно использовать воздушно-гравитационный сепаратор для очистки зерна основных культур (пшеницы, ржи и ячменя) от мелких и крупных примесей без замены гребенок.

Анализ исследований показал, что воздушно-гравитационный сепаратор позволяет увеличить эффективность очистки зерна от мелких и крупных примесей на 6 – 13 % за счет деления зернового материала на две фракции в блоке предварительного распределения и снижения удельной нагрузки на гребенки.

Для оценки возможности использования воздушно-гравитационного сепаратора для очистки зерна был изготовлен его макетный образец и испытан на

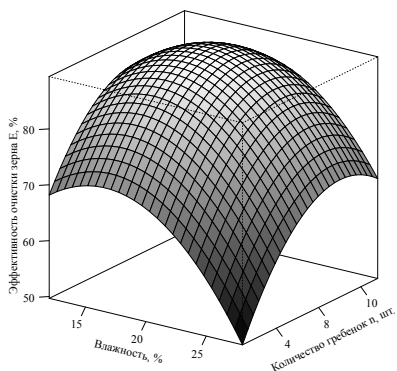


Рис. 11 — Эффективность выделения мелкой примеси в зависимости от количества гребенок и влажности зернового материала

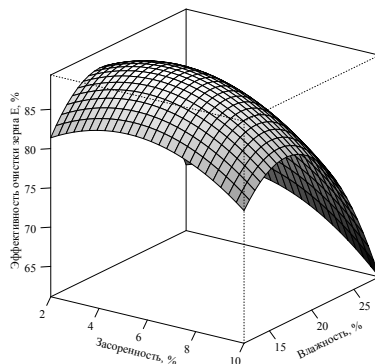


Рис. 12 — Эффективность выделения мелкой примеси в зависимости от влажности зернового материала и засоренности

зернопункте в СПК «Михайловка» Закаменского района и ООО «Племзавод Боргойский» Джидинского района Республики Бурятия.

Анализ испытаний макетного образца воздушно-гравитационного сепаратора для очистки зерна в хозяйственных условиях показывает, что при подаче до 12 т/ч-м обеспечивается выход фракции очищенного зерна пшеницы более 97%, чистота очищенного зерна составляет более 92%, при этом потери зерна в отходы составляет 0,99 – 1,4%, забиваемость гребенок не наблюдалась.

Испытания свидетельствуют о работоспособности воздушно-гравитационного сепаратора для очистки зерна в хозяйственных условиях.

**В пятой главе** представлена экономическая эффективность внедрения воздушно-гравитационного сепаратора для очистки зерна.

Годовой экономический эффект составляет 27 тыс. руб. на одну машину.

## Основные выводы

Проведенные аналитические, экспериментальные и хозяйственные исследования позволили сделать следующие основные выводы:

1. Разработанная математическая модель (1, 3, 9, 10, 12, 14) адекватно описывает процесс просеивания компонентов зернового материала в воздушно-гравитационном сепараторе для очистки зерна, состоящий из приемного решета, пневмоканала, блока предварительного распределения и двух колонок, в которых установлены каскады гребенок;
2. Воздушно-гравитационный сепаратор позволяет увеличить эффективность очистки зерна от мелких и крупных примесей на 6 – 13% за счет

- деления зернового материала на две фракции в блоке предварительного распределения и снижения удельной нагрузки на гребенки;
3. Обоснованы основные параметры воздушно-гравитационного сепаратора для очистки зерна производительностью 10 т/ч·м, в котором имеется приемное решето, пневмоканал, блок предварительного распределения зернового материала и две колонки, внутри которых установлены каскады гребенок. Количество перегородок в пневмоканале 2 шт; высота перегородок 250 мм; скорость воздушного потока — 5,4 м/с. Количество сепарирующих гребенок в блоке предварительного распределения 3 шт., имеющих зазор между прутками 3,3 мм; угол наклона сепарирующих гребенок к горизонту в блоке предварительного распределения  $36^\circ$ ; количество гребенок в правой колонке 6 шт. для выделения крупных примесей, имеющих зазор между прутками 4 мм; количество гребенок в левой колонке 6 шт., для выделения мелких примесей, имеющих зазор между прутками 2 мм; длина сепарирующих гребенок 155 мм; угол наклона сепарирующих гребенок к горизонту для выделения мелких примесей  $36^\circ$ ; угол наклона сепарирующих гребенок к горизонту для выделения крупных примесей  $32^\circ$ .
  4. Для очистки зерна основных культур (пшеницы, ржи и ячменя) от мелких и крупных примесей могут использоваться одни и те же сепарирующие гребенки в блоке предварительного распределения и двух колонках;
  5. Ожидаемый годовой экономический эффект от применения воздушно-гравитационного сепаратора для очистки зерна составил более 27 тыс. руб. на одну машину.

### **Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Жигжитов, А.О. Ресурсо-энергосберегающие сепараторы для очистки зерна / А.О. Жигжитов, С.С. Ямпиллов, И.А. Цыренов // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2012. – 1(36). – С.41 – 45.
2. Жигжитов, А.О. Методика расчета технологий сепарирования зерновых материалов по комплексу признаков / С.С. Ямпиллов, Г.Ж. Дондокова, А.О. Жигжитов, А.А. Абидуев // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2014. – 1(46). – С. 55 – 63.

### **Статьи в других изданиях:**

3. Жигжитов, А.О. Анализ сепараторов для очистки зерна / А.О. Жигжитов, С.С. Ямпиллов // Инженерное обеспечение и технический сервис в АПК: Мат.

Межд. научно-практической конф., посвященной 80-летию БГСХА и 50 -летию инженерного факультета. –Улан-Удэ, 2011. –С.61–64.

4. Жигжитов, А.О. Обоснование основных параметров гравитационно-воздушного сепаратора / А.О. Жигжитов, С.С. Ямпиллов // Сборник научных трудов. Серия: Технология и средства механизации в АПК. – 2013. – №9. – С. 120 – 123.

5. Жигжитов, А.О. Разработка и создание гравитационно-воздушного сепаратора / А.О. Жигжитов, С.С. Ямпиллов // Сборник научных трудов. Серия: Технология и средства механизации в АПК. – 2014. – № 10. – С.201 – 205.

6. Жигжитов, А.О. Описание процесса движения частиц пшеницы по сепарирующей гребенке // Сборник научных трудов. Серия: Технологии и средства механизации в АПК. – 2013. – № 9. – С. 120 – 123.

7. Жигжитов, А.О. Теоретическое описание процесса движения зернового материала по сепарирующей гребенке / А.О. Жигжитов, С.С. Ямпиллов // Сборник научных трудов. Серия: Технологии и средства механизации в АПК. – 2012. – № 8. – С. 154 – 164.

8. Жигжитов, А.О. Ресурсо-энергосберегающие сепараторы для очистки зерна / А.О. Жигжитов, С.С. Ямпиллов, И.А. Цыренов // Сборник научных трудов. Серия: Технологии и средства механизации в АПК. – 2011. – № 7. – С. 138 – 147.

9. Жигжитов, А.О. / А.О. Жигжитов, С.С. Ямпиллов, И.А. Цыренов // Сборник научных трудов. Серия: Технологии и средства механизации в АПК. – 2011. – № 7. – С. 138 – 147.

10. Жигжитов, А.О. Ресурсо-энергосберегающие сепараторы для очистки зерна / А.О. Жигжитов, С.С. Ямпиллов, И.А. Цыренов // Сборник научных трудов. Серия: Технологии и средства механизации в АПК. – 2011. – № 7. – С. 138 – 147.

11. Патент РФ № 2011116864/03 27.04.2011 Ямпиллов, С. С., Жигжитов, А. О., Цыбенков, Ж. Б., Цыдыпов, Ц. Ц., Цыренов, И. А. Сепаратор сыпучих материалов // Патент России № 2471572, 2013 Бюл. № 1.

Подписано в печать 26.12.2016    Формат 60×84 1/16.  
Усл.п.л. 1.                                  Тираж 100 экз. Заказ № 86.

---

Издательство ВСГУТУ, 670013. г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40,в  
© ВСГУТУ, 2017 г.