

На правах рукописи



**ФЕДОРЕНКО АНТОН СЕРГЕЕВИЧ**

**ПАРАМЕТРЫ СЕПАРАТОРА ДЛЯ ОЧИСТКИ  
ФУРАЖНОГО ЗЕРНА ОТ КРУПНЫХ ПРИМЕСЕЙ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации  
сельского хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Барнаул 2014

Работа выполнена на кафедре «Механизация животноводства» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный аграрный университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
**Федоренко Иван Ярославович**  
(ФГБОУ ВПО Алтайский государственный аграрный университет, заведующий кафедрой «Механизация животноводства»)

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор  
**Сабиев Уахит Калижанович**  
(ФГБОУ ВПО Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, профессор кафедры «Агроинженерия»)

кандидат технических наук, доцент  
**Сороченко Сергей Федорович**  
(ФГБОУ ВПО Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»)

Ведущая организация – Государственное научное учреждение «Сибирский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства» (ГНУ СибИМЭ СО Россельхозакадемии)

Защита диссертации состоится «16» декабря 2014 года в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 при ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46. <http://www.altstu.ru>, e-mail: [ntsc@desert.secna.ru](mailto:ntsc@desert.secna.ru); [elnis@inbox.ru](mailto:elnis@inbox.ru); тел/факс 8(3852) 36-71-29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АлтГТУ им. И.И. Ползунова и на сайте <http://www.altstu.ru/media/f/Fedorenko-AS-DISSERTACIYA.pdf>

Автореферат разослан «15» октября 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор



Куликова Лилия Васильевна

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы.** В настоящее время все больше используются комбинированные добавки для кормления крупного рогатого скота, рыб, птиц и многих других животных. Комбикорма готовят для сельскохозяйственных животных всех видов с учетом их пола, возраста, продуктивности и физиологического состояния.

Для получения качественного состава комбикормов нормами технологического проектирования предусмотрена очистка зерновых компонентов.

На сегодняшний день предложено много конструкций сепараторов, но они имеют существенные недостатки. К основным недостаткам известных сепараторов относятся: высокая металлоемкость, большие энергозатраты на движение рабочего органа (решета), затруднена очистка рабочей поверхности.

Поэтому встаёт вопрос об устранении выше перечисленных недостатков, создании сепаратора, простого и надёжного в работе, а также достижение требуемого качества очистки зернового материала.

**Цель исследования** – повышение эффективности работы сепаратора для очистки фуражного зерна путем совершенствования его конструкции.

**Объект исследования** – технологический процесс работы сепаратора.

**Предмет исследования** – зависимости, факторы и взаимосвязи, характеризующие работу сепаратора.

**Методы исследований** – основные законы механических колебаний, дифференциальное и интегральное исчисление, вычислительный эксперимент, методы математической статистики и планирования эксперимента.

**Научная гипотеза** – заключается в том, что удовлетворительной очистки фуражного зерна можно добиться при помощи вибрационного сепаратора с неподвижным решетом.

**Научная новизна.** 1) Получены расчётная модель и теоретические зависимости, определяющие параметры процесса сепарирования.

2) Получены экспериментальные зависимости оценочных показателей установки для сепарирования фуражного зерна от ее конструктивных параметров в виде математической модели процесса сепарирования.

Техническая новизна подтверждена патентами РФ на изобретения: № 2400051 «Устройство для очистки фуражного зерна», № 2446022 «Просеиватель фуражного зерна», № 2459674 «Устройство для очистки фуражного зерна».

**Практическая ценность:**

- разработано устройство для сепарирования фуражного зерна, позволяющее очищать зерновой материал в комбикормовом производстве.

- обоснованы параметры вибрационного сепаратора, которые могут быть использованы конструкторскими организациями при проектировании устройств для очистки фуражного зерна.

### ***На защиту выносятся:***

- теоретические зависимости вибрационных процессов, осуществляемых при сепарировании фуражного зерна;
- результаты экспериментальных исследований по обоснованию конструктивно-кинематических параметров установки для очистки фуражного зерна.

### ***Реализация результатов исследований:***

- результаты проведенных исследований используются в учебном процессе Алтайского государственного аграрного университета при проведении практических и лабораторных работ по курсам «Технология и механизация животноводства», «Сельскохозяйственные машины»;
- разработаны исходные требования к проектированию вибрационного очистителя фуражного зерна.

***Апробация.*** Основные положения диссертационной работы доложены и одобрены на следующих конференциях:

- научно-техническая конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава АГАУ (Барнаул, АГАУ, 2009 г);
- конференция II этапа Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений Министерства сельского хозяйства РФ Сибирского федерального округа (Красноярск, 22 марта 2012 года);
- конференция АГАУ «Молодые ученые – инженерному развитию АПК Алтая» (Барнаул 20 марта 2013 года).

***Публикации.*** Основные положения диссертационной работы опубликованы в 6 печатных работах, в том числе в 4 статьях в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК, а также получено 3 патента на изобретения.

***Структура и объем работы.*** Диссертация включает введение, пять глав, общие выводы. Работа изложена на 153 страницах машинописного текста, содержит 54 рисунка, 24 таблицы и 9 приложений. Список использованной литературы включает 139 наименований, в том числе 10 на иностранных языках.

### ***Содержание работы***

***Во введении*** обоснована актуальность темы, ее цель, показаны объект и предмет исследований, раскрыты научная гипотеза, новизна и практическая ценность результатов работы.

***В первой главе*** «Состояние вопроса, цель и задачи исследования» изложены общие сведения о кормовой ценности комбикормов и кормовых добавок, описаны известные комбикормовые агрегаты и оборудование для вибросепарирования фуражного зерна, а также существующие модели процесса сепарирования.

Исследованиям процесса сепарирования зерна посвящены работы В.П. Горячкина, В.В. Гортинского, П.М. Заики, П.М. Василенко, П.Н. Лапшина, П.И. Леонтьева, Г.Е. Листопада, М.А. Талейсника, Г.Д. Терскова, У.К. Сабиева,

В.М. Дринчи, В.А. Кубышева, Е.А. Непомнящего, Л.Н. Тищенко, Н.И. Стрикунова, В.А. Патрина, Н.М. Иванова, Г.Е. Чепурина, С.Ф. Сороченко, В.А. Дрюка, В.Л. Злочевского, В.П. Тарасова, А.В. Фоминых и др.

При анализе существующих способов сепарирования, конструкций устройств для их осуществления и теоретических исследований установлено:

- комбикорма и кормовые добавки должны соответствовать ГОСТу или техническим условиям, в связи с этим встает вопрос о качественной очистке компонентов, поступающих на производство комбикорма;
- очистка исходного фуражного зерна присутствует в технологическом процессе всех без исключения малогабаритных комбикормовых агрегатов;
- известные в настоящее время сепараторы не отвечают предъявляемым к ним требованиям, поэтому встает вопрос о необходимости совершенствования конструкции в направлении снижения энергоемкости, металлоемкости, увеличения качества очистки и уменьшения потерь зерна в отходы;
- нужен поиск новых конструкций сепараторов, обеспечивающих качественную очистку зернового материала и имеющих малую энерго- и металлоемкость.

Для достижения цели работы сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Получить математические модели движения слоя и отдельных частиц по рабочим поверхностям сепаратора;
2. Разработать конструкцию сепаратора и обосновать его конструктивно-кинематические параметры;
3. Получить экспериментально-математическую модель качества сепарирования в зависимости от конструктивно-кинематических параметров сепаратора. Выявить рациональные параметры разрабатываемого сепаратора;
4. Оценить экономическую эффективность использования разрабатываемого сепаратора при производстве комбикорма.

**Во второй главе** «Математическое описание процесса просеивания зернового материала в сепараторе с вибрируемыми планками» рассмотрены и проанализированы закономерности процесса вибросепарирования зернового материала на рабочих поверхностях сепаратора, обоснованы параметры сепаратора для очистки фуражного зерна, при которых обеспечивается максимальная производительность сепаратора.

Существующие модели поведения зернистого материала под действием вибрации можно разделить на две группы. Модели одиночной частицы представляют зернистый материал как дискретную среду, в которой каждая частица движется сама по себе, не взаимодействуя с другими частицами, либо это взаимодействие очень слабо. Модели сплошной среды рассматривают зернистый материал как некую единую целую и непрерывную среду, движущуюся особым образом под действием колебаний.

Для нашего случая, при малой толщине слоя ( $h \leq 20d$ , где  $d$  – диаметр частицы), возможно его моделирование моделью одиночной частицы.

Из рис. 1 видно, что планки 2 с поперечной перекладиной 5 совершают

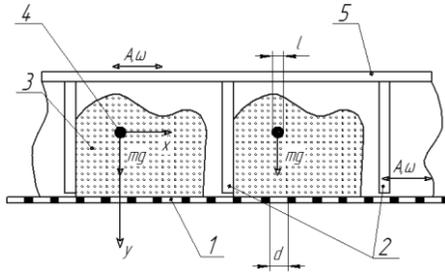


Рисунок 1 – Движение частицы в слое зернового материала между планками рабочего органа

возвратно поступательные движения ( $A, \omega$ ) таким образом, что приводят в движение зерновой слой 3. Последний, совершая возвратно-поступательные движения, увлекает за собой частицу 4 на которую действует сила тяжести  $G=mg$ . Под действием силы тяжести  $G$  и поперечных вибраций, частица 4 начинает движение вниз в направлении решета 1 и проходит через отверстие с диаметром  $d$ .

Векторное уравнение, характеризующее сепарацию растительных частиц (рис. 1), имеет вид (по И.И. Блехману):

$$m_1 \ddot{\vec{W}} = m_0 (\Delta - 1) (\vec{g} - \dot{\vec{U}}) + \vec{F}(\vec{W}), \quad (1)$$

где  $\dot{\vec{W}}$  – вектор скорости частицы относительно среды;  $\dot{\vec{U}}$  – вектор абсолютной скорости среды в точке, совпадающей с центром тяжести частицы (скорость переносного движения);  $m_1$  – эффективная масса частицы;  $m_0$  – масса среды в объеме, равном объему частицы;  $\Delta$  – отношение средних плотностей частицы и среды;  $F$  – сила трения частицы о среду.

Проецируя данное уравнение на оси  $x$  и  $y$ , получим два скалярных уравнения:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x} + F \dot{x} / \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = m_0 (\Delta - 1) a \omega^2 \sin(\omega t + \delta) \\ m_1 \ddot{y} + F \dot{y} / \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = m_0 (\Delta - 1) g \end{cases} \quad (2)$$

Введем обозначения:

$$P = \frac{m_1}{m_0 (\Delta - 1) A \omega^2}; z = \frac{F}{m_0 (\Delta - 1) A \omega^2}; q = \frac{m_1}{F}; \varepsilon = \frac{m_0 (\Delta - 1) g}{F} \dots \quad (3)$$

Тогда система уравнений (2) примет вид

$$\begin{cases} P \ddot{x} + z \dot{x} / \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = \sin(\omega t + \delta); \\ q \ddot{y} + \dot{y} / \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = \varepsilon; \end{cases} \quad (4)$$

$$\quad (5)$$

$$\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \neq 0. \quad (6)$$

Для решения нелинейных дифференциальных уравнений (4) и (5) мы использовали метод линеаризации на основе принципа энергетического баланса, предложенный Боголюбовым Н.Н. и Митропольским Ю.А.

Речь идет о преобразовании:

$$z \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \rightarrow \beta \dot{X}; \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \rightarrow \gamma \dot{Y}, \quad (7)$$

где  $\beta, \gamma$  – коэффициенты линеаризации;  $\dot{X}, \dot{Y}$  – новые (усредненные) переменные.

В различных технологических расчетах чаще всего необходимо знание величин:  $a$  – амплитуды проскальзываний частицы относительно окружающего материала;  $V$  – средняя скорость опускания частицы в слое. Формулы для этих величин были получены на основе решения дифференциальных уравнений (4) и (5):

$$a = A \sqrt{1 - \left\{ \frac{4z}{\pi k} \left[ E(k) - (1 - k^2) K(k) \right] \right\}^2}; \quad (8)$$

$$V = a \omega Sh, \quad (9)$$

где  $K(k), E(k)$  – полные эллиптические интегралы с модулем  $k$ ;  $A, \omega$  – амплитуда и частота колебаний планок;  $Sh = V/a\omega$  – число Струхала.

Модуль  $k$  определяется выражением:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + Sh^2}}. \quad (10)$$

Формулу (9) можно записать в виде:

$$V = 1,438A\omega \varepsilon^2 \sqrt{1 - \left\{ \frac{4z}{\pi k} \left[ E(k) - (1 - k^2) K(k) \right] \right\}^2}. \quad (11)$$

Скорость движения (диффундирования) частиц к решетке будет определяться из формулы (11), и с учетом обозначений (3), примет вид:

$$V_{\text{диффун}} = 1,438A\omega \left( \frac{m_0(\Delta - 1)g}{F} \right)^2 \sqrt{1 - \left\{ \frac{4}{\pi k} \frac{F}{m_0(\Delta - 1)A\omega^2} \left[ E(k) - (1 - k^2) K(k) \right] \right\}^2}. \quad (12)$$

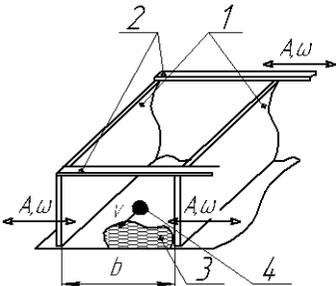


Рисунок 2 – Движение материальной точки по неподвижному решетку

Рассмотрим далее движение материальной частицы по неподвижному решетку разрабатываемого сепаратора (рис. 2).

Материальная точка 4 совершает колебательные движения по решетке 3 с определенной скоростью сползания, поскольку решетка наклонена к горизонту. Материальную точку 4 приводит в движение колебания соседних частиц, а в конечном счете рабочий орган (набор вибрирующих пластин 1, которые соединены с перекладками 2). Эта модель движения материальной точки напоминает нам движение частицы по вибрирующему решетку сепаратора.

Планки относительно решета совершают колебания по закону:

$$\eta = A \sin(\omega t + \delta), \quad (13)$$

где  $A, \omega$  - амплитуда и угловая частота колебаний;  $\delta$  – угол сдвига фаз между движением планок и частицы.

Дифференциальные уравнения движения частицы относительно решета записываются в виде:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + mfg \cos \alpha \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} = mA\omega^2 \sin(\omega t + \delta); & (14) \\ m\ddot{y} + mfg \cos \alpha \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} = mg \sin \alpha; & (15) \end{cases}$$

$$\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \neq 0, \quad (16)$$

где  $f$  – коэффициент трения между частицей и плоскостью;  $\alpha$  – угол наклона плоскости к горизонту;  $g$  – ускорение свободного падения.

Введем обозначения:

$$\frac{1}{A\omega^2} = p; \quad \frac{1}{fg \cos \alpha} = q; \quad \frac{fg \cos \alpha}{A\omega^2} = z; \quad \frac{g \sin \alpha}{fg \cos \alpha} = \frac{tg \alpha}{f} = \varepsilon. \quad (17)$$

С учетом введенных обозначений, уравнения (14) и (15) примут вид системы дифференциальных уравнений (4, 5) рассмотренной выше, а значит формулы для определения скорости (9) и амплитуды колебаний (8) можно применить и в данном случае.

Для численного решения системы дифференциальных уравнений (4, 5) применили программу MathCAD с функцией Odesolve, которая использует алгоритм Adams/BDF.

Решение представлено в виде графиков (рис. 3, 4).

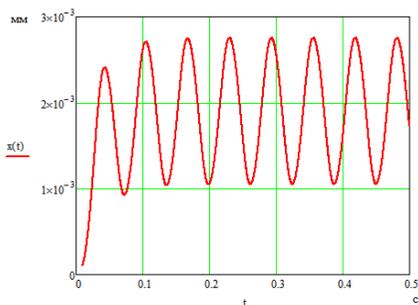


Рисунок 3 – Виброперемещение частицы под действием вибрации относительно оси X

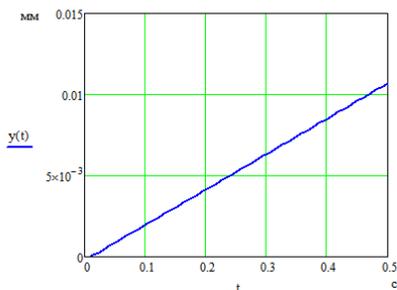


Рисунок 4 – Виброперемещение частицы под действием вибрации относительно оси Y

Из их анализа следует, что частица имеет разгонный участок от 0 до 0,15 с, и далее виброперемещение по оси x приобретает вид колебаний, близкий к гармоническим.

Анализ рис. 4 показывает, что виброперемещение частицы по оси  $y$  изменяется по линейной зависимости. Это объясняется тем, что скорость частицы по этой оси в среднем постоянна, соответственно и виброперемещение будет линейно возрастать со временем.

Достоверность полученной формулы 9 определена с помощью сравнения ее и численного решения дифференциальных уравнений.

Построим графики зависимости скорости виброперемещения от параметра  $z$ , и погрешность предлагаемой формулы (рис. 5).

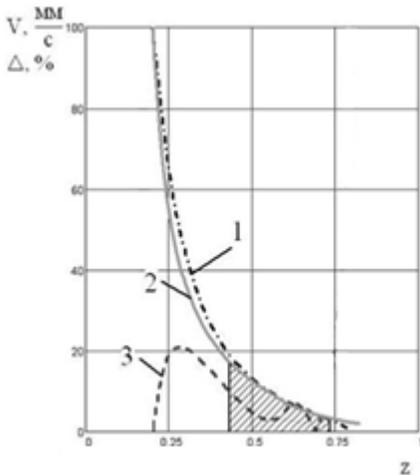


Рисунок 5 – График зависимости скорости виброперемещения от параметра  $z$ ; 1 – значение скорости, полученное аналитическим методом; 2 – значение скорости, полученное численным методом; 3 – погрешность предлагаемой формулы.

Заштрихованная зона – это диапазон режима работы сепаратора. Погрешность предлагаемой формулы достигает 7% что, однако, удовлетворяет требованиям инженерных расчетов.

Анализ полученных формул показывает, что основное влияние на процессы диффузирования и движения частиц по решетке имеют параметры:  $z$  и  $\varepsilon$ . Закономерности их влияния определили при помощи вычислительного эксперимента. Для этого систему дифференциальных уравнений (14, 15) подвергнем изменениям, разделив каждый член уравнений на произведение  $mA\omega^2$ .

Далее введем безразмерные величины:

$$\begin{aligned} u &= \frac{\dot{x}}{A\omega}; \quad v = \frac{\dot{y}}{A\omega}; \quad \dot{u} = \frac{\ddot{x}}{A\omega^2}; \\ \dot{v} &= \frac{\ddot{y}}{A\omega^2}; \quad \tau = \omega t; \quad X = \frac{x}{A}; \quad Y = \frac{y}{A} \\ z &= \frac{fg \cos \alpha}{A\omega^2}; \quad \varepsilon = \frac{g \sin \alpha}{fg \cos \alpha} = \frac{tg \alpha}{f}. \end{aligned} \quad (18)$$

В конечном итоге безразмерная система дифференциальных уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \dot{u} + z \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} = \sin(\tau); & (19) \\ \dot{v} + z \left( \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} - \varepsilon \right) = 0; & (20) \end{cases}$$

$$\sqrt{u^2 + v^2} \neq 0. \quad (21)$$

В качестве примера численного решения приведем графики зависимостей безразмерных скоростей частицы по осям  $x$  и  $y$ , от параметра безразмерного времени, которые представлены на рис. 6 и 8.

Как видно из рис. 6, среднее значение безразмерной скорости частицы по оси  $x$  равно 0. Введем далее понятие «эффективное значение скорости» по оси  $x$ , по аналогии с электротехнической, где присутствует понятие «эффективное значение переменного тока».

Эффективное (действующее) значение  $U_{эф}$  скорости по оси  $x$  – это величина средней скорости по этой оси, действие которой произведет такую же работу, что и рассматриваемая скорость по оси  $x$  за время одного периода.

График зависимости эффективного значения безразмерной скорости по оси  $x$  от параметра безразмерного времени представлен на рис. 7. Анализ показывает, что частица имеет разгонный участок, и после чего эффективное значение безразмерной скорости приобретает вид стационарных пульсирующих колебаний.

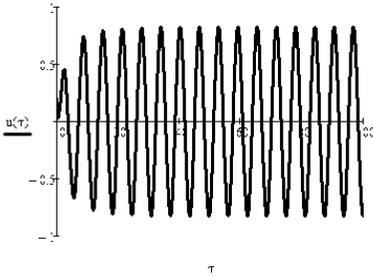


Рисунок 6 – Безразмерная скорость частицы по оси  $x$

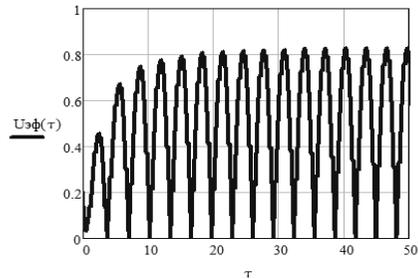


Рисунок 7 – Эффективное (действующее) значение скорости по оси  $x$

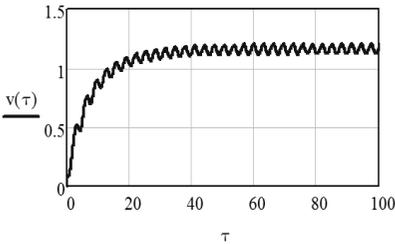


Рисунок 8 – Безразмерная скорость частицы по оси  $y$

На рис. 8 представлен график зависимости безразмерной скорости ( $v$ ) от безразмерного времени ( $\tau$ ). Анализ рис. 8 показывает, что в начале движения частица под действием вибрации разгоняется, и далее совершает постоянные гармонические колебания, причем средняя скорость (скорость сноса вдоль оси  $y$ ) постоянна, и не равна нулю.

Для определения наиболее значимых факторов, влияющих на производительность сепаратора и просеивание частиц через решетку, проведем вычислительный эксперимент с двумя переменными (факторами)  $z$  и  $\varepsilon$ . Применим метод планирования эксперимента. Интервалы варьирования факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Кодирование факторов в эксперименте

Факторы и их обозначения		Интервалы и уровни варьирования		
		-1	0	1
$z$	$x_1$	0,1	0,5	0,9
$\varepsilon$	$x_2$	0,1	0,5	0,9

Используем ортогональный центральный композиционный план для двух факторов (ОЦКП), для которого плечо  $\alpha=1$ .

В ходе исследований был проведен полный факторный эксперимент. В качестве выходных величин (параметров отклика) рассматривались: 1) средняя безразмерная скорость частицы по оси  $y$ , 2) среднее эффективное (действующее) значение скорости по оси  $x$ . Определение выходных величин проводили путем численного решения безразмерной системы дифференциальных уравнений (19, 20).

Таблица 2 – План и результаты эксперимента для двух факторов

№ опыта	$x_1$	$x_2$	$\bar{v}$	$\bar{u}$
1	+1	+1	1,161	0,582
2	-1	+1	1,399	0,702
3	+1	-1	0,007	0,025
4	-1	-1	0,053	0,695
5	+1	0	0,099	0,15
6	-1	0	0,279	0,617
7	0	+1	1,332	0,668
8	0	-1	0,052	0,423
9	0	0	0,211	0,427

По результатам эксперимента при помощи компьютерной программы STATISTICA, получены уравнения регрессии, в которых отражены значимые факторы и их сочетания. Уравнения регрессии по критериям оптимальности: 1) средняя безразмерная скорость частицы по оси  $y$ , которая влияет на производительность сепаратора 2) среднее эффективное (действующее) значение скорости по оси  $x$ , которое влияет на просеивание зерна через решето, при кодированном значении факторов имеют вид:

$$Y_1=0,2161-0,07826x_1+0,63229x_2-0,04763x_1x_2-0,02938x_1^2+0,46870x_2^2 \quad (22)$$

$$Y_2=0,41764-0,21297x_1+0,13201x_2-0,13330x_1x_2-0,04739x_1^2+0,13262x_2^2 \quad (23)$$

где  $Y_1$ ,  $Y_2$  – выходные параметры средняя безразмерная скорость частицы по оси  $y$  и среднее эффективное (действующее) значение скорости по оси  $x$ ;

$x_1$  – кодированное обозначение параметра интенсивности вибрации  $z$ ;

$x_2$  – кодированное обозначение параметра наклона решета к горизонту  $\varepsilon$ .

По уравнениям (22, 23) были построены поверхности отклика для факторов  $x_1$  и  $x_2$  (рис. 9, 10).

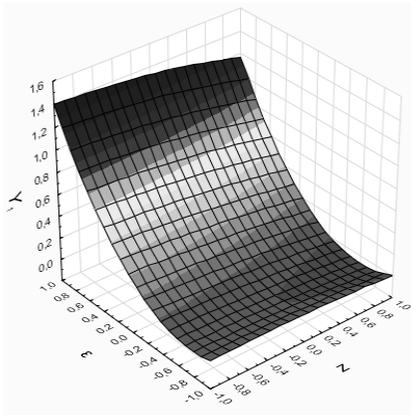


Рисунок 9 – Поверхность отклика средней безразмерной скорости частицы от факторов z и ε

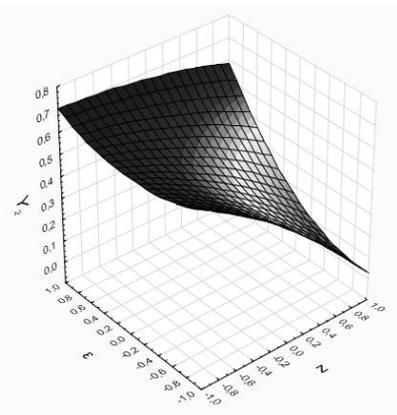


Рисунок 10 – Поверхность отклика среднего эффективного значения скорости по оси x от факторов z и ε

Анализ поверхностей (9, 10) показывает, что целесообразно использовать сочетание факторов: максимального значения параметра ε и минимального значения фактора z.

Для определения рациональных значений факторов, которые бы удовлетворяли двум критериям оптимальности, необходимо решить многокритериальную задачу.

Для ее решения используем метод свертки критериев на основе весовых коэффициентов. Его сущность заключается в том, что целевая функция образуется путем сложения нормированных значений частных критериев, входящих в целевую функцию J с некоторым весом α, определяющим важность каждого критерия.

Тогда уравнение целевой функции, для нашего случая, примет вид:

$$W = \alpha_1(0,2161 - 0,07826x_1 + 0,63229x_2 - 0,04763x_1x_2 - 0,02938x_1^2 + 0,46870x_2^2) + \alpha_2(0,41764 - 0,21297x_1 + 0,13201x_2 - 0,13330x_1x_2 - 0,04739x_1^2 + 0,13262x_2^2) \rightarrow \max, \quad (24)$$

где  $\alpha_1 = 0,78$ ;  $\alpha_2 = 0,22$  получены на основе опроса группы экспертов (сотрудников кафедры «Сельскохозяйственные машины» и «Механизация животноводства» и специалистов предприятия ООО «Агромаштехсервис») в области вибророспарации.

Решив целевую функцию в программе MathCAD, используя приложение Maximize, получили рациональные значения критериев оптимальности:  $x_1 = -1$ ;  $x_2 = 1$ .

В раскодированном виде параметры оптимальности будут следующими:

1.  $z=0,1$  – параметр интенсивности вибрации;
2.  $\varepsilon=0,9$  – параметр наклона решета к горизонту.

Получено также соотношение, определяющее условие взаимной обусловленности факторов  $\alpha$ ,  $a$ ,  $\omega$  в условиях земной гравитации (при  $g=9,81 \text{ м/с}^2$ ).

$$\frac{\sin \alpha}{a \cdot \omega^2} = 0,0092. \quad (25)$$

**В третьей главе** «Программа и методика экспериментальных исследований» изложены: цель экспериментальных исследований; описание экспериментальной установки и обоснование ее параметров; характеристика зернового материала; методики проведения экспериментальных исследований; применение теории размерности; методика обработки данных, полученных по результатам экспериментальных исследований.

Исследования процесса сепарирования зернового материала проводили в лабораторных условиях на экспериментальной установке (рис. 11).

Устройство для очистки фуражного зерна работает следующим образом. В бункер 5 засыпается зерновой материал с различными инородными примесями. Просыпаясь через нижнее отверстие бункера 5, длина которого соответствует ширине решетчатого стана 9, материал попадает на неподвижное решето 9, которое жестко связано с рамой 1 сепаратора. Зерновой материал с различными инородными примесями побуждается к движению набором накладываемых сверху решета параллельных планок 8, которые в свою очередь приводятся в движение шатуном 11 вибропривода 2. Зерновой материал с различными инородными примесями совершает при этом колебательные движения по ширине решета и сползанию по его длине. В результате этого очищенное зерно, которое просеялось через неподвижное решето 9, попадает в сборник фракций 6. Примеси идут сходом с решета и попадают в сборник 7.

Шаг между пластинами изменялся в пределах от 0,015 м до 0,035 м. Длина пластин составляет 0,86 м, высота пластин изменялась от 0,01 м до 0,03 м. Решето изготовлено из оцинкованной стали с круглыми отверстиями диаметром 10 мм.

Для исследований использовалась пшеница сорта Алтайская 325 урожая 2009 года, горох сорта Варяг урожая 2010 года и ячмень сорта Сигнал урожая 2010 года, обмолоченных на лабораторной установке.

В качестве засорителя использовали минеральную (галка – сход с решета с отверстиями 2 мм) и органическую примеси (деревянные брусочки длиной >50 мм). Засоренность исходной зерновой смеси изменялась от 1 до 5 % минеральной и от 2 до 6 % органической примесей.

Определение потерь зерна в отходы и выделенных грубых примесей осуществлялось при помощи лабораторных электронных весов MW-300T.

Частота вращения электродвигателя изменялась при помощи преобразователя частоты электрического тока MITSUBISHI E500 FR-PA02-02, включенного в электрическую цепь совместно с системой пуска и защиты двигателя.

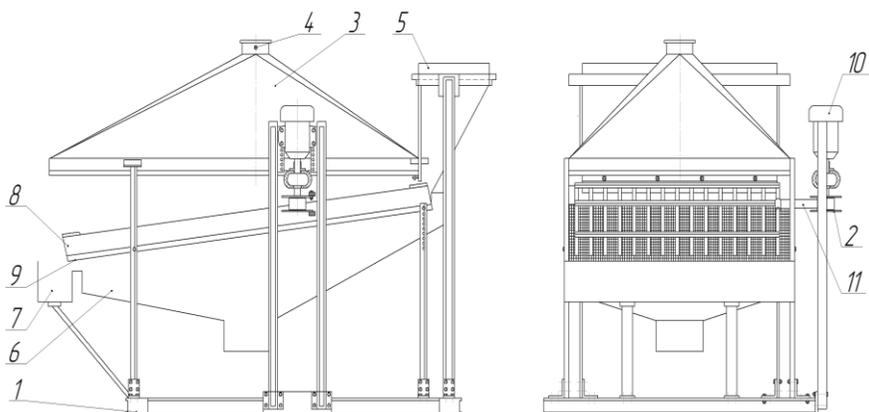


Рисунок 11 –Схема экспериментальной установки:

1 – рама; 2 – вибровозбудитель; 3 – вытяжной зонд; 4 – клапан для регулирования воздушного режима; 5 – бункер исходного материала; 6 – сборник очищенного зерна; 7 – сборник примесей; 8 – набор параллельных планок; 9 – неподвижное решето; 10 – электродвигатель; 11 – шатун.

При анализе рабочего процесса сепарирования применили методы теории размерностей. Исходя из конструктивных особенностей сепаратора и технологических особенностей его работы, мы записали показатели эффективности просеивания зернового материала  $\varepsilon$  и потерь зерна в отходы  $\Pi$  от определяющих параметров в таком функциональном виде:

$$\varepsilon = \psi(a, \omega, g, h_{нл}, b, L, \rho, \mu, \alpha, C_0, Q), \quad (26)$$

$$\Pi = \psi(a, \omega, g, h_{нл}, b, L, \rho, \mu, \alpha, C_0, Q), \quad (27)$$

где:  $a$  - амплитуда колебаний рабочего органа,  $m$ ;  $\omega$  - угловая частота колебаний,  $c^{-1}$ ;  $g$  - ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $h_{нл}$  - высота пластин,  $m$ ;  $b$  - расстояние между пластинами,  $m$ ;  $L_p$  - длина решета,  $m$ ;  $\rho$  - плотность слоя сыпучего материала,  $t/m^3$ ;  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости сыпучего материала,  $H/m^2$ ;  $\alpha$  - угол наклона решета,  $град$ ;  $C_0$  - засоренность исходной зерновой смеси,  $\%$ ;  $Q$  - подача зерновой смеси,  $t/ч$ .

В результате применения теории размерности получили следующие определяющие уравнения:

$$\varepsilon, \Pi = \Phi\left(\frac{a\omega^2}{g}; \frac{h_{нл} a \omega}{v}; \frac{L}{h_{нл}}; \frac{L}{b}; \frac{L}{b}; \frac{Q}{a^3 \omega \rho}; \alpha; C_0\right). \quad (28)$$

где  $\frac{a\omega^2}{g}$  - коэффициент перегрузки;  $\frac{h_{nl}a\omega}{v}$  - вибрационный аналог числа Рейнольдса;  $\frac{Q}{a^3\omega\rho}$  - безразмерный фактор подачи зернового материала;  $\frac{L}{h_{nl}}, \frac{h_{nl}}{b}$ ,  $\frac{L}{b}$  - масштабные факторы;  $\alpha, C$  - безразмерные факторы.

Таким образом, на основе литературных источников и собственных исследований были выявлены критерии, влияющие на процесс сепарирования.

Выходными критериями приняли эффективность выделения сорной примеси ( $\varepsilon$ ) и потери зерна в отходы ( $\Pi$ ).

Уровни варьирования факторов и их кодированные значения для проведения отсеивающего эксперимента представлены в таб. 3.

Таблица 3 – Уровни факторов и интервалы варьирования

Обозначение	Наименование факторов	Значения		
		-1	+1	
X1	$a\omega^2/g$ - коэффициент перегрузки	0,51	13,8	
X2	$h_{nl}a\omega/v$ - вибрационный аналог числа Рейнольдса	$0,035 \times 10^{-3}$	$0,96 \times 10^{-3}$	
X3	$Q/(a^3\omega\rho)$ - безразмерный фактор подачи зернового материала	866	4330	
X4	$L/h_{nl}$ - масштабный фактор	45,5	2850	
X5	$h_{nl}/b$ - масштабный фактор	0,667	0,857	
X6	$L/b$ - масштабный фактор	30,33	2443	
X7	$\alpha$ – угол наклона решета	5	25	
X8	C	Галька, %	1	5
		Длинные частицы >0,05 м, %	2	6
X9, X10, X11	Фиктивные факторы			

Для проведения отсеивающего эксперимента воспользовались планом Плаккетта-Бермана. После обработки результатов три фактора оказались незначимыми ( $X_2, X_4$  и  $X_6$ ).

Для проведения основного эксперимента были использованы только существенные факторы с уровнями варьирования (табл. 4). Для проведения опытов данного блока экспериментальных исследований была применена методика планирования эксперимента с использованием плана второго порядка типа  $B_5$  (близкого к  $D$  – оптимальному плану для пяти факторов), позволяющего получить полиномиальные уравнения регрессии второго порядка для каждого критерия оптимизации.

Таблица 4 - Факторы и интервалы варьирования основного эксперимента

Обозначение	Наименование факторов	Значения			
		-1	0	+1	
X1	$h_{nz}/b$	0,66	0,8	0,94	
X2	$aw^2/g$	0,51	1,02	1,53	
X3	$a$	5	15	25	
X4	C	Минеральные примеси, %	1	3	5
		Органические примеси, %	2	4	6
X5	$Q/a^3\omega\rho$	866	2598	4330	

Опыты проводили с трехкратной повторностью, порядок их проведения определялся рандомизацией. Статистическая обработка опытных данных, анализ полученных результатов проводили с использованием прикладных компьютерных программ Statistica, Excel, MathCAD.

**Четвертая глава** посвящена анализу результатов проведенных экспериментов.

В ней изложены результаты исследования наиболее значимых факторов, влияющих на процесс сепарирования фуражного зерна и получены математические модели, описывающие данный процесс.

После математической обработки результатов основного эксперимента получили 12 уравнений регрессии второго порядка в кодированной форме по каждой культуре:

- для определения эффективности выделения минеральных примесей  $\varepsilon_1$ , %:

$$\text{пшеница } Y_1 = 88,79 + 2,4X_3 + 2,41X_1X_3 - 2,54 X_2X_5 + 6,28 X_2^2 - 15,4 X_4^2 + 6,3 X_5^2 \quad (29)$$

$$\text{горох } Y_1 = 87,35 + 2,47X_3 + 1,99 X_4 + 7,11 X_3^2 - 13,25 X_4^2 + 7,92 X_5^2 \quad (30)$$

$$\text{ячмень } Y_1 = 88,78 + 3,29X_3 + 2,72 X_4 + 2,21X_1X_4 + 2,08X_1X_5 + 5,29 X_2^2 - 13,57 X_4^2 + 6,04 X_5^2 \quad (31)$$

- для определения эффективности выделения органических примесей  $\varepsilon_2$ , %:

$$\text{пшеница } Y_2 = 68,98 - 2,9X_1 + 18,64X_3 - 17,65 X_3^2 + 8,08 X_4^2 \quad (32)$$

$$\text{горох } Y_2 = 70,53 + 19,07X_3 + 2,79 X_5 - 3,79 X_3X_4 - 14,45 X_3^2 \quad (33)$$

$$\text{ячмень } Y_2 = 73,04 - 3,03X_1 + 18,85 X_3 + 3,72X_3X_5 - 22,52 X_3^2 + 7,8 X_4^2 \quad (34)$$

- для определения потерь зерна в отходы  $\Pi$ , %:

$$\text{пшеница } Y_3 = 0,696 + 1,54X_3 + 0,41X_4 + 1,22X_5 + 1,29X_3X_5 + 1,07X_4^2 \quad (35)$$

$$\text{горох } Y_3 = 2,896 + 5,16X_3 + 1,67X_5 + 0,98X_2X_3 + 1,56 X_3X_5 + 2,63 X_5^2 \quad (36)$$

$$\text{ячмень } Y_3 = 2,897 - 0,39X_2 + 3,89X_3 + 3,54X_5 + 0,46 X_1X_2 - 0,45 X_2X_3 + 3,43 X_3X_5 + 0,46 X_4X_5 - 1,24 X_2^2 + 2,83 X_5^2 \quad (37)$$

- для определения удельной энергоемкости рабочего процесса  $N_{уд}$ , кВт· час/т:

$$\text{пшеница } Y_4 = 0,6237 + 0,051 X_2 + 0,0183 X_4 - 0,79 X_5 - 0,041 X_2 X_5 - 0,0169 X_3 X_4 +$$

$$+0,038 X_1^2 + 0,518 X_5^2 \quad (38)$$

горох  $Y_4 = 0,626 + 0,042 X_2 + 0,022 X_4 - 0,796 X_5 + 0,027 X_1 X_5 + 0,0171 X_2 X_4 - 0,0283 X_2 X_5 + 0,543 X_5^2 \quad (39)$

ячмень  $Y_4 = 0,607 + 0,057 X_2 + 0,0295 X_4 - 0,784 X_5 + 0,0288 X_1 X_5 - 0,0457 X_2 X_5 + 0,532 X_5^2 \quad (40)$

Проверка регрессионных моделей (29-40) на адекватность осуществлялась по критерию Фишера при 5% - ом уровне значимости. В случае если  $F^{РАСЧ.} \leq F_{f_2; f_1}^{ТАБЛ.}$ , то полученная полиномиальная модель уравнения регрессии адекватно описывает изучаемую закономерность.

Для определения точек экстремумов функций  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \Pi, N_{y0}$  проведем анализ двумерных сечений поверхности отклика (рис. 12-15).

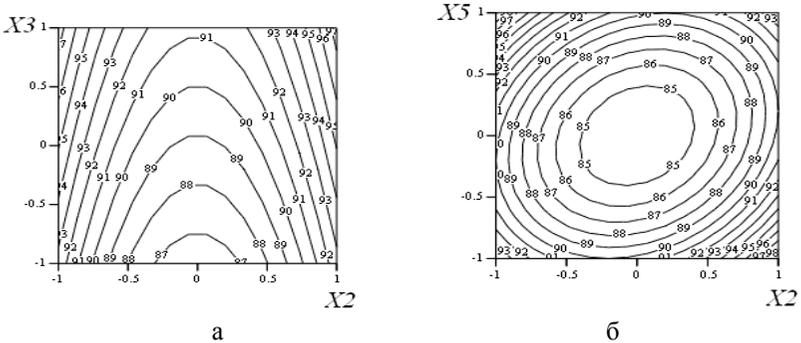


Рисунок 12 – Двумерное сечение поверхности отклика  $\varepsilon_1$ :  
 а)  $\varepsilon_1 = f(X_2, X_3)$  при  $X_1 = X_4 = X_5 = 0$ ; б)  $\varepsilon_1 = f(X_2, X_5)$  при  $X_1 = 1, X_3 = -1, X_4 = 0$

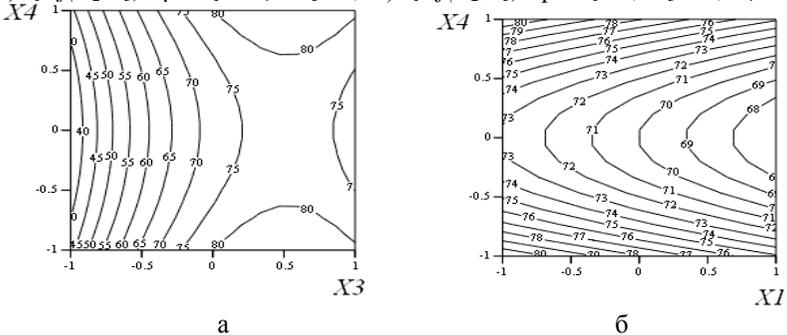
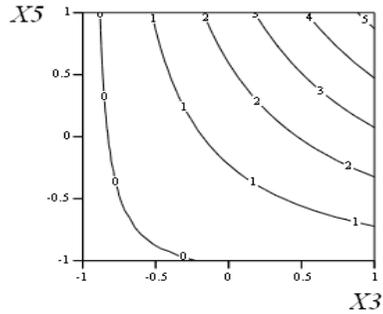
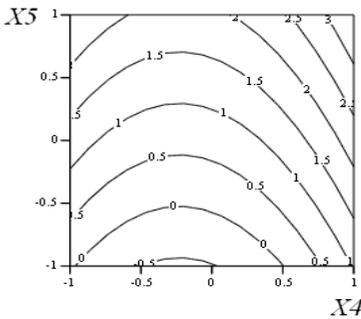
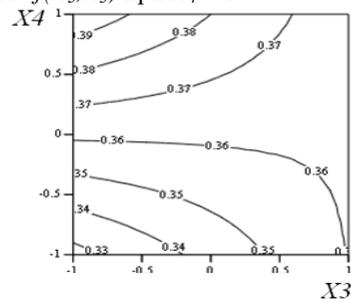
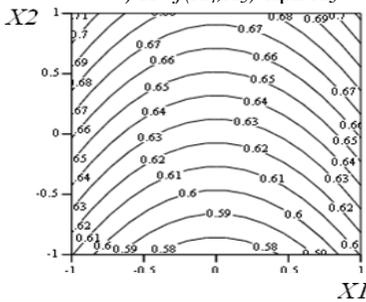


Рисунок 13 – Двумерное сечение поверхности отклика  $\varepsilon_2$ :  
 а)  $\varepsilon_2 = f(X_3, X_4)$  при  $X_1 = -1$ ; б)  $\varepsilon_2 = f(X_1, X_4)$  при  $X_3 = 1$



а б  
Рисунок 14 – Двумерное сечение поверхности отклика  $\Pi$ :  
а)  $\Pi=f(X_4, X_5)$  при  $X_3=0$ ; б)  $\Pi=f(X_3, X_5)$  при  $X_4=-1$ .



а б  
Рисунок 15 – Двумерное сечение поверхности отклика  $N_{y0}$ :  
а)  $N_{y0}=f(X_1, X_2)$  при  $X_3=0, X_4=0, X_5=0$ ; б)  $N_{y0}=f(X_3, X_4)$  при  $X_1=0, X_2=1, X_5=1$ .

Данные графические зависимости (рис. 12-15) приведены для пшеницы. При экспериментальном исследовании других культур получились подобные двумерные сечения отклика, отличающиеся величиной параметра оптимизации при одинаковых значениях факторов.

В исследованной области факторного пространства на эффективность выделения минеральной  $\varepsilon_1$  и органической  $\varepsilon_2$  примесей (рис. 12, 13) равнозначно влияют как конструктивные так и кинематические факторы.

При увеличении угла наклона решета  $\alpha$ , и следовательно его производительности, необходимо увеличивать масштабный фактор  $h_{нр}/b$  и коэффициент перегрузки  $a\omega^2/g$ , чтобы обеспечить прежнее качество очистки.

Потери зерна в отходы  $\Pi$ , (рис. 14) значительно повышаются при увеличении угла наклона решета  $\alpha$  и безразмерного фактора подачи зернового материала  $Q/(a^3\omega\rho)$ .

Повышение удельной энергоёмкости  $N_{yд}$  (рис. 15) происходит с увеличением коэффициента перегрузки  $a\omega^2/g$ , засоренности зернового материала  $C$  и безразмерного фактора подачи зернового материала  $Q/(a^3\omega\rho)$ .

Для определения рациональных параметров сепаратора необходимо решить компромиссную задачу.

Из анализа литературных источников следует, что зерновые корма с повышенной органической примесью можно использовать с последующей их обработкой, а корма с повышенной минеральной примесью использовать категорически запрещается. Отсюда следует, что критерий оптимальности «эффективность выделения органических примесей» можно исключить из расчета компромиссной задачи.

Из полученных результатов по удельной энергоёмкости, видно, что она мала и изменяется незначительно. Отсюда следует, что этот критерий тоже можно исключить из решения компромиссной задачи.

Для определения рациональных значений факторов, которые бы удовлетворяли двум критериям оптимальности  $\varepsilon_I$  (эффективность выделения минеральных примесей),  $\Pi$  (потери зерна в отходы), необходимо решить многокритериальную задачу.

При решении многокритериальной задачи был применен метод свертки критериев, который уже использовался в вычислительном эксперименте.

На основе этого решения:  $X_1 = -1,15$  – масштабный фактор ( $h_{nr}/b = 0,56$ );  $X_2 = 1,15$  – коэффициент перегрузки ( $a\omega^2/g = 1,76$ );  $X_3 = -0,15$  – угол наклона решета ( $\alpha = 12, град$ );  $X_4 = 0$  – засоренность исходного зернового материала минеральной ( $C_0 = 3\%$ ) и органической ( $C_0 = 4\%$ ) примесями;  $X_5 = 0$  – безразмерный фактор подачи зернового материала ( $Q/a^3\omega\rho = 2598$ ).

В раскодированном виде параметры сепаратора будут следующими (для  $Q=2,5$   $m^3/ч$ ):  $a=0,006$ - амплитуда колебаний рабочего органа,  $m$ ;  $\omega=50$ - угловая частота колебаний,  $c^{-1}$ ;  $h_{nl}=0,01$  - высота пластин,  $m$ ;  $b=0,015$ - расстояние между пластинами,  $m$ ;  $L_p=0,85$ - длина решета,  $m$ ;  $b_p=0,55$  – ширина решета,  $m$ ;  $\alpha=12$ - угол наклона решета,  $град$ .

**В пятой главе «Экономическая эффективность использования результатов исследования»** произведен расчет экономической эффективности применения предложенного сепаратора. Полученные результаты показывают, что использование установки для сепарирования фуражного зерна предлагаемым способом экономически выгодно. Годовая прибыль при запланированной производительности установки составит 27,8 тыс. руб. Энергоёмкость снижена в 0,57 раза, металлоёмкость в 1,2 раза по сравнению с известной маркой камнеотделителя РЗ-БКТ-100.

### **Основные выводы**

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Анализ способов очистки зернового материала, применяемых в ком-

бикормовом и мукомольном производствах, показал, что наилучшее качество очистки достигается при помощи решетных вибрационных сепараторов.

2. Предложены математические модели движения материальной частицы в слое корма и по неподвижному решетку, отображаемые связь скоростей и перемещений частицы от геометрических и кинематических параметров сепаратора, а так же технологических свойств фуражного зерна. Аналитические и численные решения дифференциальных уравнений движения различаются на 5-7% и могут быть использованы при различных инженерных расчетах сепаратора.

3. Путем проведения численного эксперимента получены оптимальные параметры ( $z = gf \cos \alpha / a\omega^2 = 0,1; \varepsilon = tg \alpha / f = 0,9$ ) процесса безотрывного виброперемещения частицы, позволяющее достигнуть максимальной производительности сепаратора и требуемой эффективности процесса сепарации.

4. Выявлены критерии подобия процесса сепарирования, необходимые для проектирования типоразмерного ряда сепараторов для очистки фуражного зерна. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены следующие конструктивно-кинематические и технологические параметры вибрационного сепаратора, позволяющие эффективно выделить минеральные и органические примеси с минимальными потерями зерна и затрат энергии: амплитуда колебаний рабочего органа  $a=0,006$  м; угловая частота колебаний  $\omega=50$  с<sup>-1</sup>; высота пластин  $h_{пл}=0,01$  м; шаг между пластинами  $b=0,015$  м; длина решета  $L_p=0,86$  м; ширина решета  $b_p=0,55$  м; угол наклона решета  $\alpha=12$  град; подача зерновой смеси  $Q=2,5$  м<sup>3</sup>/ч. Удельные энергозатраты при этом составляют 0,63 кВт·час/т, эффективность выделения минеральных примесей – 92-97,5%, а потери зерна в отходы отсутствуют.

5. Экономический эффект при использовании разработанного сепаратора достигается за счет более низкой его энергоемкости и металлоемкости. Годовая прибыль при запланированной производительности разработанного сепаратора составляет 27,8 тыс. руб., а срок окупаемости сепаратора – 0,5 года в сравнении с камнеотделителем РЗ-БКТ-100.

### **Список основных публикаций по теме диссертационной работы: публикации в изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Федоренко И.Я. Управление движением в системах с сухим вибропреобразованным трением [Текст] / И.Я. Федоренко, А.С. Федоренко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 5 (55). – С. 68-71.

2. Федоренко И.Я. Обоснование конструктивно-технологических параметров зерноочистительной машины на основе гидродинамической модели виброожиженного слоя зернистого материала [Текст] / И.Я. Федоренко, Д.Н. Пирожков, А.С. Федоренко // Вестник Алтайского государственного аграрно-

го университета. – 2012. – № 1 (87). – С. 85-90.

3. Федоренко И.Я. Компьютерное моделирование процесса безотрывного виброперемещения частицы [Текст] / И.Я. Федоренко, **А.С. Федоренко** // Ползуновский вестник. – 2014. – № 4-4 2013. – С. 263-269.

4. Федоренко И.Я. Численное моделирование процесса безотрывного виброперемещения частицы [Текст] / И.Я. Федоренко, **А.С. Федоренко** // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 7 (117). – С. 131-135.

***в других сборниках научных трудов***

5. **Федоренко, А.С.** Использование теории размерности при анализе факторов процесса очистки фуражного зерна [Текст] / **А.С. Федоренко**// Вестник БГСХА. – 2011. – № 2 (23) – С. 47-50.

6. **Федоренко, А.С.** Оптимизация конструктивно-кинематических параметров сепаратора очистки фуражного зерна [Текст] / **А.С. Федоренко**// Молодые ученые – сельскому хозяйству Алтая. Сборник научных трудов. – 2013. – Выпуск VII – С. 39-42.

***патенты***

7. Пат. 2400051 Российская Федерация, С1 А01 F12/44. Устройство для очистки фуражного зерна [Текст] / И.Я. Федоренко, **А.С. Федоренко**; заявитель и патентообладатель – И.Я. Федоренко. Заявл. 13.05.2009; опубл. 27.09.2010.

8. Пат. 2446022 Российская Федерация, С1 В07 В1/46. Просеиватель фуражного зерна [Текст] / И.Я. Федоренко, **А.С. Федоренко**, С.С. Федоренко; заявитель и патентообладатель – И.Я. Федоренко. Заявл. 09.11.2010; опубл. 27.03.2012.

9. Пат. 2459674 Российская Федерация, С1 В07 В1/04, А01 F12/44 Устройство для очистки фуражного зерна [Текст] / И.Я. Федоренко, Д.Н. Пирожков, **А.С. Федоренко**; заявитель и патентообладатель – И.Я. Федоренко. Заявл. 16.03.2011; опубл. 27.08.2012.



Подписано в печать 15.10.2014 г. Формат 60x84/16.  
Бумага для множительных аппаратов. Печать ризографная.  
Гарнитура «Times New Roman». Усл.-печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № .

РИО АГАУ  
656049, г. Барнаул, пр. Красноармейский, 98  
тел. 62-84-26