

На правах рукописи



ГЫЛЫКОВА СЭЛМЭГ ЖАРГАЛОВНА

**ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
СЕПАРИРУЮЩЕГО МЕТАТЕЛЯ ЗЕРНА**

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Улан-Удэ – 2024

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

**Научный
руководитель**

доктор технических наук, профессор
Ямпиров Сэнгэ Самбуевич

**Официальные
оппоненты:**

Абидуев Андрей Александрович,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Бурятская государственная
сельскохозяйственная академия имени В.Р.
Филиппова» кафедра «Технический сервис в АПК
и инженерные дисциплины», заведующий

Стрикунов Николай Иванович, кандидат
технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Алтайский государственный аграрный
университет» кафедра «Сельскохозяйственная
техника и технологии», доцент

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Арктический государственный
агротехнологический университет».

Защита диссертации состоится «17» декабря 2024 года в 09 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 35.2.013.03 при Федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО «Дальневосточный ГАУ» по адресу: 675005, Амурская область, г. Благовещенск, ул. Политехническая, 86, телефон: +7(4162)99-51-79; E-mail: dis35201303@dalgau.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет» по адресу: www.dalgau.ru

Автореферат разослан «___» _____ 202__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Панова Елена Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В наше время процесс производства зерна характеризуется стремлением обрабатывать и хранить весь собранный урожай непосредственно на местах его выращивания. Однако существующие сельскохозяйственные машины для очистки зерна не соответствуют современным стандартам и физически изношены. В крупных и средних хозяйствах эта техника присутствует лишь на 50%, а в малых и фермерских хозяйствах практически отсутствует.

В связи с этим актуальной задачей становится повышение эффективности послеуборочной обработки зерна через разработку универсальных машин, способных за одно технологическое действие очистить зерно от различных примесей, подсушить и охладить его. Введение подобных машин позволит существенно сократить временные и трудовые затраты, повысить качество конечного продукта и уменьшить потери, связанные с длительным хранением и транспортировкой зерна в неочищенном виде.

Создание и улучшение технических средств для разработки универсальных устройств, способных одновременно очищать, сушить и охлаждать зерно, представляет собой значимую научно-практическую задачу.

Степень разработанности темы. Многие ученые выполнили исследования зернометательных машин, убедительно доказав их многофункциональность: Абидаева А.А., Авдеева Н.Е., Гончарова Е.С., Бутенко А.Ф., Заики П.М., Иванова Н.М., Климок А.И., Леканова С.В., Минаева В.Н., Несикова А.А., Урханова Н.А., Пикуза А.И., Стрикунова Н.И., Шуханова С.Н., Ханхасаева Г.Ф. и многих других авторов.

Исследование зернометательных машин показывает, что использование этих агрегатов существенно улучшит процессы разделения и охлаждения зернового материала.

Цель исследования – повышение качества обработки зернового вороха и снижение повреждаемости зерна.

Задачи исследования:

1. Разработать математическую модель движения зерна в сепарирующем метателе зерна.
2. Изучить взаимодействие лопасти сепарирующего метателя с зерном с целью снижения их повреждаемости.
3. Обосновать основные конструктивно-режимные параметры сепарирующего метателя зерна и определить его экономическую эффективность.

Объект исследования – процесс разделения зернового вороха на фракции при его обработке на сепарирующем органе метателя зерна.

Предмет исследования – закономерности процесса сепарации зерна на сепарирующем метателе зерна.

Рабочая гипотеза – повышение качества обработки зернового вороха и снижение повреждения зерна в ходе обработки сепарирующим метателем можно достичь за счет уменьшения контактного давления от лопасти.

Научная новизна и теоретическая значимость.

1. Обоснована математическая модель процесса сепарации и конструктивно-технологическая схема сепарирующего метателя зерна.
2. Определены зависимости, определяющие основные конструктивно-режимные параметры процесса сепарации на сепарирующем метателе зерна.
3. Установлены закономерности процесса взаимодействия зерна (зернового вороха) с лопастью зернометателя, влияющие на степень повреждения зерна при ударе.

Новизна технических решений подтверждена патентом на полезную модель «Метатель зерновых материалов» № 227398 от 18.07.2024 г.

Практическая значимость научного исследования.

1. Обоснованы конструктивно-режимные параметры сепарирующего метателя

зерна.

2. Результаты исследований могут быть использованы проектно-конструкторскими организациями для разработки новых зерноочистительных машин.

3. Технические решения, обеспечивающие повышение качества обработки зернового вороха и снижение степени повреждения зерна в процессе работы сепарирующим метателем зерна.

Методология и методы исследования. Исследования основывались на изучении научно-технической литературы как отечественной, так и зарубежной. Исследования проводились с использованием законов математики, физики и теоретической механики в рамках лабораторных и производственных экспериментов. Для экспериментальных исследований применялись как обычные, так и специализированные методики, а также способы планирования экспериментов и оборудование, соответствующее актуальным ГОСТам. Использовались методы математической статистики, а также программы Microsoft Excel 2013, Statistica 10.0 и Mathcad 15.

Научные положения, выносимые на защиту:

– математическая модель перемещения частицы зернового материала по лопасти сепарирующего метателя зерна;

– кинематические и конструктивно-режимные параметры сепарирующего метателя зерна;

– результаты экспериментальных исследований по обоснованию процесса очистки зерна на сепарирующем метателе зерна.

Степень достоверности исследований подтверждается:

– применением теории планирования экспериментов и обработки экспериментальных данных с помощью современных компьютерных технологий, таких как Statistica 10.0 и Mathcad 15, при этом наблюдается согласованность между теоретическими и экспериментальными данными. Достоверность результатов теоретических и практических исследований достигает уровня значимости 95 %.

Реализация результатов исследований. Теоретические и экспериментальные исследования были применены для подготовки технического задания на разработку и производство макета устройства для сепарации зерна, который прошел хозяйственные испытания и был внедрен в ООО «Куйтунское», 671130, Республика Бурятия, Тарбагатайский район, с. Куйтун; ООО «Наследие», 671950, Республика Бурятия, Закаменский р-н, г. Закаменск, ул. Седлецкого, д. 15а, помещ. 2; ООО «СибирьКонтинент», 670031, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Бийская, д. 87, блок 6.

Апробация результатов исследований. Результаты исследований были представлены на разнообразных конференциях, таких как секция «Технологии и технические средства в АПК» в рамках Национальной научно-практической конференции «Образование и наука» в период с 2020 по 2024 год; на научной конференции «Современное общество, образование и наука» в Тамбове в 2020 году; на Всероссийской научно-практической конференции «Приоритетные задачи научно-технологического развития агропромышленного комплекса» в 2024 году; а также на международной научно-практической конференции «Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития» в Благовещенске, прошедшей в 2024 году.

Публикации. В результате проведенных исследований опубликовано 13 научных трудов, среди которых 7 статей в журналах, рекомендованных ВАК, и 2 статьи в издании, одобренном Scopus, получен патент на полезную модель «Метатель зерновых материалов».

Структура и объем работы. Диссертация включает в себя введение, пять глав, заключение и литературный список, состоящий из 143 источников, а также 6 приложений. Общий объем составляет 176 страниц печатного текста с 49 рисунками и 14 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассматривается актуальность темы, кратко излагаются основные положения, выносимые на защиту, дается общая характеристика выполненных исследований.

В первой главе «Состояние вопроса и задачи исследования» проанализированы конструкции зернометателей, зернопультов, выявлены их достоинства и недостатки, рассмотрены их характеристики. Существенный вклад в усовершенствование внесли А.А. Абидуев, С.В. Башкиров, Е.С. Гончаров, П.М. Заика, Н.М. Иванов, А.А. Кукибный, С.В. Леканов, П.Н. Платонов, Н.А. Урханов, Г.Ф. Ханхасаев, А.А. Несиков, Н.И. Стрикунов, С.Н. Шуханов, С.С. Ямпиллов и другие ученые.

Несмотря на очевидные достоинства, зернометателей и зернопультов они применяются реже. Это, видимо связано с тем, что у них имеется главный недостаток – это дробление и травмирование семян. В ВСГУТУ разработан сепарирующий метатель зерна, который не только снижает повреждение зерна и мало травмирует, но и одновременно подсушивает зерновой материал.

Во второй главе представлены теоретические исследования движения зернового материала по лопасти сепарирующего метателя зерна.

Анализ современного состояния зерноочистительной техники, находящейся в фермерских хозяйствах, показал, что растет потребность в универсальной многофункциональной зерноочистительной технике, которая способна за одну операцию произвести охлаждение, сушку, очистку и фракционирование зернового материала. Для выполнения данных требований разработан сепарирующий метатель зерна. Сепарирующий метатель зерна за одну операцию осуществляет очистку исходного зернового материала от легких, мелких и крупных примесей. Для подтверждения заявленных характеристик сепарирующего метателя зерна необходимо провести исследования на опытных образцах в хозяйственных условиях. Конструирование и изготовление опытных изделий сепарирующего зернометателя должны основываться на теоретических исследованиях, которые базируются на аналитическом описании движения зернового материала по очистительному устройству сепарирующего зернометателя. В работе представлено аналитическое описание движения зернового материала дифференциальным уравнением, распределение действия сил на частицу при движении по очистительному устройству, а также конструкция сепарирующего зернометателя.

Разработанный сепарирующий метатель зерна отличается от всех существующих тем, что лопасть барабана выполнена из двух частей –приемной и серповидной. Серповидная часть лопасти имеет на конце участок в виде конуса с радиусом кривизны r , а на приемной части лопасти установлено резиновое покрытие (рис.1, 2).

Сепарирующий метатель зерна содержит лопастной барабан 1, состоящий из приемного 2 и несущего 3 кольцевых дисков, конусообразного обода 4, установленного на периферии несущего кольцевого диска 3, охватывающего концы лопастей барабана и образующего зазор шириной H с периферией приемного кольцевого диска 2. Приемная 2 сторона барабана 1 с зазором шириной H расположена в цилиндрической части выпускного патрубка 5, а несущая 3 сторона с конусообразным ободом 4 вне выпускного патрубка 5. Несущий кольцевой диск 3 закреплен на валу, который приводится в движение приводом 9 электродвигателя. Питающий патрубок 10, соединенный с бункером-питателем 11, подает зерновой материал в сепарирующий метатель зерна.

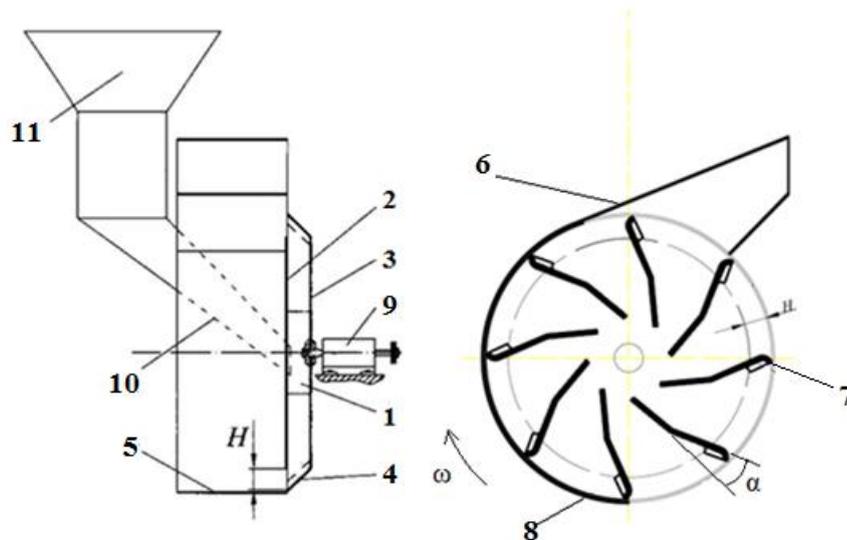


Рисунок 1 - Схема сепарирующего метателя зерна

- 1 – лопастной барабан; 2 – приемный кольцевой диск; 3 – несущий кольцевой диск; 4 – конусообразный обод; 5,6 – выпускной патрубок;
 7 – конусообразный участок кольцевого диска; 8 – обрезиненная поверхность цилиндрической части выпускного патрубка;
 9 – привод с электродвигателем; 10 – питающий патрубок;
 11 – бункер-питатель

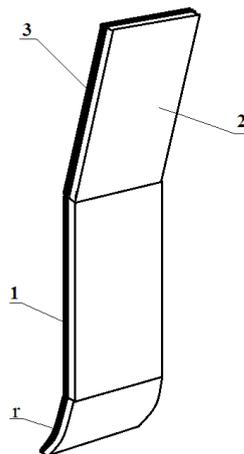


Рисунок 2 - Лопасть сепарирующего метателя зерна
 1 – серповидная часть лопасти; 2 – приемная часть лопасти;
 3 – обрезиненная рабочая поверхность

Новая форма выполнения лопастей, а именно серповидная часть лопасти, на периферии имеет закругленный конусообразный участок с радиусом r , что позволяет снизить радиальную скорость сыпучего материала, приобретенную им при движении по лопасти вращающегося барабана. Тем самым исключается удар материала о конусообразный обод барабана, а конусообразность участка позволяет осуществить выгрузку зернового материала с лопасти в цилиндрическую часть выпускного патрубка. Кроме того, приемная часть лопасти имеет обрезиненную рабочую поверхность, что позволяет при заборе зернового материала уменьшить его повреждение.

Получено теоретическое описание движения частиц зернового материала в сепарирующем метателе зерна. Для исследования движения зерна в сепарирующем метателе зерна рассмотрено движение зерна по лопасти метателя зерна. Поскольку внешние силы, действующие на зерно, расположены в плоскости вращения барабана, то зерно движется по

лопасти без отрыва от нее в неподвижной плоскости (рис. 3).

Согласно распределению действия сил на частицу при движении по очистительному устройству, дифференциальное уравнение имеет вид

$$m \frac{d^2 S}{dt^2} = F_{\text{ц}} \cos \alpha - F_{\text{тр}} + G \sin(\beta - \alpha), \quad (1)$$

$G = mg$ – сила гравитации, Н;

$F_{\text{тр}} = fN$ – сила трения, Н;

$F_{\text{ц}} = mS\omega^2$ – сила центробежная, Н;

$F_{\text{к}} = 2m\omega \frac{dS}{dt}$ – сила Кориолиса, Н;

m – масса зерна, кг;

f – коэффициент трения зерна по очистительному устройству;

N – сила реакции опоры, Н;

ω – угловая скорость лопатки, рад/с;

S – расстояние от центра вращения барабана до зерна, м.

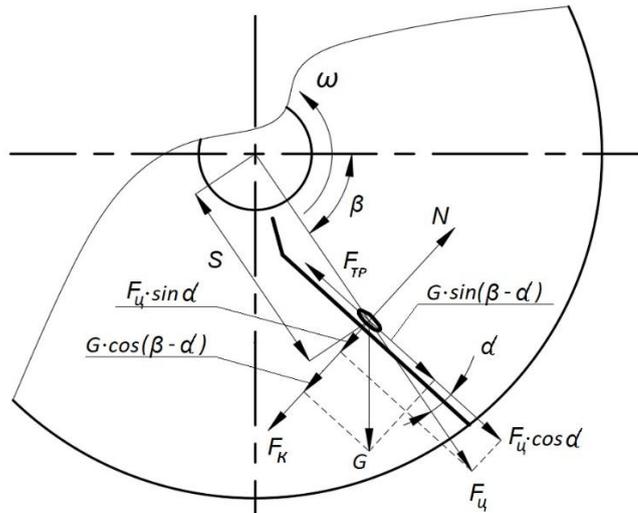


Рисунок 3 - Распределение действия сил на частицу при движении по очистительному устройству

Уравнение равновесия зерна на очистительном устройстве:

$$N - F_{\text{к}} - F_{\text{ц}} \sin \alpha - G \cos(\beta - \alpha) = 0, \text{ или} \\ N = F_{\text{к}} + F_{\text{ц}} \sin \alpha + G \cos(\beta - \alpha) \quad (2)$$

С учетом уравнения 2 уравнение 1 примет следующий вид

$$m \frac{d^2 S}{dt^2} = F_{\text{ц}} \cos \alpha - fF_{\text{к}} - fF_{\text{ц}} \sin \alpha - fG \cos(\beta - \alpha) + G \sin(\beta - \alpha) \quad (3)$$

Дифференциальное уравнение движения зернового материала согласно схеме сил, действующих на зерно во вращающемся барабане (рис. 3) имеет следующий вид:

$$m \frac{d^2 S}{dt^2} = F_{\text{ц}} \cos \alpha - F_{\text{тр}} + G \sin(\beta + \alpha), \quad (4)$$

$F_{\text{тр}} = fN$ – сила трения, Н;

f – коэффициент трения зерна по очистительному устройству;

$F_{\text{к}} = 2m\omega \frac{dS}{dt}$ – сила Кориолиса, Н;

m – масса зерна, кг;

ω – угловая скорость лопатки, рад/с;

N – сила реакции опоры, Н;

$G = mg$ – сила гравитационная, Н;

$F_{\text{ц}} = mS\omega^2$ – сила центробежная, Н;

S – расстояние от центра барабана, м.

Ранее аналитически нами было получено выражение [2]

$$\frac{d^2S}{d\beta^2} + 2f \frac{dS}{d\beta} - S(\cos \alpha - f \sin \alpha) = \frac{g}{\omega^2} (\cos(\beta + \alpha) - f \sin(\beta + \alpha)). \quad (5)$$

Решение дифференциального уравнения (1), как известно, состоит из общей части и частного решения.

Общее решение линейного неоднородного дифференциального уравнения 2-го порядка с постоянными коэффициентами A и B имеет вид

$$S = S_0 + S_{\text{ч}}, \quad (6)$$

S_0 – общее решение однородного уравнения;

$S_{\text{ч}}$ – частное решение.

Найдем коэффициенты A и B линейного неоднородного дифференциального уравнения второго порядка

$$A = -\frac{g}{\omega^2} \cdot \frac{f^2 \sin(\alpha)^2 - 2f^2 \cos \alpha - 2f \cos \alpha \sin \alpha - 3f \sin \alpha + \cos(\alpha)^2 + \cos \alpha}{f^2 \sin(\alpha)^2 + 4f^2 - 2f \cos \alpha \sin \alpha - 2f \sin \alpha + \cos(\alpha)^2 + 2 \cos \alpha + 1}; \quad (7)$$

$$B = \frac{g}{\omega^2} \cdot \frac{f \cos(\alpha)^2 - 2f^2 \sin \alpha - f^2 \cos \alpha \sin \alpha + 3f \cos \alpha - f \sin(\alpha)^2 + \cos \alpha \sin \alpha + \sin \alpha}{f^2 \sin(\alpha)^2 + 4f^2 - 2f \cos \alpha \sin \alpha - 2f \sin \alpha + \cos(\alpha)^2 + 2 \cos \alpha + 1} \quad (8)$$

Представим общее решение дифференциального уравнения (5) в виде:

$$S = S_0 + S_{\text{ч}} = c_1 e^{\lambda_1 \beta} + c_2 e^{\lambda_2 \beta} + A \cos \beta + B \sin \beta. \quad (9)$$

Величины постоянных коэффициентов c_1 и c_2 определяем из начальных условий.

Найденные значения постоянных коэффициентов c_1 и c_2 подставим в уравнение (9) и, подставляя коэффициенты A и B , получим искомое решение дифференциального уравнения (5)

$$S = \frac{1}{e^{\lambda_1 \beta_0}} \cdot \frac{U_0 - \omega \lambda_2 S_0 + \left[-\frac{g}{\omega^2} \cdot \frac{f^2 \sin(\alpha)^2 - 2f^2 \cos \alpha - 2f \cos \alpha \sin \alpha - 3f \sin \alpha + \cos(\alpha)^2 + \cos \alpha}{f^2 \sin(\alpha)^2 + 4f^2 - 2f \cos \alpha \sin \alpha - 2f \sin \alpha + \cos(\alpha)^2 + 2 \cos \alpha + 1} \right] \cdot (\omega \sin \beta_0 + \omega \lambda_2 \cos \beta_0) - \left[\frac{g}{\omega^2} \cdot \frac{f \cos(\alpha)^2 - 2f^2 \sin \alpha - f^2 \cos \alpha \sin \alpha + 3f \cos \alpha - f \sin(\alpha)^2 + \cos \alpha \sin \alpha + \sin \alpha}{f^2 \sin(\alpha)^2 + 4f^2 - 2f \cos \alpha \sin \alpha - 2f \sin \alpha + \cos(\alpha)^2 + 2 \cos \alpha + 1} \right] \cdot (\omega \cos \beta_0 - \omega \lambda_2 \sin \beta_0)}{\omega \lambda_1 - \omega \lambda_2} \cdot e^{\lambda_1 \beta} -$$

$$U_0 - \omega \lambda_1 S_0 + \left[-\frac{g}{\omega^2} \cdot \frac{f^2 \sin(\alpha)^2 - 2f^2 \cos \alpha - 2f \cos \alpha \sin \alpha - 3f \sin \alpha + \cos(\alpha)^2 + \cos \alpha}{f^2 \sin(\alpha)^2 + 4f^2 - 2f \cos \alpha \sin \alpha - 2f \sin \alpha + \cos(\alpha)^2 + 2 \cos \alpha + 1} \right] \cdot (\omega \sin \beta_0 + \omega \lambda_1 \cos \beta_0) - \left[\frac{g}{\omega^2} \cdot \frac{f \cos(\alpha)^2 - 2f^2 \sin \alpha - f^2 \cos \alpha \sin \alpha + 3f \cos \alpha - f \sin(\alpha)^2 + \cos \alpha \sin \alpha + \sin \alpha}{f^2 \sin(\alpha)^2 + 4f^2 - 2f \cos \alpha \sin \alpha - 2f \sin \alpha + \cos(\alpha)^2 + 2 \cos \alpha + 1} \right] \cdot (\omega \cos \beta_0 - \omega \lambda_1 \sin \beta_0) \cdot e^{\lambda_2 \beta} -$$

$$-\frac{g}{\omega^2} \cdot \frac{f^2 \sin(\alpha)^2 - 2f^2 \cos \alpha - 2f \cos \alpha \sin \alpha - 3f \sin \alpha + \cos(\alpha)^2 + \cos \alpha}{f^2 \sin(\alpha)^2 + 4f^2 - 2f \cos \alpha \sin \alpha - 2f \sin \alpha + \cos(\alpha)^2 + 2 \cos \alpha + 1} \cdot \cos \beta + \frac{g}{\omega^2} \cdot \frac{f \cos(\alpha)^2 - 2f^2 \sin \alpha - f^2 \cos \alpha \sin \alpha + 3f \cos \alpha - f \sin(\alpha)^2 + \cos \alpha \sin \alpha + \sin \alpha}{f^2 \sin(\alpha)^2 + 4f^2 - 2f \cos \alpha \sin \alpha - 2f \sin \alpha + \cos(\alpha)^2 + 2 \cos \alpha + 1} \cdot \sin \beta \quad (10)$$

Получим уравнение переносной скорости

$$U_e = \frac{1}{e^{\lambda_1 \beta_0}} \cdot \frac{U_0 - \omega \lambda_2 S_0 + A(\omega \sin \beta_0 + \omega \lambda_2 \cos \beta_0) - B(\omega \cos \beta_0 - \omega \lambda_2 \sin \beta_0)}{\omega \lambda_1 - \omega \lambda_2} \cdot \lambda_1 e^{\lambda_1 \beta} - \frac{U_0 - \omega \lambda_1 S_0 + A(\omega \sin \beta_0 + \omega \lambda_1 \cos \beta_0) - B(\omega \cos \beta_0 - \omega \lambda_1 \sin \beta_0)}{\omega e^{\lambda_2 \beta_0} (\lambda_1 - \lambda_2)} \cdot \lambda_2 e^{\lambda_2 \beta} - A \sin \beta + B \cos \beta \quad (11)$$

Полученное уравнение (10) представляет собой уравнение перемещения частицы сыпучего материала во вращающемся барабане сепарирующего зернометателя и показывает изменение расстояния от центра вращения барабана до зерна. Уравнение (11) позволяет определить переносную скорость движения зерна.

Для проверки аналитически полученных выражений (10-11) была изготовлена экспериментальная установка сепарирующего зернометателя с вращающимся барабаном, в котором сплошные лопасти способны менять угол наклона. Эксперименты проводили при следующих условиях: $S_0 = 0.085$ м, $U_0 = 0$ м/с, $\beta_0 = 0^\circ$, $\omega = 37,7$ рад/с, $f = 0.4$ (коэффициент трения зерен пшеницы по стальному листу), $\alpha = -20^\circ$, 0° и $+20^\circ$. Подставив значения в выражения (10-11), причем с шагом вращения барабана в 10 градусов, получим следующие данные сведенные в таблицу 1.

По данным таблицы построим теоретические траектории (см. рис. 4, траектория 1). Поскольку коэффициенты трения зерен пшеницы по стальному листу отличаются в зависимости от состояния поверхности зерна, а также подача зерен неравномерная, то их траектории движения в реальных условиях различны (см. рис. 4, экспериментальные траектории 2), а вылет зерен наблюдается в определенном секторе 3 (рис. 4).

Таблица 1 – Результаты теоретических исследований

β , град.	S , м. при $\alpha = -20^\circ$	S , м. при $\alpha = 0^\circ$	S , м. при $\alpha = 20^\circ$
0	0.085	0.085	0.085
10	0.08644	0.08634	0.08607
20	0.09056	0.09014	0.0891
30	0.09711	0.09618	0.09387
40	0.10597	0.1043	0.10024
50	0.11708	0.11443	0.1081
60	0.13047	0.12657	0.11739
70	0.14622	0.14076	0.12812
80	0.16447	0.15712	0.1403
90	0.18542	0.17577	0.154
100	0.20932	0.19692	0.16928
110	0.23648	0.22082	0.18629
120	0.26729	0.24776	0.20515
130	0.30217	0.27808	0.22604
140	0.34164	0.31219	0.24918
150	0.38628	0.35056	0.27478
160	0.43681	0.3937	0.30313
170	0.49389	0.44224	0.33452
180	0.55852	0.49685	0.36929

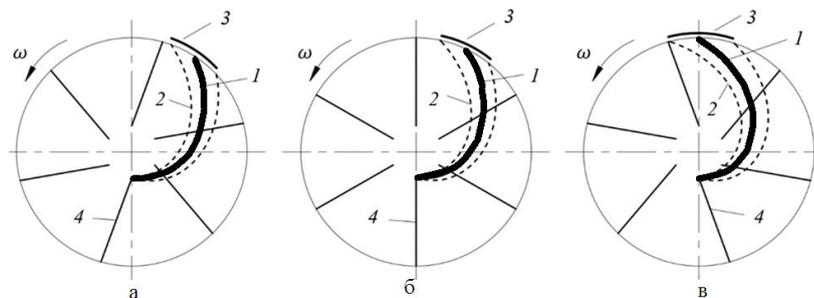


Рисунок 4 - Теоретические и экспериментальные траектории перемещения зерна пшеницы в зависимости от угла наклона очистительного устройства:
а – -20° ; б – 0° ; в – $+20^\circ$;
1 – теоретические траектории; 2 – экспериментальные траектории;
3 – наблюдаемый сектор; 4 – сплошные лопасти

Решением дифференциального уравнения второго порядка, которое является линейным неоднородным с постоянными коэффициентами (1), являются выражения (10) и (11). Выражения адекватно описывают траекторию перемещения зерен пшеницы в барабане сепарирующего метателя зерна.

Анализ процесса работы разработанного рабочего органа показывает, что в сравнении с другими зернометательными машинами мгновенная сила удара со стороны лопасти сепарирующего метателя зерна о частицу зерна значительно уменьшается за счет установки на лопастях резиновых покрытий.

В зависимости от мгновенной силы удара лопасти сепарирующего метателя зерна о частицу зерна она претерпевает некоторые структурные изменения в пределах упругой деформации. Чем больше сила удара лопасти о частицу зерна, тем больше частица зерна повреждается. Для определения мгновенной силы удара лопасти о частицу зерна использовали гипотезу, предложенную Герцем, который рассматривает процесс удара тел в пределах упругой деформации. Для определения мгновенной силы удара лопасти о частицу зерна в одной точке в момент удара использовали формулу И.Я. Штаермана:

$$P = k \cdot \alpha^{\frac{3}{2}}, \quad (12)$$

где k – коэффициент, зависящий от свойств материала лопасти и кривизны поверхностей частицы зерна в точке контакта;

α – упругая деформация частицы зерна в точке контакта.

Для определения коэффициента k , зависящего от свойств материала лопасти и кривизны поверхностей частицы зерна в точке контакта, использовали известную формулу А.Ф. Бутенко при установке на лопасти различных покрытий (резиновых и полимерных) для уменьшения данного коэффициента, которые уменьшают мгновенную силу удара:

$$k = \frac{2}{3} \cdot \frac{E_1 E_2}{E_1(1 - \mu_2^2) + E_2(1 - \mu_1^2)} \sqrt{\frac{1}{2} \frac{1}{\sum r}}, \quad (13)$$

где E_1, E_2 – модули Юнга частицы зерна и материала лопасти;

μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона частицы зерна и материала лопасти;

$\sum r$ – сумма главных кривизны в точке контакта частицы зерна о лопасть.

Приведённая кривизна частицы зерна выразится через радиусы кривизны:

$$r_{11} = \frac{b}{2} = c; \quad r_{12} = \frac{a^2}{c}. \quad (14)$$

При определении кривизны частицы зерна приняли допущение, что форма частицы зерна представляет эллипсоид вращения с полуосями a и c и шириной b (рис.5). А также приняли следующее допущение, что при взаимодействии обрезающей поверхности лопасти и зерна, в точке контакта поверхность резины деформируется соразмерно форме зерна, тогда кривизны r_{21} и r_{22} находим как и r_{11} и r_{12} .

В итоге сумма основных кривизны двух соприкасающихся поверхностей равна:

$$\Sigma r = \frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}}, \quad (15)$$

где r_{21} r_{22} – кривизны обрезающей поверхности лопасти, мм.

И тогда с учётом формул (14) и (15) выражение (13) принимает вид:

$$k = \frac{2}{3} \cdot \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1(1 - \mu_2^2) + E_2(1 - \mu_1^2)} \cdot \sqrt{0,25 \cdot \frac{c \cdot a^2}{a^2 + c^2}}. \quad (16)$$

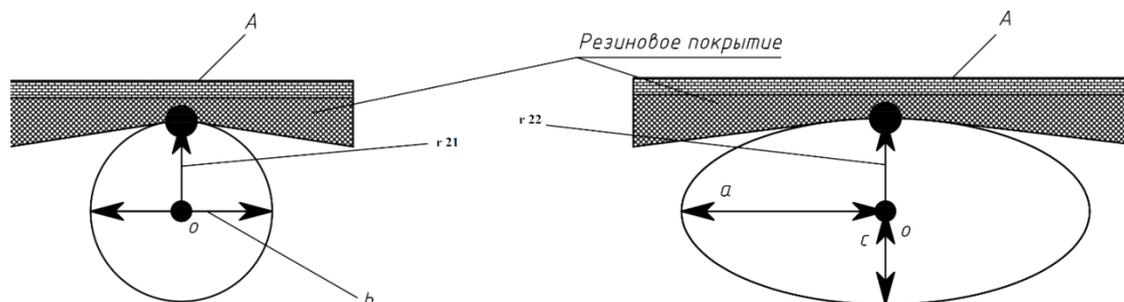


Рисунок 5 - Схема удара частицы зерна об обрезающую поверхность лопасти зернометателя

Анализ выражения (16), когда на лопасти установлено резиновое покрытие, показывает, что при установке на лопастях резиновых покрытий модуль Юнга для резины ($E_{рез} = E_2 = 2 \dots 18$ МПа), а модуль Юнга для зерна ($E_{зер} = E_1 = 10-40$ МПа). Также известно, что коэффициент Пуассона для резины составляет $\mu_2 = 0,5$. Применительно к стальным лопастям модуль Юнга для стали ($E_{стали} = E_2 = 2 \cdot 10^5$ МПа). Известно, что коэффициент Пуассона для стали – $0,25 \dots 0,33$. Принимая $\mu_2 = 0,3$, рассчитав k для стальных лопастей при контакте зерновки с лопастью при ударе среднего зерна, то $k_{стали} = 18,48$.

Рассчитаем коэффициент k , зависящий от материала поверхности лопасти и кривизны поверхностей тел в точке контакта при установке на лопастях резиновых покрытий для крупного зерна, среднего и мелкого зерна (пшеницы). Анализ данных графика показал, что коэффициент k изменяется от 1 до 6 в зависимости от модуля Юнга от 2 до 18. Среднее значение коэффициента k , зависящего от поверхности лопасти, установленной резиновым покрытием и кривизны поверхностей тел в точке контакта, составляет $k_{рез} = 3,35$ для среднего зерна при $E = 10$ Мпа.

Таким образом, коэффициент k , зависящий от свойств материала поверхности лопасти и кривизны поверхностей тел в точке контакта при установке на лопастях резиновых покрытий в 5,51 раз меньше чем при ударе зерновки о стальную лопасть.

Аналогично рассчитали коэффициент k , зависящий от материала поверхности лопасти и кривизны поверхностей тел в точке контакта при покрытии лопасти полимерными покрытиями (капролоном) ($E_{капролон} = E_2 = 80 \dots 100$ МПа). Коэффициент Пуассона для капролона составляет $\mu_2 = 0,43$. Средний коэффициент k , зависящий от материала поверхности лопасти и кривизны поверхностей тел в точке контакта при покрытии лопасти полимерными покрытиями (капролоном) при $E_{капролон} = 90$ Мпа для среднего зерна, составляет $k_{капролона} = 10,2$, это в 3 раза выше, чем при покрытии лопасти резиновыми покрытиями.

Таким образом, выбираем резиновые покрытия на лопастях сепарирующего метателя зерна, при котором коэффициент k , зависящий от материала поверхности лопасти и кривизны поверхностей тел в точке контакта намного меньше, чем при покрытии лопасти полимерными покрытиями.

С учетом преобразования формула (12) принимает вид:

$$P = k \cdot \left[\frac{5}{4} \cdot \frac{m_1 \cdot V_{H1}^2}{k} \right]^{\frac{3}{5}}, \quad (17)$$

где m_1 – масса частицы зерна, кг;

V_{H1}^{\square} – нормальная составляющая скорости зерна до момента удара, м/с.

Нормальная составляющая скорости зерна до момента удара определяется по формуле:

$$V_{H1}^{\square} = V_0^{\square} \cdot \cos(\theta - \alpha) + \omega R \cdot \cos \alpha, \quad (18)$$

где V_0^{\square} – скорость движения частицы зерна до удара о лопасть, м/с;

α – угол наклона лопасти к начальному радиусу в противоположную сторону вращения,

θ – угол движения частицы зерна со скоростью V_0^{\square} к нормали лопасти.

Для определения закономерности влияния нормальной составляющей скорости зерна и угла наклона лопасти к начальному радиусу в противоположную сторону вращения на мгновенную силу удара лопасти о частицу зерна построили график (рис. 6).

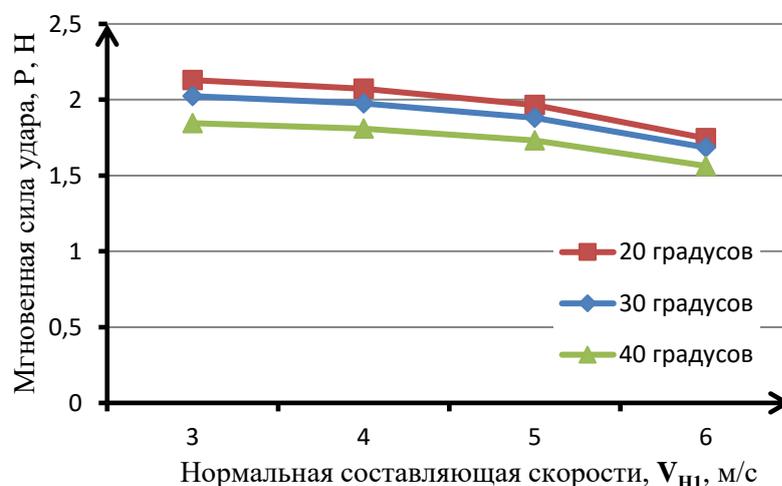


Рисунок 6 - Зависимость мгновенной силы удара от нормальной составляющей скорости

Как показывают исследования, увеличение угла наклона лопасти α в обратную сторону вращения снижает мгновенную силу удара на 15-20 %.

Анализ исследования показал, что для уменьшения ударного взаимодействия частицы зерна с лопастью необходимо установить резиновые покрытия на лопасти. Кроме того, чтобы снизить величину мгновенной силы при постоянной угловой скорости, необходимо лопасти метателя зерна установить на угол наклона лопасти α к начальному радиусу в противоположную сторону вращения на 30-40°.

В третьей главе изложена программа и методика экспериментальных исследований, описана экспериментальная установка, использованные приборы и оборудование, методика проведения исследований и обработка экспериментальных данных.

Испытания основных параметров сепарирующего зернометателя на очистке зерна от легких, мелких и крупных примесей проводились на экспериментальной установке, общий вид представлен на рисунке 7.

При исследованиях применялись методы теории математического планирования эксперимента, статистические и численные методы с использованием вычислительной техники. Эффективность процесса разделения зернового материала сепарирующим метателем зерна оценивали показателем В.Г. и Г.В. Ньютонов.

Для определения снижения влажности исходного зернового вороха после пропуска

через сепарирующий метатель зерна был использован портативный влагомер Фауна-М, позволяющий вне лабораторных условий и с высокой точностью (до 0,2 %) определить влажность зерна. Вычислялась влажность как исходного зернового вороха, так и влажность зерна, прошедшего обработку сепарирующим метателем зерна, после каждой стадии обработки (после каждого пропуска вороха через метатель).

Для определения количества макроповрежденного зерна выделяли четыре навески массой 50 г. Зерна, имеющие макроповреждения, отдели от основного материала и взвешивали на весах ВЛТЭ-1100 с точностью до 0,01 г. После определения массы макроповрежденного зерна вычисляли его содержание в процентном отношении к общей массе навески.

Микротравмирование зерна определяли методом окрашивания. Анализировали пробы по сто семян в четырёхкратной повторности. Анализировались зерна с различными типами повреждений: с повреждённым зародышем, с повреждённой оболочкой зародыша и повреждённым эндоспермом. В соответствии с методикой С.А. Чазова, каждую пробу зерна предварительно выдерживали 15 минут в концентрированном растворе поваренной соли во избежание окрашивания полноценных зёрен. В свою очередь, окрашивание проводили в 0,5% растворе конгорота в течение 5 минут. По истечении указанного времени раствор красителя сливали, зерно несколько раз промывали проточной водой, после чего распределяли на марлевой ткани для подсушивания. Подсушенные зёрна рассматривали под лупой LED SCALE LOUPE с 15-кратным увеличением.

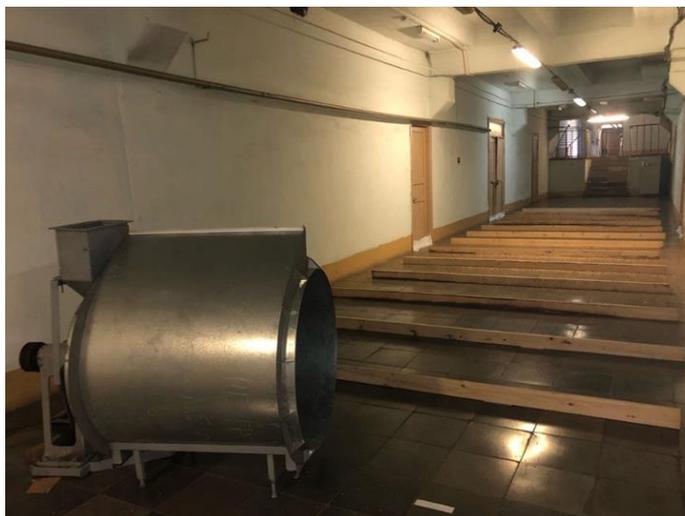


Рисунок 7 - Общий вид экспериментальной установки

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований по обоснованию основных параметров сепарирующего метателя зерна.

Проведенные исследования на экспериментальной установке показали высокую эффективность обработки зернового материала и подтвердились теоретические исследования, аналитически описывающие движение частиц в барабане устройства.

Проведены лабораторные исследования влияния основных параметров сепарирующего метателя зерна на дальность полёта частиц зернового материала. Для этого использовали пшеницу сорта Бурятская 79 влажностью 13%. Подача зернового материала – 2,7 кг/с.

Предварительными исследованиями установили, что при угле наклона выпускного патрубка барабана к горизонту 45°, дальность полёта частиц зернового материала наибольшая. А эффективность очистки зерна от различных примесей при удельной подаче зернового материала 2,7 кг/с наибольшая при частоте вращения лопастей сепарирующего метателя зерна 360 об/мин.

Последовательность выполнения экспериментальных исследований осуществлялась на основе метода планирования экспериментов при заданных функциях отклика и регулируемых

параметрах, а точность и адекватность результатов – на основе регрессионного анализа и статистической обработки результатов. В качестве критерия оптимизации была выбрана эффективность очистки зерна. С помощью метода априорного ранжирования были получены независимые факторы, влияющие на параметр оптимизации: X_1 – частота вращения кольцевого диска, X_2 – угол наклона выпускного патрубка и X_3 – удельная подача зернового материала. В результате проведенного многофакторного эксперимента получена математическая модель в виде уравнения регрессии второго порядка, которая позволяет получить оптимальный вариант сочетания факторов:

$$y = 83,94 + 6,59x_1 + 0,91x_2 + 0,89x_1x_2 - 0,79x_1x_3 - 3,58x_1^2 - 3,68x_2^2 - 4,61x_3^2, \quad (17)$$

Регрессионное уравнение результатов экспериментов (17) и их графическая интерпретация представлены на рисунках 8,9, 10.

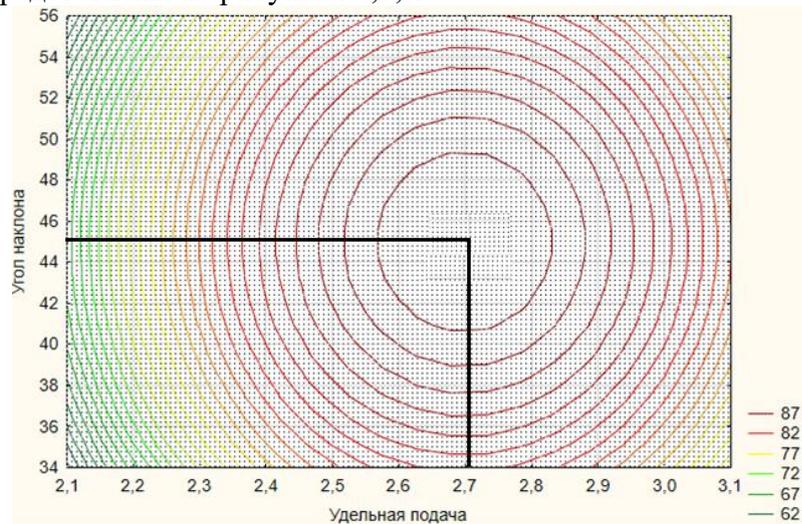


Рисунок 8 - Зависимость эффективности очистки зерна от угла наклона выпускного патрубка и удельной подачи зернового материала при постоянном числе оборотов вращения кольцевого диска

Из анализа графика (8) следует, что максимальная эффективность очистки зерна 91 % достигается при угле наклона выпускного патрубка 45° , удельной подаче зернового материала 2,7 кг/сек и числе оборотов вращения кольцевого диска 360 об/мин.

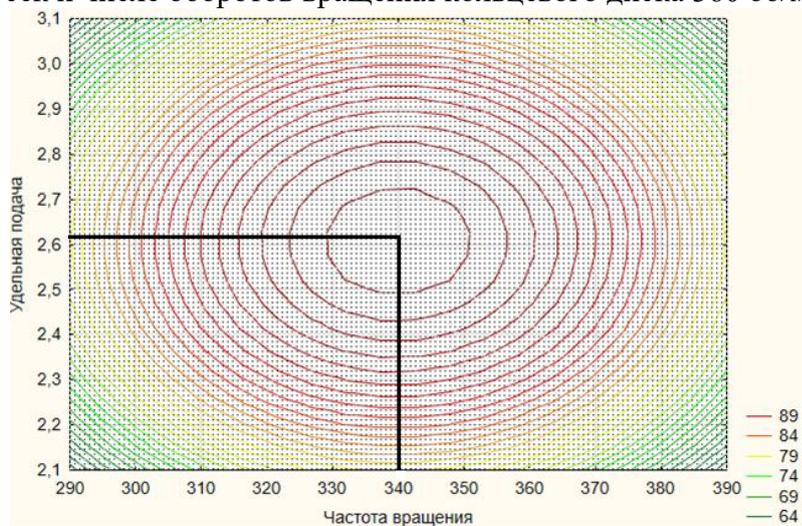


Рисунок 9 - Зависимость эффективности очистки зерна от частоты вращения кольцевого диска и удельной подачи зернового материала при постоянном угле наклона выпускного патрубка

Из анализа графика (9) следует, что максимальная эффективность очистки зерна 92 % достигается при удельной подаче зернового материала 2,62 кг/сек, частоте вращения кольцевого диска 340 об/мин и угле наклона выпускного патрубка 45°.

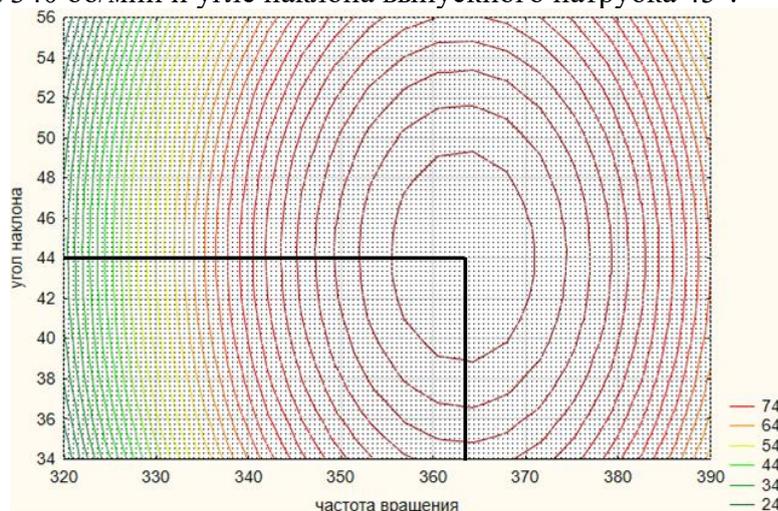


Рисунок 10 - Зависимость эффективности очистки зерна от частоты вращения кольцевого диска и угла наклона выпускного патрубка при постоянной удельной подаче

Из анализа графика (10) следует, что максимальная эффективность очистки зерна 90 % достигается при частоте вращения кольцевого диска 363 об/мин, угле наклона выпускного патрубка 44° и удельной подаче 2,7 кг/сек.

В результате анализа полученных данных следует, что оптимальными параметрами при очистке зернового материала сепарирующим метателем зерна являются: угол наклона выпускного патрубка 45 градусов, частота вращения кольцевого диска 360 об/мин, удельная подача зернового материала 2,7 кг/сек.

Для определения снижения влажности исходного зернового вороха после пропуска через сепарирующий метатель зерна были проведены экспериментальные исследования при разных скоростях движения лопасти сепарирующего метателя зерна. При скорости движения лопасти 14 м/с снижение влажности зернового вороха составляет 1,1-1,6%, что на 0,1-0,6 % соответственно больше, чем при использовании серийного метателя ЗМ-60.

Для определения повреждения зерна на сепарирующем метателе зерна были проведены эксперименты. Анализ экспериментальных исследований показал, что макроповреждение зерна составляет менее 0,37% при обработке сепарирующим метателем зерна, а это ниже, чем обработка зерна производственным зернометателем ЗМ-60. Как показали эксперименты, микротравмирование частиц зерна составляет не более 2% при частоте вращения лопастей сепарирующего метателя зерна 360 об/мин.

Гипотезу об адекватности представления результатов исследования полиномом второй степени при сопоставлении с результатами теоретических данных проверяем с помощью критерия Фишера.

Суть такой проверки состоит в сопоставлении данных (форм. 17) параметра оптимизации, предсказанные уравнением регрессии с подобными результатами экспериментальных измерений, проведенные в лабораторных условиях.

Проверка адекватности модели второго порядка по Критерию Фишера показала

$$F = S^2_{ад} : S^2_{воспр}$$

$S^2_{ад}$ – дисперсия адекватности математической модели;

$S^2_{воспр}$ – дисперсия воспроизводимости, характеризующая ошибку опыта.

$$S^2_{ад} = 7,21; S^2_{воспр} = 2,01; F_{эксп} = 7,21/2,01 = 3,6$$

Сравнивая расчетное значение критерия Фишера ($F_{эксп}$) с табличным ($F_{0,05} = 5,05$) при 5%-ном уровне значимости, можно сделать вывод об адекватности представления результатов эксперимента уравнением второго порядка.

Таким образом, при заданных значениях параметров экспериментального сепарирующего метателя зерна построены графики, которые подтверждают теоретические и экспериментальные исследования (рис. 11, 12). Сходимость результатов составляет 96%.

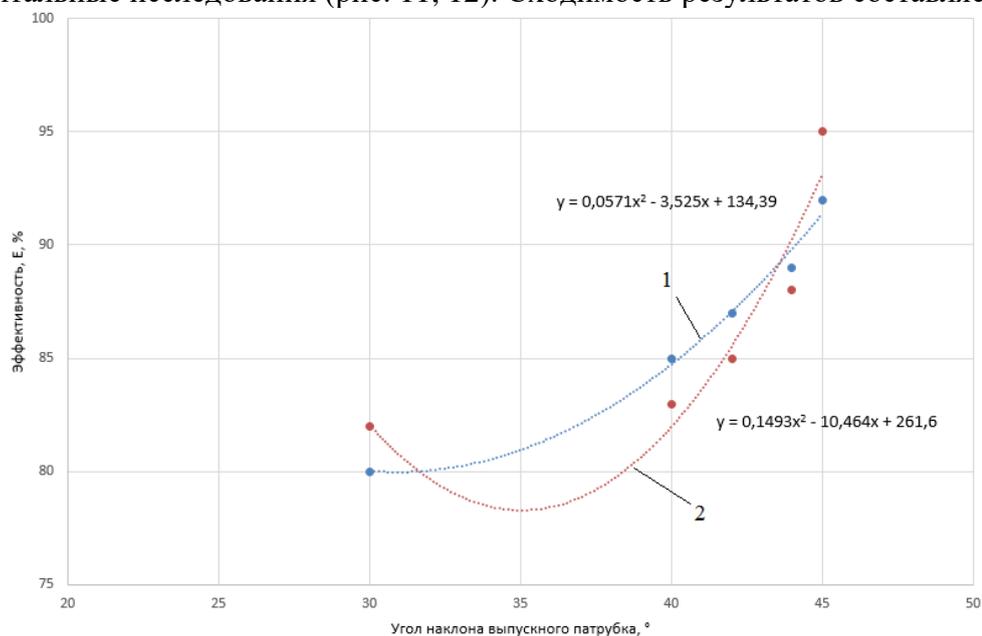


Рисунок 11 - Эффективность полноты выделения зернового материала от угла наклона выпускного патрубка:

1 – теоретическая; 2 – экспериментальная

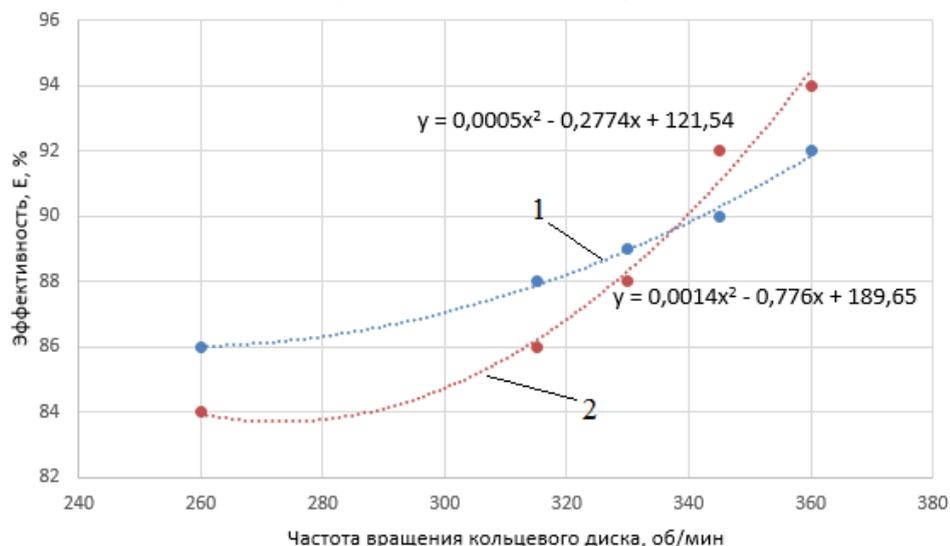


Рисунок 12 - Эффективность полноты выделения зернового материала от угла наклона выпускного патрубка:

1 – теоретическая; 2 – экспериментальная

В пятой главе представлена экономическая эффективность результатов исследований. Годовой экономический эффект от внедрения составит 59228 руб. на одну машину.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель перемещения частицы зернового материала по лопасти сепарирующего метателя зерна в виде дифференциального уравнения второго порядка, которое является линейным неоднородным с постоянными коэффициентами, отличающаяся тем, что учитывает угол наклона лопасти в обратную сторону вращения при определении расстояния от центра вращения барабана до зерна.

2. Разработана математическая модель сепарирующего метателя зерна, обеспечивающего эффективность выделения зерна с выявлением закономерностей взаимосвязи с комбинацией параметров со снижением повреждаемости. Экспериментально обоснованы основные параметры сепарирующего метателя зерна: частота вращения кольцевого диска – 360 об/мин, угол наклона выпускного патрубка – 45°, угол наклона лопасти в обратную сторону вращения 30-40°, удельная подача – 2,7 кг/сек. При этом можно выделить более 90 % основного зерна базисных кондиций.

3. Установлено снижение повреждаемости частиц зернового материала при установке на лопастях резиновых покрытий. Обоснован коэффициент k , зависящий от материала поверхности лопасти и кривизны поверхностей тел в точке контакта при установке на лопастях резиновых покрытий ($k_{рез}=3,35$). Анализ экспериментальных исследований сепарирующего метателя зерна показал, что макроповреждение зерна составляет менее 0,37% при обработке сепарирующим метателем зерна, а микротравмирование – не более 2%.

4. Ожидаемый экономический эффект от внедрения экспериментального сепарирующего метателя зерна составляет более 59 тыс. руб. на одну машину.

Рекомендации производству

Результаты проведенных исследований по обоснованию конструктивно-режимных параметров сепарирующего метателя зерна могут быть использованы конструкторскими и производственными организациями при разработке современных зерноочистительных машин.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных Scopus, WoS

1. S.S. Yampilov, Zh.B. Tsybenov, S.Zh. Gylykova, L.O. Onkhonova and N.I. Moshkin. Separating grain thrower for processing grain material. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. To cite this article: S S Yampilov et al 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 839 052053 doi:10.1088/1755-1315/839/5/052053 (Scopus)

2. S.S. Yampilov, Zh.B. Tsybenov, S.Zh. Gylykova, V.B. Baldanov and N.I. Moshkin. Grain Separating and Throwing Machine in inline Grain Processing ETESD-2022 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1112 (2022) 012071 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/1112/1/012071.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Цыбенков Ж.Б., Ямпиллов С.С., Балданов В.Б., Гылыкова С.Ж. Аналитическое описание движения зернового материала по очистительному устройству сепарирующего зернометателя. Вестник ВСГУТУ. №2. 2020. С. 31-35.

2. Цыбенков Ж.Б., Ямпиллов С.С., Балданов В.Б., Гылыкова С.Ж. Дифференциальное уравнение движения частицы зернового материала в сепарирующем зернометателе. Вестник ВСГУТУ. №2. 2022. С.56-61.

3. Ямпиллов С.С., Цыбенков Ж.Б., А.О., Пашинова И.В., Гылыкова С.Ж. Исследование процесса разделения зернового материала в сепарирующем зернометателе. Вестник ВСГУТУ. №2. 2023. С. 57-64.

4. Гылыкова С.Ж., Ямпиллов С.С., Цыбенков Ж.Б., Хандакова Г.Ж., Балданов В.Б., Жигжитов А.О. Влияние частоты вращения барабана сепарирующего зернометателя на эффективность очистки зерна. Вестник ВСГУТУ. №1. 2024. С. 83-89.

5. Цыбенков Ж.Б., Ямпиллов С.С., Гылыкова С.Ж., Шуханов С.Н., Кузьмин А.В.

Обоснование кинематических параметров сепарирующей зернометательной машины. Вестник БГСХА Вып.№1. 2024. С.140-148.

6. Ямпиров С.С., Цыбенков Ж.Б., Гылыкова С.Ж., Шуханов С.Н., Кузьмин А.В. Обоснование материала лопасти сепарирующего метателя зерна. Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2024. № 2. С. 205-210.

7. Цыбенков Ж.Б., Ямпиров С.С., Гылыкова С.Ж., Шуханов С.Н., Овчинникова Н.И. Теоретические исследования воздействия лопастей сепарирующей зернометающей машины на зерновой материал. Вестник НГИЭИ. 2024. № 6 (157). С. 30-41.

Публикации в других изданиях

1. Гылыкова С.Ж., Ямпиров С.С. Анализ конструкций зернометателей. Вестник научных конференций «Современное общество, образование и наука». Тамбов, 2020. № 8-2(60). С. 35-37.

2. Цыбенков Ж.Б., Ямпиров С.С., Балданов В.Б. Гылыкова С.Ж. Сепарирующий зернометатель с щелевидными рабочими органами. Материалы национальной научно-практической конференции «Образование и наука». Серия: Технологии и технические средства в АПК. Биомедицинская техника. Вып. 15. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2021. С.9-11.

3. Ямпиров С.С., Цыбенков Ж.Б., Гылыкова С.Ж. Анализ теоретических исследований процесса взаимодействия зерновки с лопаткой метателя зерна. Научный альманах. № 2-3 (112). 2024. С. 76-80.

4. Хандакова Г.Ж., Жигжитов А.О., Гылыкова С.Ж. Анализ современных технических средств по очистке зерна. В сборнике: Образование и наука. Материалы национальной научно-практической конференции, посвященной празднованию 50-летия начала строительства Байкало-Амурской магистрали и 100-летию Республики Бурятия. Улан-Удэ, 2024. С. 59-62.

Патенты

Пат. на полезную модель № 227398 РФ (51) МПК В07В 11/00 (2006.01) Метатель зерновых материалов. Ямпиров С.С., Цыбенков Ж.Б., Гылыкова С.Ж., Балданов В.Б., Хандакова Г.Ж. (RU) 2024116801/03(037699) Заявл. 19.06.2024. Оpubл. 18.07.2024.