

Копытин Игорь Иванович



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
СЕПАРАТОРА ПРОСЫПНОГО ТИПА ДЛЯ ОЧИСТКИ
СЫПУЧИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ
ОТ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ
(НА ПРИМЕРЕ МЯСОКОСТНОЙ МУКИ)**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и
электрооборудование в сельском хозяйстве

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

Троицк – 2021

Работа выполнена на кафедре электрификации и автоматизации сельского хозяйства федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Курганская государственная сельскохозяйственная академия имени Т.С. Мальцева»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Чарыков Виктор Иванович

Официальные оппоненты: **Коняев Андрей Юрьевич,**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электротехники и электротехнологических систем ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Угаров Геннадий Григорьевич,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Камышинского технологического института – филиала ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова»

Защита состоится 2 июля 2021 г., в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 220.066.02 на базе ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 75.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет».

Автореферат размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации <http://vak.minobrnauki.gov.ru> и на сайте ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ: <http://юургау.рф>.

Автореферат разослан «13» мая 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Запевалов
Михаил Вениаминович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие сельского хозяйства является главной задачей в обеспечении продовольственной безопасности страны. При этом важное место занимает переработка продуктов в кормоприготовлении, где требуются высокотехнологичные и надежные машины, оборудования.

В процессе приготовления кормов для животных особое внимание уделяется качеству производства. Требуется очистка комбикормов, мясокостной муки и других продуктов от различных примесей, в частности от металлических примесей, которые могут нанести травмы в пищеварительный тракт животных.

Металлические и металломагнитные примеси могут иметь различные размеры, формы и согласно ГОСТ 17536-82 мясокостная мука не должна содержать в себе более 200 мг/кг металлических примесей, а комбинированный корм – более 30 мг/кг. Для выполнения этих условий в производственных технологических линиях предусматриваются сепараторы для отделения ферромагнитных примесей (частиц) от готовой продукции.

Проведенные ранее исследования показали наличие ферромагнитных частиц и превышение допустимой нормы в готовой мясокостной муке. В связи с этим требуется совершенствовать сепарацию мясокостной муки.

На практике наиболее широкое применение находят электромагнитные сепараторы просыпного типа. Для повышения производительности и качества сепарации мясокостной муки требуется совершенствование самой электромагнитной системы в сепараторах просыпного типа.

Степень разработанности темы. На основании фундаментальных трудов по теории магнитных и электрических методов обогащения сыпучих материалов В.В. Кармазина, В.И. Кармазина, В.Ф. Сумцова и др. разработаны теоретические положения, обеспечивающие повышение эффективности очистки сыпучих сельскохозяйственных продуктов в электромагнитном поле.

Научно-технические решения проблемы разработки сепараторов сыпучих продуктов сельскохозяйственного назначения рассмотрены в работах В.С. Зуева, Т.А. Егорова, А.Я. Соколова, А.Б. Демского, В. В. Гортинского, В.И. Чарыкова, С.А. Соколова и др.

Анализ использования электромагнитных сепараторов для очистки сыпучих сельскохозяйственных продуктов наряду перерабатывающих предприятия показал невысокое качество очистки таких продуктов, как зерно и мука, от ферромагнитных частиц. Для сепарации мясокостной муки требуется высокопроизводительные сепараторы, учитывающие ее особенности.

Таким образом, для очистки продуктов от ферромагнитных включений с высокой производительностью требуется совершенствование электромагнитной системы сепаратора для создания более неоднородного магнитного поля в его рабочей зоне. При этом в сепараторах просыпного типа для роста производительности очистки необходимо обеспечить снижение энергопотребления в процессе очистки мясокостной муки.

Недостаточные исследования электромагнитной системы для создания более неоднородного магнитного поля в зоне очистки сепаратора сдерживает развитие существующих электромагнитных сепараторов просыпного типа. Также важно снижение энергопотребления в процессе очистки мясокостной муки, что является важной и актуальной задачей при совершенствовании электромагнитной системы сепараторов просыпного типа.

Работа выполнена в соответствии с Концепцией развития сельскохозяйственной техники России. Тематика работы отвечает стратегии развития пищевой и перерабатывающей промышленности РФ.

Цель работы: повышение эффективности процесса очистки сыпучих сельскохозяйственных продуктов от ферромагнитных частиц на примере мясокостной муки путем совершенствования электромагнитной системы сепаратора просыпного типа.

Задачи исследования:

1. Провести анализ существующих способов и соответствующих технических средств для очистки сыпучих продуктов сельскохозяйственного производства от ферромагнитных частиц.

2. Определить основные показатели процесса очистки сыпучих сельскохозяйственных продуктов от ферромагнитных частиц в неоднородном электромагнитном поле и установить взаимосвязи между конструктивными и режимными параметрами сепаратора просыпного действия.

3. Исследовать на модели сепаратора основные конструктивные и режимные параметры предлагаемой электромагнитной системы и установить ее оптимальные параметры.

4. Разработать электромагнитный сепаратор просыпного типа и провести экспериментальные исследования по очистке мясокостной муки от ферромагнитных частиц в производственных условиях и оценить его эффективность.

Объект исследования: процесс очистки сыпучих продуктов сельскохозяйственного производства от ферромагнитных частиц в электромагнитном поле.

Предмет исследования: установление взаимосвязи конструктивных и режимных параметров электромагнитной системы с условиями и степенью очистки сыпучих продуктов от ферромагнитных частиц в рабочей зоне сепаратора.

Научная новизна:

1. Разработаны математические модели, описывающие процессы перемещения ферромагнитных частиц в составе продукта (мясокостной муки) в рабочей зоне электромагнитного сепаратора просыпного типа.

2. Установлены зависимости времени отделения ферромагнитных частиц из продукта (мясокостной муки) от основных характеристик электромагнитной системы, магнитной индукции и неоднородности магнитного поля и их взаимосвязь с конструктивным параметром рабочей зоны.

3. Впервые установлены зависимости степени очистки продукта от конструктивных и режимных параметров предложенной электромагнитной систе-

мы, позволившие установить форму и оптимальные величины магнитного концентратора, а также основные характеристики создаваемого магнитного поля: индукцию и его неоднородность.

4. Предложен метод обеспечения качества очистки сыпучих сельскохозяйственных продуктов от ферромагнитных частиц в рабочей зоне электромагнитного сепаратора просыпного типа.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы.

Для обеспечения требуемого качества очистки сыпучих сельскохозяйственных продуктов от ферромагнитных частиц:

- установлена зависимость степени очистки сепарируемого продукта от основных характеристик магнитного поля и параметров магнитного концентратора предлагаемой электромагнитной системы;

- на основе установленной взаимосвязи конструктивных параметров рабочей зоны и режимных параметров электромагнитной системы разработана номограмма для определения требуемых показателей магнитного поля или конструктивных параметров зоны сепарации;

- предложена специальная электромагнитная система, выполненная на основе скважинных магнитных концентраторов с оптимальными параметрами, создающая более неоднородное магнитное поле с высокой индукцией;

- разработан сепаратор просыпного типа с усовершенствованной электромагнитной системой и зоной сепарации, новизна которого защищена Патентами РФ № 2516608 и № 20147153;

- разработаны рекомендации по использованию электромагнитных сепараторов в технологических процессах АПК.

Результаты исследований используются в учебном процессе Курганской государственной сельскохозяйственной академии при изучении курсов «Электрооборудование и электропривод в сельскохозяйственном производстве», «Электрификация сельскохозяйственного производства».

Разработанная установка УСС-5М2 для очистки сыпучих продуктов позволяет обрабатывать мясокостную муку с производительностью 5 т/ч. Технология изготовления и монтажа установки передана ветсанутильзаводу Курганской области.

Методология и методы исследования. В процессе выполнения работы осуществлялся системный подход к исследованию, включающий критический анализ научно-технической литературы и патентные исследования, теоретические исследования и физическое моделирование процесса очистки сыпучих продуктов, а также промышленное опробование и внедрение. Изучение и обобщение научной задачи произведено на базе теории сепарации сыпучих веществ, теории расчета электрических и магнитных цепей, методов расчета магнитных полей и математического моделирования, математической статистики, методик оптимизации параметров скважинных концентраторов магнитного поля и физико-математического анализа.

Исследование технологического процесса очистки сыпучих продуктов также осуществлялось с применением общетеоретических положений приклад-

ной математики и физики твердых тел, апробированных методов анализа задач и синтеза решений, применяемых для формирования структуры и параметров новых объектов, создаваемых на уровне изобретений или описываемых в научно-технических публикациях, имеющих приоритет выхода в свет.

Положения, выносимые на защиту

- 1 Математические модели движения ферромагнитной частицы в составе мясокостной муки в зоне очистки продукта.
- 2 Номограмма, связывающая режимные характеристики магнитного поля с конструктивными параметрами рабочей зоны сепаратора.
- 3 Электромагнитная система с магнитным концентратором скважинного типа, овальной формы, установленным под заданный угол наклона в зоне сепарации продукта.
- 4 Зависимости степени очистки продукта от конструктивных и режимных параметров электромагнитной системы по данным эксперимента на модели и результаты экспериментальных исследований.
- 5 Оценка неоднородности магнитного поля, создаваемой электромагнитной системой, и эффективности процесса очистки за счет энергосбережения.

Степень достоверности и апробация работы. Степень достоверности подтверждается использованием основных положений в теории магнитного поля, удовлетворительной сходимостью результатов, полученных в ходе теоретических и экспериментальных исследований.

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на ежегодных на международных научно-технических конференциях: ЧГАА–ЮУрГАУ (г. Челябинск, 2009-2017 гг.) и КГСХА (г. Курган, 2008-2014 гг.); «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве» (г. Москва, ВИЭСХ, 2012 г.), «Современная наука – агропромышленному производству» (г. Тюмень, 2014 г.), «Актуальные проблемы современной науки и практики» (УрГУПС, Курган, 2011-2015 гг.), «Технические науки: теоретический и практический взгляд», (г. Уфа, 2014 г.), «Транспорт: проблемы и перспективы» (г. Курган, 2017г.), «Научное обеспечение инновационного развития агропромышленного комплекса регионов РФ» (г. Курган, 2018-2019 гг.); на Всероссийских (национальной) научно-практических конференциях: «Приоритетные направления развития энергетики в АПК» (г. Курган, 2018 г.), «Техническое обеспечение технологий производства сельскохозяйственной продукции» (г. Курган, 2018 г.), «Приоритетные направления регионального развития» (г. Курган, 2020 г.); на научно-практических конференциях: «Энергетика в современном мире» (г. Чита, ЗабГУ, 2011 г.), «Инновационные технологии и электрооборудование предприятиям АПК» (г. Ижевск, 2012 г.), «Актуальные проблемы энергетики АПК» (г. Саратов, 2012 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 37 работ, отражающих основное ее содержание и новизну теоретических решений, в том числе 7 – в изданиях, рекомендованных ВАК, четыре патента РФ на полезную модель и на изобретение, 2 монографии.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа содержит 168 страниц основного текста, 56 рисунков, 16 таблиц и состоит из введения,

четырёх глав, заключения и приложений; список использованной литературы насчитывает 159 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, указаны степень разработанности темы, цель, задачи, объект, предмет, научная новизна и практическая ценность исследования, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, степень достоверности и апробация результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту, и общая характеристика работы.

В первой главе «**Состояние вопроса и задачи исследования**» приведена общая характеристика проблемы, выбрано направление исследований, мотивирована своевременность повышения степени очистки сыпучих продуктов агропромышленного производства от металлических включений и определены задачи исследования.

Спецификой качества продукта в агропромышленном комплексе является зависимость его характеристик от окружающей среды, методов производства, заготовки, переработки и хранения. Анализ известных работ показал, что вопрос очистки сыпучих сельскохозяйственных продуктов на сегодняшний день не потерял своей актуальности. В силу своей простоты конструкции, надёжности работы наибольшее распространение получили сепараторы просыпного типа, которые используются для предварительной очистки от ферромагнитных частиц, из-за низкой степени очистки продукта.

На основе анализа работы сепараторов просыпного типа и конструктивных схем была сформулирована рабочая гипотеза, которая основывается на возможности повышения степени очистки сыпучих сельскохозяйственных продуктов путем создания более неоднородного магнитного поля с высокой индукцией за счет магнитных концентраторов специальной конструкции.

На основе систематизации известных ранее проведенных исследований определены задачи исследования для достижения поставленной цели работы.

Во второй главе «**Теоретические исследования процесса сепарации сыпучих сельскохозяйственных продуктов в рабочей зоне**» приведены особенности и принципы электромагнитной очистки продуктов от ферромагнитных частиц, исследованы сам процесс очистки продукта и влияние основных характеристик магнитного поля на него.

Принципы системного анализа предполагают рассмотрение электромагнитного сепаратора как технической системы, структурно состоящей из нескольких элементов. При этом важной является рабочая зона, где происходит сама сепарация очищаемого продукта от ферромагнитных частиц.

В рабочей зоне в процессе сепарации действуют силы, показанные на рисунке 1. По оси ОУ действуют сила тяжести mg и аэродинамическая сила сопротивления движению воздушной среды F_{cy} , а вдоль оси ОХ действуют магнитная сила F_{mx} и сила сопротивления движению частицы в смеси F_{cx} .

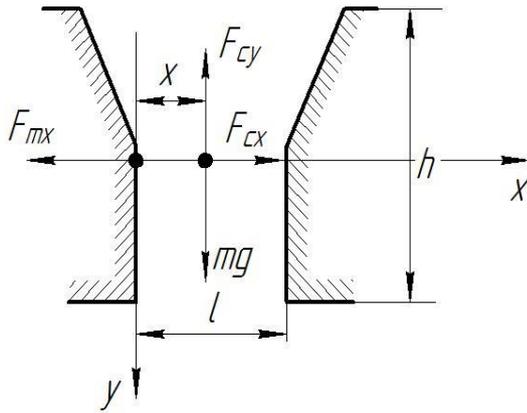


Рисунок 1 – Принципиальная схема силового взаимодействия в просыпном электромагнитном сепараторе

Уравнение движения ферромагнитного тела в магнитном поле

$$\vec{F}_M + \vec{F}_c = m\vec{a} + m\vec{g},$$

где m – масса тела, кг; a – ускорение частицы, м/с²; g – ускорение свободного падения, м/с².

На ферромагнитную частицу оказывает влияние магнитная сила

$$F_m = -\frac{V_r}{2\mu_0\mu} \cdot gradB^2, \quad (2.1)$$

где V_r – параметры частицы, м³; μ_0, μ – магнитная проницаемость вакуума и среды, Гн/м; B – индукция магнитного поля, Тл; $gradB$ – скорость изменения магнитной индукции.

Принимая во внимание, что силовая характеристика магнитного поля в рабочей зоне сепаратора изменяется по закону экспоненты, имеем:

$$B = B_{max} e^{-\frac{d_i}{d_n}}, \quad (2.2)$$

где B_{max} – максимальное значение магнитной индукции, Тл; d_i – расстояние от точки измерения до полюса, м; d_n – показатель неоднородности магнитного поля, м.

При исследовании электромагнитной системы важным является создание более неоднородного магнитного поля и его оценка. Приведенный показатель d_n позволяет оценить градиент магнитной индукции на заданном расстоянии от полюса d_i . Показатель d_n выражает расстояние, при котором магнитная индукция изменяется в e раз. При этом, чем меньше значение d_n , тем более неоднородным становится магнитное поле, что важно для сепарации ферромагнитных частиц.

После несложных преобразований магнитная сила, действующая на металломагнитную частицу в рабочей зоне, определяется как

$$F_m = -\frac{V}{2 \cdot \mu \cdot \mu_0} \frac{d}{dx} \left[B_{max} e^{-\frac{x}{d_n}} \right]^2 = \frac{V}{\mu\mu_0 d_n} B_{max}^2 e^{-\frac{2x}{d_n}}. \quad (2.3)$$

Сила сопротивления F_c зависит от свойств очищаемого продукта: плотности, влажности, сыпучести, предрасположенности к флотации и др. С учетом этих факторов сила сопротивления среды

$$F_c = K_1 K_2 K_3 K_v \rho S v, \quad (2.4)$$

где F_c – сила сопротивления, Н; v – скорость частицы, м/с; ρ – плотность среды, кг/м³; S – площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению движения, м²; K_v – показатель сопротивления движению частицы, м/с.

В нормальных условиях, когда влажность сыпучей смеси не превышает 15 %, коэффициенты $K_1=1$, $K_2=1$. Коэффициент K_3 зависит от вида продукта, для мясокостной муки – чуть больше единицы.

Анализ взаимодействия сил показывает, что ферромагнитная частица по оси ОУ может преодолеть расстояние $y = h$ за время t_1 , а по оси ОХ – расстояние $x = l/2$ за время t_2 и притянется к полюсу. При этом необходимо создать условие, чтобы $t_2 < t_1$. В этом случае время t_2 представляется как косвенный показатель условий очистки продукта, что необходимо при исследовании и проектировании сепаратора.

Для установления зависимости времени t_2 от основных характеристик электромагнитной системы составим дифференциальное уравнение движения частицы по оси ОХ

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{V}{\mu \mu_0 d_n} B_{max}^2 e^{-\frac{2x}{d_n}} - K_3 K_v \rho S v. \quad (2.5)$$

После разложения функции $e^{-\frac{x}{d_n}}$ в ряд по степеням x и ограничиваясь в разложениях двумя первыми членами, получим:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{K_3 K_v \rho S}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{V \cdot B_{max}^2}{m \cdot \mu \mu_0 d_n^2} 2x = \frac{V \cdot B_{max}^2}{m \cdot \mu \mu_0 d_n}. \quad (2.6)$$

Решение линейного дифференциального уравнения второго порядка с правой частью позволило установить зависимость времени притяжения частицы к полюсу сепаратора:

$$t_2 = -\frac{1}{(b-r)} \ln \left[\frac{\left(x - \frac{d_n}{2}\right)}{(b+r)d_m + v_0} 2r \right], \quad (2.7)$$

где d_m – максимальное расстояние частицы от полюса, м; v_0 – начальная скорость частицы в просыпном материале, м/с, b и r – показатели процесса очистки, являющиеся коэффициентами уравнения 2.6:

$$b = \frac{K_3 K_v \rho S}{2m}; \quad c^2 = \frac{2 \cdot V \cdot B_{max}^2}{m \cdot \mu \mu_0 d_n^2}; \quad r = \sqrt{b^2 - c^2}. \quad (2.8)$$

На рисунке 2 приведены зависимости времени притяжения ферромагнитной частицы от основных характеристик магнитного поля.

Анализ зависимостей показывает, что время притяжения металлической частицы t_2 уменьшается, когда магнитное поле становится более неоднородным ($dn \ll d_m$) и ее индукция B_{max} растет. Так, при повышении B_{max} с 100 до 200 мТл время притяжения сокращается почти в четыре раза. Создание более неоднородного магнитного поля приводит к более заметному снижению времени t_2 .

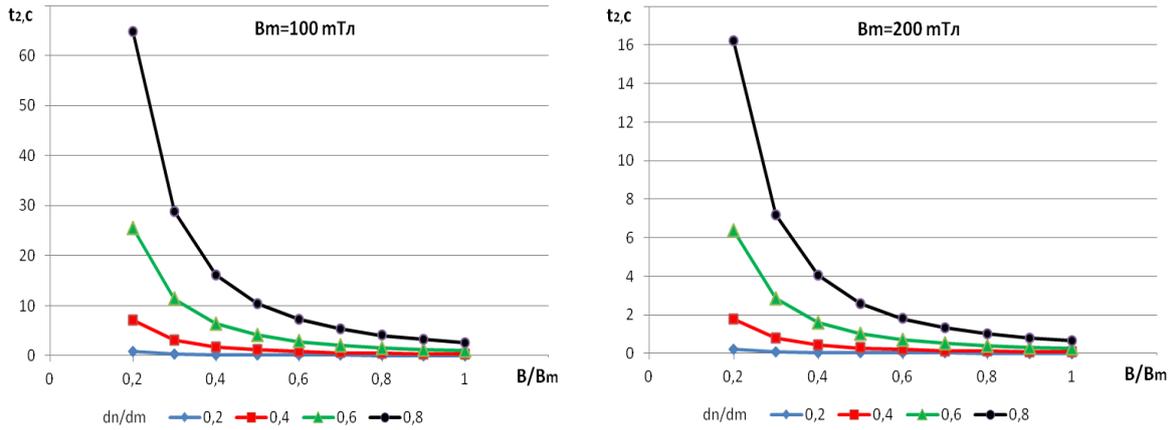


Рисунок 2 – Изменение времени притяжения ферромагнитной частицы в зоне сепарации при различных значениях B_m и соотношениях d_n/d_m – неоднородности магнитного поля к максимальному расстоянию частицы от полюса

Снижение времени притяжения частицы потребует дополнительных затрат и зависит от t_1 времени нахождения ее в зоне сепарации, которая в свою очередь зависит от высоты рабочей зоны. Для установления зависимости времени t_1 от высоты рабочей зоны составим дифференциальное уравнение движения частицы по оси ОУ

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = mg - F_{cy}, \quad (2.9)$$

если аэродинамическая сила сопротивления движению частицы:

$$F_{cy} = \frac{1}{2} C_y S \rho v_y^2, \quad (2.10)$$

где C_y – безразмерный коэффициент сопротивления, определяемый обычно экспериментально и зависящий от формы ферромагнитной частицы и оттого, как она ориентирована при движении; S – площадь проекции частицы на плоскость перпендикулярную направлению движения, m^2 ; ρ – плотность воздушной среды, $кг/м^3$, v_y – скорость движения ферромагнитной частицы, $м/с$.

Решение дифференциального уравнения имеет вид:

$$y = \frac{n^2}{2g} \ln \frac{\left(e^{\frac{2g_t}{n}} + 1 \right)^2}{4e^{\frac{2g_t}{n}}}, \quad \text{если } n^2 = \frac{2mg}{C_y \rho S}. \quad (2.11)$$

После преобразования несложно определить время t_1 .

$$t_1 = \frac{n}{2g} \ln \left[\left(2e^{2gy/n^2} - 1 \right) + \sqrt{2e^{2gy/n^2} (2e^2 - 1)} \right]. \quad (2.12)$$

Результаты исследования времени t_1 приведены на рисунке 3.

Анализ данных показывает, что с ростом высоты рабочей зоны время нахождения металлической частицы также растет, но медленнее. Так, при уве-

личении расстояния в три раза с 0,2 м до 0,6 м время нахождения частицы растёт в два раза – с 0,2 с до 0,4 с. Угол наклона прямой составляет около 25° .

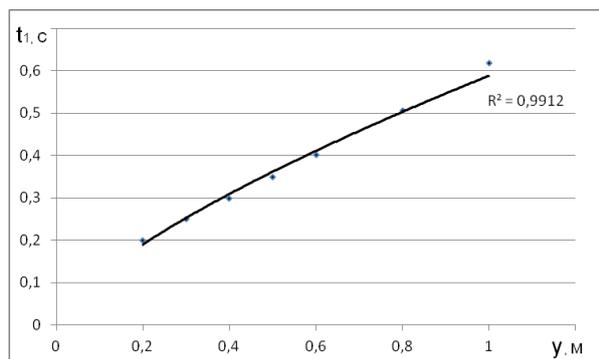


Рисунок 3 – Время нахождения ферромагнитной частицы в рабочей зоне сепаратора в зависимости от ее высоты

Результаты исследования движения ферромагнитных частиц в вертикальной и горизонтальной плоскости позволили установить взаимосвязь режимных параметров электромагнитной системы с конструктивным параметром рабочей зоны. Установленная взаимосвязь конструктивных и режимных параметров дала возможность разработать номограмму (рисунок 4).

Она позволяет определить параметры электромагнитной системы, если задан путь прохождения ферромагнитной частицы при просыпании продукта в рабочую зону сепаратора. Так, на заданной высоте рабочей зоны 0,5 м ферромагнитная частица может находиться 0,35 с (штриховая линия).

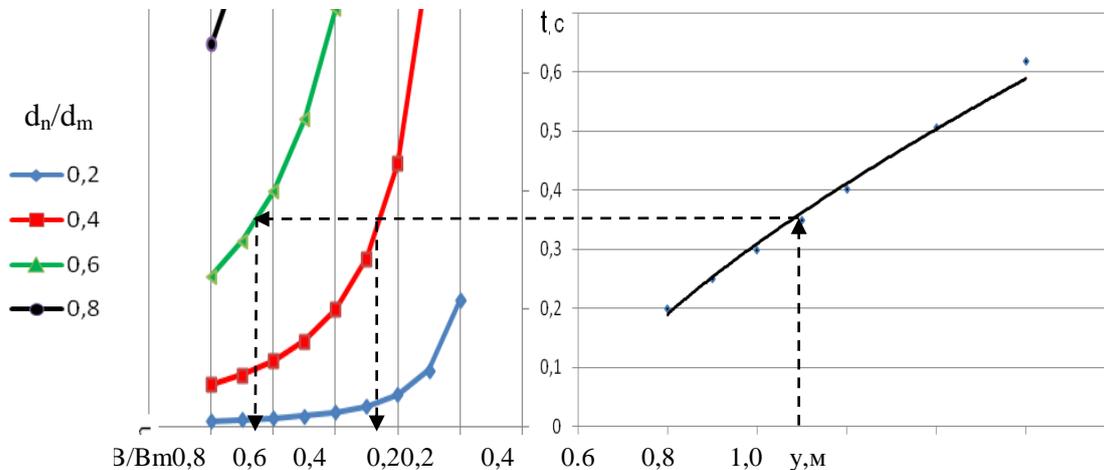


Рисунок 4 – Номограмма определения параметров магнитной системы по заданному конструктивному параметру рабочей зоны

Тогда для удаления частицы за допустимое время необходима магнитная индукция относительно максимального значения 0,83 при параметре неоднородности магнитного поля $d_n/d_m = 0,6$, например при $d_m = 1$ м, $d_n = 0,6$ м (штриховая линия). При более неоднородном магнитном поле, например $d_n/d_m = 0,4$, требуется магнитная индукция меньшего значения – относительная величина около 0,5.

Номограмма позволяет решить и обратную задачу: если известны параметры существующей электромагнитной системы, можно определить кон-

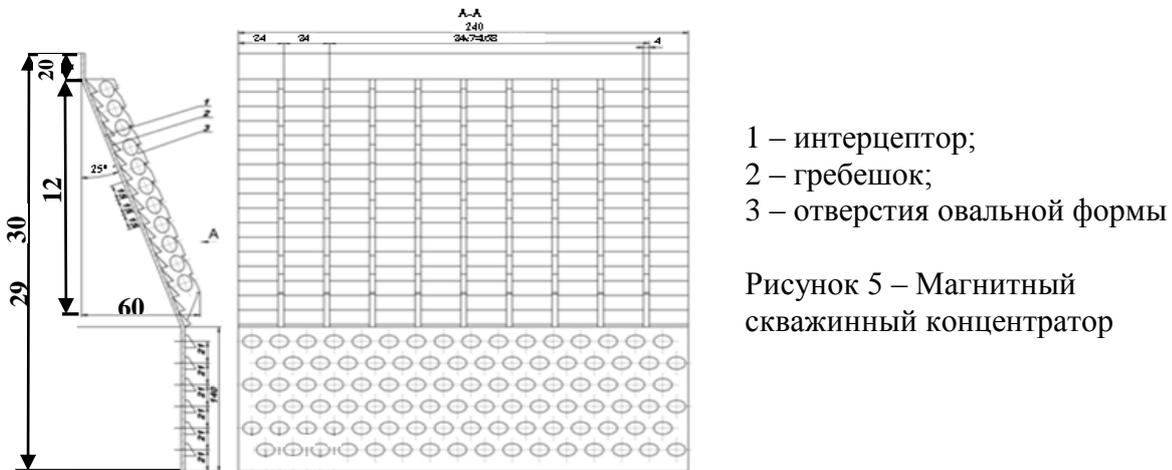
структивные параметры сепаратора, т.е. высоту рабочей зоны, а по ней и другие параметры сепаратора.

Таким образом, установлена связь исследуемых параметров сепарации, которая обеспечила получение номограммы, дающую возможность по заданному конструктивному параметру сепаратора определить его режимные показатели и параметры электромагнитной системы, обеспечивающие необходимый режим сепарации и требуемую степень очистки продукта от ферромагнитных частиц. Данная номограмма позволяет разработать или совершенствовать существующие электромагнитные системы.

В третьей главе «**Исследование и разработка электромагнитной системы с концентраторами для сепаратора просыпного типа**» представлена разработанная электромагнитная система с магнитным концентратором и результаты исследования ее параметров и основных характеристик.

Для повышения эффективности очистки продуктов от ферромагнитных примесей важно создать более неоднородное магнитное с высокой индукцией. Для этого запланировано совершенствовать существующую электромагнитную систему в сепараторе просыпного типа путем размещения магнитного концентратора в зоне сепарации.

Предлагается электромагнитный концентратор скважинного типа, представляющий собой полюсные наконечники с «дырочными» концентраторами (концентраторы с отверстиями). На рисунке 5 приведен предлагаемый концентратор с отверстием овальной формы.

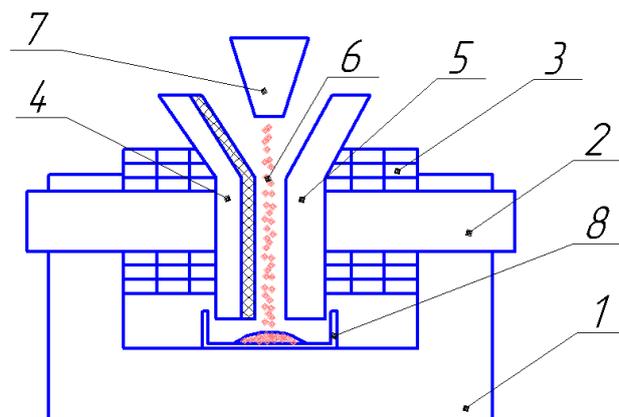


Для магнитного концентратора важно было определить его конструктивные и режимные параметры и характеристики создаваемого магнитного поля. При этом предлагается расположить скважинный магнитоконцентратор наклонно, чтобы сократить путь прохождения частицы до полюса и, соответственно, время притяжения ее в нижней части рабочей зоны. Согласно рисунку 3 угол наклона магнитного концентратора должен быть в пределах 25° относительно вертикальной плоскости.

Эксперимент проводился в соответствии с требованиями ГОСТа 17681-82.

Для определения параметров электромагнитной системы проводились исследования на модели (рисунок 6) с использованием лабораторного электро-

магнита ФЛ-1. Модель магнитной системы имела набор сменных полюсных наконечников, магнитоконцентраторов, моделирующих профиль рабочей зоны разрабатываемого сепаратора.



- 1 – станина;
- 2 – сердечник;
- 3 – катушка намагничивания;
- 4, 5 – концентраторы;
- 6 – рабочая зона очистки;
- 7 – загрузочное устройство;
- 8 – сборник чистой продукции

Рисунок 6 – Схема модели электромагнитного сепаратора просыпного типа

Для исследования параметров электромагнитной системы разработана методика эксперимента на модели с необходимым приборным обеспечением. Результаты оценивались разработанной методикой оценки степени очистки продукта от ферромагнитных примесей.

В ходе исследования установлено распределение магнитной индукции в скважинном концентраторе. На рисунке 7 приведены результаты распределения магнитной индукции по длине окружности скважины-овала, а на рисунке 8 представлена зависимость рационального размера перешейка между скважинами от длины концентрирующей окружности.

Анализ результатов исследования показывает, что при разных длинах окружности отверстий магнитоконцентраторов величина магнитной индукции B достигает максимального значения при $\ell_k=72$ мм. При этом с увеличением длины концентрирующей окружности промежутков между отверстиями также увеличивается, и при длине промежутка t_n более 10 мм он остается неизменным.

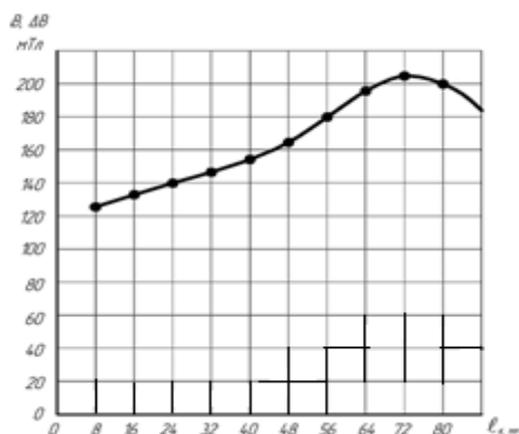


Рисунок 7 – Зависимость B от длины концентрирующей окружности

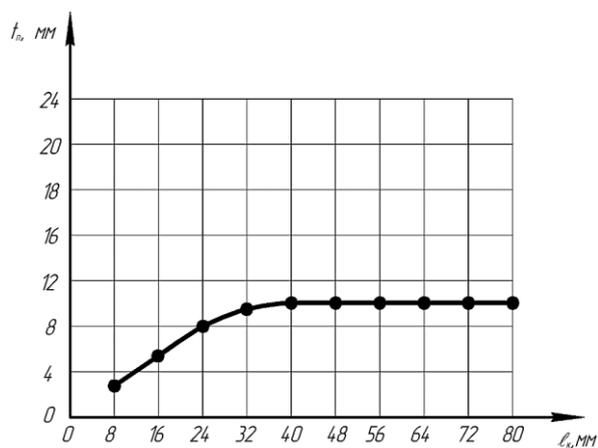


Рисунок 8 – Зависимость длины перешейка между отверстиями от длины их окружности

В ходе дальнейшего исследования следовало установить влияние параметров предлагаемого магнитоконцентратора на степень очистки продукта. По полученным данным проводились исследования методом активного планирования эксперимента с заданным уровнем факторов.

Согласно матрице планирования получена математическая модель, характеризующая зависимость степени очистки (y) от факторов: величина магнитной индукции (кодируется как x_1), длина окружности отверстий (x_2) и расстояние между отверстиями (x_3)

$$y = 0,963 + 0,028x_1 + 0,021x_2 + 0,094x_3 + 0,015x_1x_2 + 0,04x_1x_3 + 0,018x_2x_3 - 0,096x_1^2 - 0,089x_2^2 - 0,094x_3^2. \quad (2.13)$$

Адекватность модели оценивалась с помощью F-критерия Фишера. Поверхности отклика приведены на рисунках 9-11.

Анализ данных показывает, что степень очистки продуктов максимальна при магнитной индукции 180 мТл, длине окружности, равной 72мм, и расстоянии между отверстиями 10мм.

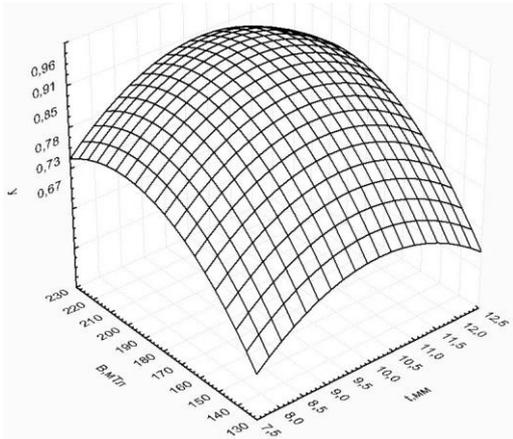


Рисунок 9 – Зависимость степени очистки от расстояния между отверстиями и магнитной индукции

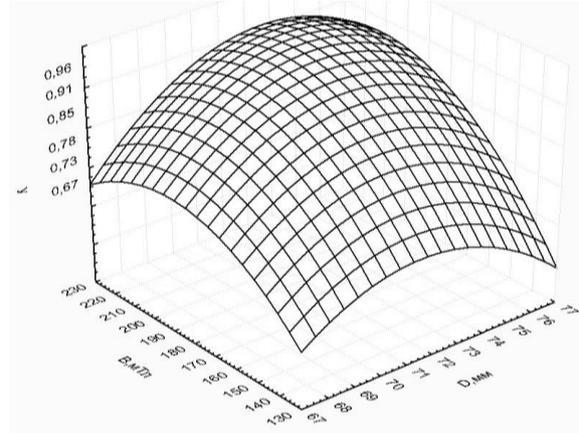


Рисунок 10 – Зависимость степени очистки от величины магнитной индукции и длины окружности отверстия концентратора

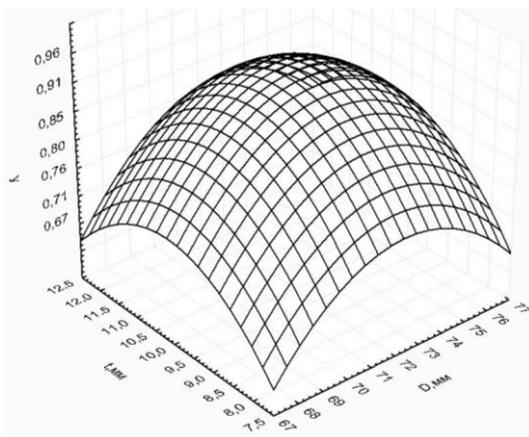
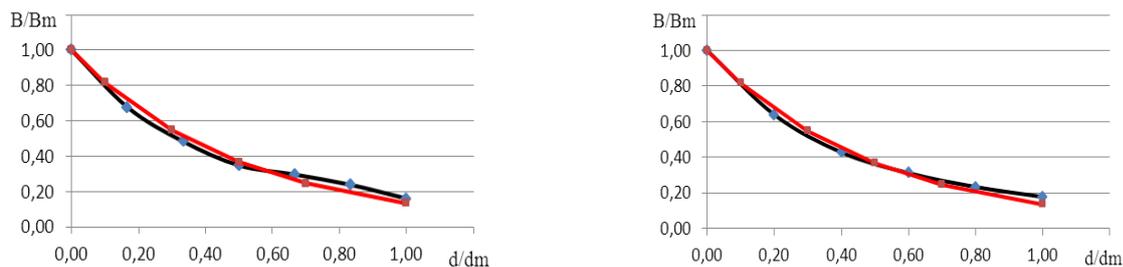


Рисунок 11 – Зависимость значения степени очистки от расстояния между отверстиями и длины окружности отверстия концентратора

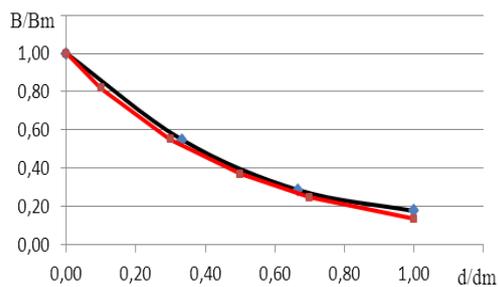
Результаты исследования показали, что магнитный концентратор создает неоднородное магнитное поле с параметром в относительных единицах

$d_n / d_m = 0,5$. Полученные экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с теоретическими данными (рисунок 12).



а) $h_1 = 0,28$ м

б) $h_2 = 0,24$ м



— опытные данные;
— теоретические данные

Рисунок 12 – Распределение магнитной индукции на различной высоте в зоне сепарации в относительных единицах

в) $h_3 = 0,152$ м

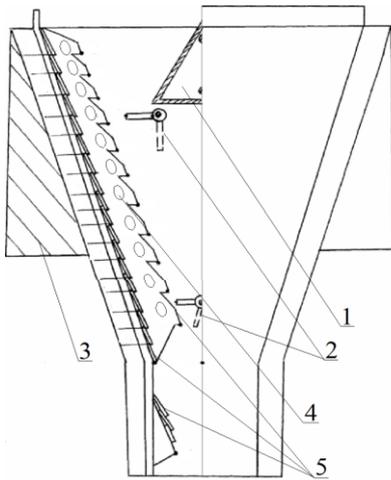
Произведена проверка косвенного метода оценки очистки продукта путем сравнения расчетных t_1 и t_2 . Так, на высоте $h_1 = 0,28$ м время нахождения частицы в зоне сепарации $t_1 = 0,19$ с, а время ее притяжения к концентратору – $t_2 = 0,11$ с, она успевает притянуться к полюсу, и обеспечивается ее удаление.

В четвертой главе «Разработка и экспериментальные исследования электромагнитного сепаратора просыпного типа» приведены разработанный электромагнитный сепаратор и результаты исследования электромагнитной системы сепаратора просыпного типа.

Электромагнитный сепаратор просыпного типа УСС-5М2 включает в себя рабочий орган с магнитоконцентраторами, установленный между полюсами электромагнитной системы. Верхняя часть сепаратора имеет форму перевернутой трапеции, а нижняя часть имеет постоянные размеры. Питатель и разделитель потока расположены над просыпной зоной.

В сепараторе имеется клиновидный разделитель продукта очистки. Просыпная зона образуется полюсными наконечниками – конусный продуктопровод, симметричный относительно оси ординат, переходящий в нижней части в продуктопровод постоянного сечения. Рабочая зона разрабатываемого сепаратора показана на рисунке 13. Скважинный концентратор расположен под углом 25° .

Масса сыпучего продукта, проходя по клиновидному разделителю, поступает в обе зоны сепаратора и попадает под непосредственное воздействие магнитоконцентраторов. Выполнение симметричного конусного продуктопровода в рабочей зоне обеспечивает высокую степень очистки при производительности установки до 5000 кг/ч и надежную длительную работу сепаратора.

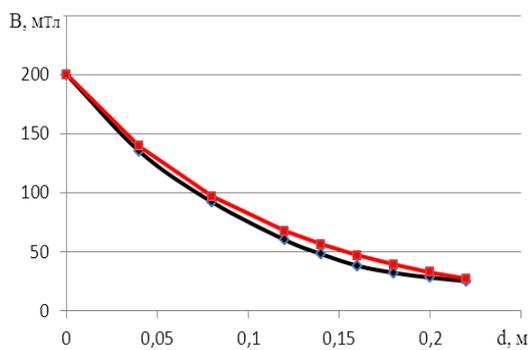


- 1 – рассекатель;
- 2 – полиградиентный элемент;
- 3 – магнитопровод;
- 4 – скважинный концентратор;
- 5 – гребенчатые концентраторы

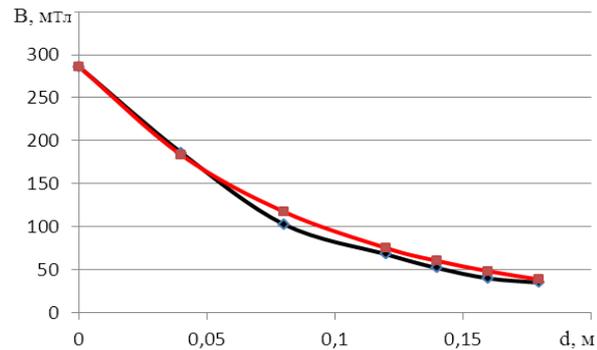
Рисунок 13 – Электромагнитная система в рабочей зоне электромагнитного сепаратора просыпного типа

В ходе совершенствования электромагнитной системы рассматривались различные схемы включения катушек намагничивания. При этом исследовались распределение магнитной индукции в различных точках зоны сепарации при однофазном и трехфазном выпрямлении с двумя и тремя катушками, а также условия нагрева самой катушки. По результатам выбрана схема трехфазного выпрямителя с нулевой точкой и двумя катушками намагничивания.

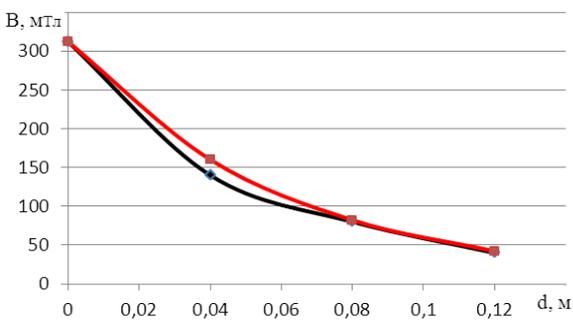
Сравнительные данные распределения магнитной индукции в зоне сепарации на разных высотах приведены на рисунке 14. При этом неоднородность магнитного поля с параметром $d_w/d_m = 0,5$ соответствовала ранее проведенным исследованиям на модели сепаратора.



а) $h_1 = 0,37$ м



б) $h_2 = 0,23$ м



в) $h_3 = 0,09$

— опытные данные;
— теоретические данные

Рисунок 14 – Теоретические и экспериментальные данные распределения магнитной индукции в зоне сепарации и на разной высоте

Сравнительный анализ теоретических и опытных данных показывает на незначительные расхождения, не превышающие 10 %. Полученные данные

подтверждают сходимость теоретических и экспериментальных показателей неоднородности магнитного поля.

По данным опыта определены показатели отделения ферромагнитных частиц, позволяющие косвенно оценить степень очистки продукта. При этом сравнивается время свободного падения ферромагнитной частицы t_1 и время притяжения частицы к концентраторам t_2 . Результаты для сравнения приводятся в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики магнитного поля и показатели отделения ферромагнитной частицы, рассчитанные по опытным данным

Высота нахождения частицы в зоне сепарации, м	$d_n, м$	d_n/d_m	Время нахождения частицы в зоне сепарации, с	Время притяжения частицы к концентратору, с	Максимальная магнитная индукция, мТл
$h_1 = 0,37$ м	0,100	0,45	0,278	0,27	140
$h_2 = 0,23$ м	0,083	0,46	0,21	0,21	130
$h_3 = 0,09$ м	0,057	0,47	0,14	0,13	100

Приведенные данные показывают, что сепаратор УСС-5М2 с усовершенствованной электромагнитной системой будет надежно отсеивать металлические частицы от сыпучих сельскохозяйственных смесей, таких как комбикорм, зерносмесь или мясокостная мука.

В пятой главе «**Технико-экономическая эффективность применения электромагнитного железоотделителя УСС-5М2**» сделан расчет экономической эффективности от внедрения электромагнитного сепаратора УСС-5М2.

В результате проведенных исследований установлено, что использование электромагнитного сепаратора УСС-5М2 для очистки сыпучих сельскохозяйственных продуктов, в том числе мясокостной муки, позволило повысить производительность процесса очистки и улучшить ее качество. При сравнении работы электромагнитного сепаратора УСС-5М2 с базовой машиной годовой экономический эффект составил 6320 руб. в ценах 2015 года, и годовую экономию электроэнергии 792 кВт·ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена важнейшая техническая задача – усовершенствована электромагнитная установка для очистки сыпучих сельскохозяйственных продуктов от ферромагнитных примесей. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили сформулировать основные выводы.

1. Существующие электромагнитные сепараторы в технологических линиях переработки мясокостной муки используются для предварительной очистки, поскольку они не обеспечивают требуемые нормы, согласно ГОСТ 17536-82, ввиду несовершенства электромагнитной системы.

2. На основе установленной взаимосвязи конструктивных и режимных параметров сепарации в рабочей зоне сепаратора разработана номограмма, позволяющая по заданной высоте рабочей зоны определить показатели электромагнитной системы, величину магнитной индукции в зависимости от неоднородности магнитного поля, а также решить обратную задачу, определить конструктивные параметры рабочей зоны при заданных показателях электромагнитной системы. При этом эффективность процесса очистки сыпучих продуктов можно оценить косвенно – временем притяжения ферромагнитных частиц к концентратору электромагнитной системы.

3. Усовершенствованная электромагнитная система с оптимальными параметрами концентратора – длиной окружности овальной формы 72 мм, расстояние между окружностями 10 мм повышает степень очистки продукта за счет создания более неоднородного магнитного поля с параметром $d_n/d_m=0,5$ и усиления магнитной индукции в 35 раз до 250 мТл.

4. Разработанный просыпной электромагнитный сепаратор УСС-5М2 обеспечивает требуемую степень очистки мясокостной муки на уровне 96+2% за счет усовершенствованной электромагнитной системы с оптимальными параметрами. Так, в сепараторе производительностью 5 т/ч и высотой рабочей зоны 0,37 м мясокостная мука просыпается в течение 0,28 с, а время притяжения металлических частиц составит 0,27 с, и обеспечивается качество очистки продукта путем создания магнитной индукции 140 мТл и неоднородности магнитного поля в относительных единицах $d_n/d_m=0,5$.

5. Электромагнитный сепаратор УСС-5М2 соответствует положениям, обеспечивающим требования к содержанию ферромагнитных частиц в сухих сельскохозяйственных продуктах, и его применение в технологических линиях переработки мясокостной муки дает экономический эффект составил 6320 руб. в ценах 2015 года, и годовую экономию электроэнергии 792 кВт·ч.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Разработанный электромагнитный сепаратор просыпного типа рекомендуется использовать в линиях по переработке мясокостной муки для повышения эффективности очистки от ферромагнитных примесей. Основные положения данной работы могут быть использованы при разработке электромагнитно-

го сепаратора просыпного типа для применения в технологических линиях производства других видов сыпучих сельскохозяйственных продуктов, например, комбикормов и различных круп.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Дальнейшие исследования поданной теме целесообразно направить на разработку новых и совершенствование существующих электромагнитных систем для создания более неоднородного магнитного поля с высокой индукцией.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в рецензированных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ

1. Чарыков, В. И. Применение электромагнитных сепараторов в технологических процессах АПК / В. И. Чарыков, И. И. Копытин, В. А. Ушаков // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. – 2011. – №9. – С. 60-64.
2. Чарыков, В. И. Электромагнитные железотделители для агропромышленного комплекса / В. И. Чарыков, И. И. Копытин, А. А. Евдокимов, А. А. Митюнин // Вестник Крас ГАУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 168-174.
3. Чарыков, В. И. Модернизированная установка для очистки мясокостной муки / В. И. Чарыков, И. И. Копытин // Сельский механизатор. – 2012. – №6. – С. 26-27.
4. Чарыков, В. И. Электромагнитная установка для очистки мясокостной муки от металлических примесей / В. И. Чарыков, И. И. Копытин // Аграрная наука. – 2012. – №7. – С. 31-32.
5. Чарыков, В. И. Электромагнитный железотделитель УСС- 5М2: от математической модели до конструкции / В. И. Чарыков, И. И. Копытин // Вестник Бурятской ГСХА им. В.Р. Филиппова. – 2015. – Вып. №1(38). – С. 59-64.
6. Чарыков, В. И. Очистка сплошных нестационарных сред в электромагнитных сепараторах просыпного действия / В. И. Чарыков, А. А. Митюнин, И. И. Копытин // Агропродовольственная политика России. – 2015. – №1. – С. 26-28.
7. Чарыков, В. И. Совершенствование технологии электромагнитной очистки автотракторных масел системами УМС / В. И. Чарыков, И. И. Копытин, А. И. Яковлев // Технический сервис машин. – 2020. – №1. – С.43-50.

Публикации в других изданиях

8. Чарыков, В. И. Принцип работы электромагнитного сепаратора УСС-5М / В. И. Чарыков, В. С. Зуев, И. И. Копытин // Вестник Курганского государственного университета. – 2010. – №1. – С.71-88.
9. Копытин, И. И. Модернизация электромагнитной системы железотделителя просыпного типа / И. И. Копытин // Аграрная наука – основа инновационного развития АПК : материалы международной научно-

практической конференции Курганской ГСХА. – Курган, 2011. – Т.1. – С.359-361.

10. Копытин, И. И. Оценка влияния количества катушек намагничивания на величину магнитной индукции в рабочем зазоре сепаратора УСС – 5М / И. И. Копытин, В. И. Чарыков, С. А. Соколов // Достижения науки – агропромышленному производству : материалы L международной научно-технической конференции. – Челябинск, 2011. – Ч.V. – С. 70-74.

11. Чарыков, В. И. Обоснование рабочей зоны электромагнитного железоотделителя просыпного типа / В. И. Чарыков, И. И. Копытин // Энергетика в современном мире : сборник материалов V Международной научно-практ. конф. – Чита, 2011. – С. 64-68.

12. Чарыков, В. И. Электромагнитные железоотделители серии УСС: нагрев и охлаждение // В. И. Чарыков, И. И. Копытин, В. А. Ушаков // Вестник Курганского госуниверситета. Серия «Технические науки». – 2011. – Вып. 6. – №1(20). – С. 103-105.

13. Копытин, И. И. Зависимость эффективности очистки сыпучих продуктов от конструкции рабочей зоны железоотделителя / И. И. Копытин // Достижения науки – агропромышленному производству : материалы LI международной научно-технической конференции. – Челябинск, 2012. – Ч.V. – С.94-96.

14. Чарыков, В. И. Инновационные системы электромагнитной очистки сыпучих продуктов в кормопроизводстве / В. И. Чарыков, И. И. Копытин // Инновационные электротехнологии и электрооборудование – предприятиям АПК : материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 35-летию факультета электрификации и автоматизации сельского хозяйства. – Ижевск : ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2012. – С. 8-11.

15. Копытин, И. И. Методика измерения электромагнитного поля в рабочих зонах сепараторов на примере работы миллитесламетра / И. И. Копытин, А. А. Евдокимов, А. А. Митюнин // Аграрные регионы: тенденции и механизмы развития : материалы международной научно-технической конференции. – Курган : КГСХА, 2012. – С. 387-390.

16. Чарыков, В. И. Обоснование принципа работы просыпных электромагнитных железоотделителей серии УСС / В. И. Чарыков, И. И. Копытин // Вестник Башкирского ГАУ. – 2012. – №3(23). – С. 59-62.

17. Чарыков, В. И. Структурно-элементная модель электромагнитного железоотделителя УСС-5М2 / В. И. Чарыков, И. И. Копытин // Вестник Курганского госуниверситета. Серия «Технические науки». – 2012. – Вып. 7. – №2(24). – С. 69-71.

18. Копытин, И. И. Эксперимент, как подтверждение эффективной работы электромагнитногожелезоотделителя УСС-5М2 / И. И. Копытин // Вестник Курганского госуниверситета. Серия «Технические науки». – 2012. – Вып. 7. – №2(24). – С. 65-66.

19. Копытин, И. И. Электромагнитная сепарация мясокостной муки: теоретический аспект / И. И. Копытин, В. И. Чарыков, В. С. Зуев // Достижения

науки – агропромышленному производству : материалы LI международной научно-технической конференции. – Челябинск, 2012. – Ч.V. – С. 96-99.

20. Чарыков, В. И. Просыпные электромагнитные сепараторы для АПК / В. И. Чарыков, В. С. Зуев, И. И. Копытин, С. А. Соколов // Достижения науки – агропромышленному производству : материалы LI международной научно-технической конференции. – Челябинск, 2012. – Ч.V. – С. 135-139.

21. Чарыков, В. И. Режимы и параметры очистки мясокостной муки с использованием электромагнитного поля / В. И. Чарыков, И. И. Копытин // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве : материалы 8-й Междун. научн.-техн. конференции. – Москва : ВИЭСХ, 2012. – С.325-327.

22. Чарыков, В. И. Создание неоднородного магнитного поля в рабочей зоне электромагнитного железоотделителя УСС-5М2 / В. И. Чарыков, И. И. Копытин // Актуальные проблемы энергетики АПК : материалы III Международной научно-практической конференции. – Саратов : ФГБОУ ВПО Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова, 2012. – С.284-287.

23. Копытин, И. И. Повышение эффективности процесса очистки сыпучих продуктов путем совершенствования электромагнитного сепаратора / И. И. Копытин // Достижения науки – агропромышленному производству : материалы LII международной научн.-техн. конф. – Челябинск, 2013. – Ч.V. – С.169-171.

24. Копытин, И. И. Электромагнитный железоотделитель УСС-5М2 и его энергетические характеристики / И. И. Копытин, В. И. Чарыков, А. И. Яковлев // Инновационное развитие АПК Северного Зауралья : сборник материалов научно-практ. конф. молодых ученых. – Тюмень, 2013. – С. 271-273.

25. Чарыков, В. И. Квинтэссенция просыпных электромагнитных железоотделителей / В. И. Чарыков, И. И. Копытин // Современная наука – агропромышленному производству : сборник материалов Международной научно-практ. конф. – Тюмень, 2014. – С.202-205.

26. Копытин, И. И. Повышение эффективности очистки сельскохозяйственных продуктов путем совершенствования электромагнитного сепаратора / И. И. Копытин // Достижения науки – агропромышленному производству : материалы LIII Международной научно-технической конференции. – Челябинск, 2014. – Ч.III. – С.265-269.

27. Копытин, И. И. Электромагнитный сепаратор УМС-1М: от математической модели до конструкции / И. И. Копытин, В. И. Чарыков, А. И. Яковлев // Международн. научно-исследовательский журнал. – 2014. – №1.– С. 98-101.

28. Чарыков, В. И. Совершенствование технологии приготовления мясокостной муки / В. И. Чарыков, И. И. Копытин, В. А. Новикова // Вестник КГСХА. – 2016. – №4. – С.76-81.

29. Чарыков, В. И. Эффективность очистки сельскохозяйственных продуктов модернизированным сепаратором УСС – 5М2 / В. И. Чарыков, И. И. Копытин, А. И. Яковлев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – №9(51).– С.99-103.

30. Чарыков, В. И. Апгрейд электромагнитных железоотделителей серии УСС / В. И. Чарыков, И. И. Копытин, В. А. Новикова // Транспорт: проблемы и перспективы : сборник материалов Международной научно-практической конференции. – Курган : 2017. – С.125-129.

31. Чарыков, В. И. Квинтэссенция электромагнитной сепарации сыпучих материалов / В. И. Чарыков, И. И. Копытин, А. И. Яковлев // Энергетика – агропромышленному комплексу России : материалы Международной научно-практ. Конференции. – Челябинск : ЮУрГАУ, 2017. – С. 211-215.

32. Чарыков, В. И. Конкурентоспособность электромагнитных сепараторов серии УСС / В. И. Чарыков, И. И. Копытин // Проблемы экономики и управления в современных условиях : монография. – Курган, 2017. – С.219-231.

33. Чарыков, В. И. Повышение эффективности очистки составляющих электротехнического фарфора на основе оптимизации конструктивных параметров электромагнитной установки / В. И. Чарыков, И. И. Копытин // Научное обеспечение инновационного развития агропромышленного комплекса регионов РФ : материалы Международной научно-практической конференции. – Курган : КГСХА, 2018. – С.356-361.

34. Чарыков, В. И. Совершенствование технологии электромагнитной очистки индустриальных масел системами УМС / В. И. Чарыков, И. И. Копытин // Приоритетные направления развития энергетики в АПК : материалы Всероссийской научно-практ. конф. – Курган : КГСХА, 2018. – С. 260-265.

35. Чарыков, В. И. Интерцептор – концентратор магнитного поля в сепараторе УСС – 5М2 / В. И. Чарыков, И. И. Копытин // Приоритетные направления развития энергетики в АПК : материалы III Всероссийской (национальной) научно-практической конф. – Курган : КГСХА, 2019. – С.116-119.

36. Копытин, И. И. Определение конструктивной постоянной деферризатора мясокостной муки / И. И. Копытин, В. И. Чарыков, В. А. Новикова // Инженерное обеспечение реализации социально-экономических и экологических программ АПК. –Курган : AGRIS, 2020. – С.13-17.

37. Чарыков, В. И. Оценка величины силовой характеристики в рабочей зоне электромагнитного сепаратора УСС 5М2 в зависимости от конструкции концентратора / В. И. Чарыков, И. И. Копытин, В. А. Новикова // Достижения и перспективы научно-инновационного развития АПК. – Курган : Изд-во Курганской ГСХА, 2020. – С. 385-389.

Монографии

1. Чарыков, В. И. Инновационные решения при конструировании электромагнитных сепараторов : монография / В. И. Чарыков, А. А. Евдокимов, И. И. Копытин. – Курган : Изд-во КГУ, 2015. – 182 с.

2. Чарыков, В. И. Электромагнитные деферризаторы: теория, расчет, конструкция : монография / В. И. Чарыков, И. И. Копытин. – Курган : Изд-во КГУ, 2018. – 162 с.

Авторские свидетельства, патенты

1. Патент на изобретение №2516608 Российская Федерация. Электромагнитный сепаратор / В. С. Зуев, В. И. Чарыков, А. А. Евдокимов, А. А. Митюнин, И. И. Копытин ; заявитель и патентообладатель Курганская ГСХА, №2012147153/03; заявл. 06.11.2012; опубл. 20.05.2014. Бюл. №14.

2. Патент на полезную модель №132740 Российская Федерация. Установка электромагнитной сепарации / В. С. Зуев, В. И. Чарыков, А. А. Евдокимов, А. А. Митюнин, И. И. Копытин ; заявитель и патентообладатель Курганская ГСХА, №2012147148/03; заявл. 06.11.2012; опубл. 27.09.2013. Бюл. №27.

3. Патент на полезную модель №132741 Российская Федерация. Электромагнитный сепаратор просыпного действия / В. С. Зуев, В. И. Чарыков, А. А. Митюнин, А. А. Евдокимов, И. И. Копытин ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Курганская ГСХА №2012147149/03; заявл. 06.11.2012; опубл. 27.09.2013. Бюл. №27.

4. Патент на изобретение №2513946 Российская Федерация. Электромагнитный сепаратор гравитационного действия / В. С. Зуев, В. И. Чарыков, А. А. Митюнин, И. И. Копытин, А. А. Евдокимов; заявка: №2012147154/03, заявл. 06.11.2012, опубл. 20.04.2014. Бюл. №11.