

На правах рукописи



ПШЕНОВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**РАЗДЕЛЕНИЕ ПРОДУКТОВ РАЗМОЛА ЗЕРНА В ПНЕВМАТИЧЕСКОМ
ВИНТОВОМ КЛАССИФИКАТОРЕ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства
механизации сельского хозяйства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный аграрный университет» на кафедре «Механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции».

Научный руководитель: кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Туров Александр Кондратьевич

Официальные оппоненты: **Федоренко Иван Ярославович**
доктор технических наук, профессор
Алтайский государственный аграрный университет,
Инженерный факультет, заведующий кафедрой
«Механизации животноводства»

Лапшин Игорь Петрович
доктор технических наук, профессор
Тюменская государственная сельскохозяйственная академия, Механико-технологический институт,
профессор кафедры «Энергообеспечение
сельскохозяйственного производства»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

Защита диссертации состоится «26» апреля 2012 года в 10 часов на заседании диссертационного совета ДМ 006.059.01 при ГНУ Сибирский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства (СибИМЭ) Россельхозакадемии в ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный аграрный университет» по адресу: 630039, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 160.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ СибИМЭ Россельхозакадемии.

Автореферат разослан «23» марта 2012 г., и размещен на официальном сайте ВАК Минобрнауки России <http://vak2.ed.gov.ru>, на сайте ГНУ СибИМЭ Россельхозакадемии www.sibime-rashn.ru

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять в адрес диссертационного совета: 630501, Новосибирская область, Новосибирский район, п. Краснообск – 1, а/я 460, ГНУ СибИМЭ Россельхозакадемии, телефон (факс): (383) 348-12-09; e-mail: sibime@ngs.ru.

Учёный секретарь
диссертационного совета



В.С. Нестяк

10. **Пат.** №75329 U1 Российская Федерация, МПК В 04 С 5/14, В 07 В 7/00 Классификатор – разделитель [Текст]/ А.К. Туров, А.А. Мезенов, Е.А. Пшенов; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО Новосибирский государственный аграрный университет – №2008108465; заявл. 04.03.2008; опубл. 10.08.08, Бюл. №22. – 6с.
11. **Пат.** №2378057 С1 Российская Федерация, МПК В 07 В 7/08. Пневматический винтовой классификатор [Текст] / А.К. Туров, А.А. Мезенов, Е.А. Пшенов; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО Новосибирский государственный аграрный университет. – №2008117269, заявл. 29.04.2008; опубл. 10.01.10, Бюл. №1. – 6с.
12. **Пат.** №2430795 С1 Российская Федерация, МПК В 07 В 7/08. Пневматический винтовой классификатор [Текст] / А.К. Туров, А.А. Мезенов, Е.А. Пшенов; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО Новосибирский государственный аграрный университет. – №2010109692/03, заявл. 15.03.2010; опубл. 10.10.11, Бюл. №28. – 5с.

3. **Пшенов Е.А.** Обзор устройств и способов для пневмосепарации сыпучих материалов [Текст] / Е.А. Пшенов // Новейшие направления развития аграрной науки в работах молодых учёных: сб. трудов ч.2. междунар. научн. конф. мол. учёных посвящ. 40-летию СО Россельхозакадемии(Новосибирск, 22-23 апреля 2010 г.) – Новосибирск: р-п. Краснообск, 2010. – С. 395-399.
4. Мезенов А.А. Анализ факторов влияющих на процесс разделения продуктов размола зерна в пневмо-винтовом классификаторе [Текст] / А.А. Мезенов, **Е.А Пшенов** // Инновационные технологии в АПК: материалы регион. науч.-практ. конф. мол. ученых СФО с междунар. участием посвященной 65-летию Победы в Великой Отечественной войне: Изд-во «ИрГСХА» – Иркутск, 2010. – С.298-301
5. **Пшенов Е.А.** Разделение порошкообразных материалов в пневмо-винтовом потоке [Текст] / Е.А. Пшенов // Наука. Технологии. Инновации: материалы всерос. науч. конф. мол. ученых ч1. (Новосибирск, 3-5 декабря 2010 г.): Изд-во НГТУ, 2010. – Ч1. – С. 303-304
6. **Пшенов Е.А.** Анализ подходов к описанию динамики гетерогенной среды в закрученном потоке [Текст] / Е.А. Пшенов // материалы ежегод. науч.-практ. конф. студентов и аспирантов Инженерного института (Новосибирск, 12 апреля 2011 г.) / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т. – Новосибирск, 2011. – С. 70-72.
7. **Пшенов Е.А.** Подход к описанию динамики многофазной среды в центробежно-винтовом потоке [Текст] / Е.А. Пшенов // Студент и научно-технический прогресс: материалы XLIX междунар. науч. студ. конф., (Новосибирск, 16-20 апреля 2011 г.): Изд-во Новосиб. гос. ун-т. – 2011. – С. 152.
8. **Пшенов Е.А.** Повышение эффективности сортирования продуктов размола зерна на мини-мельнице [Текст] / Е.А. Пшенов // Актуальные проблемы развития АПК в научных исследованиях молодых ученых: труды Всероссийского совета молодых ученых и специалистов аграрных образовательных и научных учреждений – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2011. – С. 100-104.
9. **Пшенов Е.А.** Возможности применения пневмоцентробежных сепарирующих устройств в процессе разделения продуктов размола зерна [Текст] / Е.А. Пшенов // Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях: сб. докл. III междунар. науч.-практ. конф., (Москва, 28 июня – 1 июля 2011 г.) / ГОУ ВПО Моск. гос. строит. ун-т. – М.: МГСУ, 2011. – С. 374-375.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Экономическая эффективность предприятия по переработке зерна в муку зависит от надежности и совершенства оборудования, составляющего поточную-технологическую линию, уровня использования и потерь сырья на всех стадиях технологического процесса, при этом требования к качеству выпускаемой продукции выходят на первый план.

Производители муки вынуждены проводить реконструкцию и техническое перевооружение, заменяя устаревшее оборудование на современное: швейцарского, итальянского или турецкого производства, поддерживать высокий уровень качества выпускаемой продукции, расширяя ассортимент, внедряя новые технологии и тем самым снижая издержки и, соответственно, себестоимость продукции.

На сегодняшний день мини-мельницы пользуются широким спросом в малых фермерских хозяйствах. Их использование для производства «местной» муки, представляется экономически целесообразным и перспективным, особенно в свете устранения ряда присущих им технико-технологических недостатков, основным из которых является низкий выход сортовой муки, на 8-12 % ниже, чем на крупных мельницах, а по выходам высших сортов муки эта разница еще больше, а также их продукция по качественным показателям зачастую не отвечает требованиям ГОСТа.

Наибольшее влияние на снижение технико-экономические показатели в работе мини-мельниц оказывает сокращенная схема измельчения зерна и сортирования промежуточных продуктов размола, что приводит к потерям муки и дунстов в сходовые фракции на отсевах драных систем.

При анализе технологических схем размольных отделений мини-мельниц, прослеживается тенденция к использованию оборудования для сортирования промежуточных продуктов размола зерна на основе принципов пневмоцентробежной сепарации, как наиболее энергоэффективной. Кроме того, если удастся совместить в этих аппаратах операции сортирования продукта по крупности и его обогащение по плотности, возможно сокращение технологического процесса на мельнице за счет исключения ситовечных машин.

Данные принципы основаны на взаимодействии закрученного воздушного потока с ситом, как в пневмоцентробежных отсеивателях, либо осуществление процесса сортирования в кольцевом пространстве циклонных камер или динамических классификаторов. Исследованиями установлено, что процесс центробежной сепарации регулируется величиной центробежного ускорения, действующего на разделяемый материал, путем увеличения скорости и крутки потока или частоты вращения ротора аппарата. При этом отсутствуют способы и устройства, использующие одновременно тангенциальный и радиальный потоки для регулирования процесса пневмоцентробежной сепарации.

Научная задача заключается в создании адекватного математического описания газодинамики и процесса классификации полидисперсных частиц в закрученных потоках с тангенциальным входом, имеющих два и более радиальных стоков,

размещенных по оси симметрии аппарата и разнесенных вдоль нее, что является одной из наиболее трудных задач теоретической газодинамики. Особо важную роль в этом случае приобретает разработка адекватной физической модели, позволяющей с использованием корректных упрощающих допущений построить математическую модель, достаточно хорошо описывающую физический процесс.

Решение задачи позволяет разработать конструкции высокоэффективной пневмосепарационной техники и надежные методы их расчета, что является актуальной задачей для агропромышленного комплекса.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом НИР ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный аграрный университет» в рамках государственной темы №01201250256 «Разделение порошкообразных материалов в закрученном воздушном потоке».

Цель исследования – повышение эффективности классификации продуктов измельчения зерна за счет использования пневмовинтового канала с радиальными стоками.

На основе поставленной цели сформулированы следующие **задачи исследований**:

1. Уточнить физико-механические свойства продуктов размола зерна для расчета гидродинамических параметров частиц.
2. Разработать модель процесса разделения продуктов размола зерна в пневмовинтовом канале с радиальными стоками.
3. Обосновать основные конструктивно-режимные параметры процесса разделения продуктов размола зерна в пневмовинтовом канале и определить их рациональные значения.
4. Оценить экономическую эффективность применения пневматического винтового классификатора.

Объект исследования – процесс разделения продуктов измельчения зерна в пневмовинтовом канале.

Предмет исследования – закономерности процесса разделения продуктов размола зерна в пневмовинтовом канале с радиальными стоками.

Научная новизна. Получено аналитическое выражение, описывающее пневмовинтовой поток в канале с радиальными стоками, позволяющее определять направление результирующего вектора сплошной среды в зависимости от технологических и геометрических параметров пневмовинтового канала;

Разработана математическая модель сепарации частиц продуктов размола зерна в пневмовинтовом канале с радиальными стоками, учитывающая влияние направления результирующего вектора сплошной среды и гидродинамические параметры частиц на процесс разделения.

Обоснованы рациональные геометрические и технологические параметры пневмовинтового канала, что позволило разработать рекомендации по

7. На основе регрессионного анализа показателей эффективности работы пневматического винтового классификатора (в качестве критерия оптимизации общий коэффициент извлечения η , %) установлены рациональные значения параметров влияющих на работу классификатора: $\alpha^\circ = 13,6^\circ$; $U_1 = 10,3 \text{ м/с}$; $U_2 = 6,8 \text{ м/с}$; $q = 28,5 \text{ г/с}$.

8. Производственные испытания и эксплуатация опытного образца классификатора, разработанного и изготовленного по материалам исследований, показали что аппарат работоспособен, имеет малые отклонения от заданных показателей разделения, рассчитанный экономический эффект от внедрения составил 760 рублей с одной тонны перерабатываемого зерна.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Туров А.К. Исследование работы циклона-разделителя [Текст] / А.К. Туров, А.А. Мезенов, **Е.А. Пшенов** // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – №2. – С. 9-10.
2. **Пшенов Е.А.** Исследование физико-механических свойств продуктов размола зерна [Текст] / Е.А. Пшенов // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. – 2010. – №1(13). – С. 52-55.
3. Туров А.К. Анализ работы мини-мельниц с точки зрения ресурсосберегающих технологий [Текст] / А.К. Туров, А.А. Мезенов, **Е.А. Пшенов** // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – №7 (69). – С.59-62
4. Мезенов А.А. Оценка параметров, влияющих на процесс разделения продуктов размола зерна в пневматическом винтовом классификаторе [Текст] / А.А. Мезенов, А.К. Туров, **Е.А. Пшенов** // Вестник Орловского государственного аграрного университета. – 2012. – №1 (34). – С.139-143

Публикации в описаниях на изобретения, сборниках научных трудов

1. **Пшенов Е.А.** Спиральное движение частиц в пневмо-винтовом канале [Текст] / Е.А. Пшенов // Инновационный потенциал молодых ученых в развитии агропромышленного комплекса Сибири: материалы VII межрегион. конф. мол. ученых и специалистов аграр. вузов СФО (Новосибирск, 6-9 июня 2009 г.) – Новосибирск, 2009. – С. 120-123
2. Мезенов А.А. Структура воздушного потока в пневмо-винтовом канале [Текст] / А.А. Мезенов, **Е.А. Пшенов** // Инновационный потенциал молодых ученых в развитии агропромышленного комплекса Сибири: материалы VII межрегион. конф. мол. ученых и специалистов аграр. вузов СФО (Новосибирск, 6-9 июня 2009 г.) – Новосибирск, 2009. – С. 113-115.

внедрения составил 760 р. с одной тонны перерабатываемого зерна при работе в одну смену и средней цене реализации муки 12 тыс.р. за тонну.

Рекомендации производству

Пневматический винтовой классификатор рекомендуется для предварительного разделения промежуточных продуктов размола зерна перед рассевом, как на мини-мельницах, так и на промышленных мельзаводах.

В условиях эксплуатации рекомендуются следующие параметры: массовая концентрация смеси $\mu \leq 0,64$ кг/кг; скорость воздушного потока на входе в классификатор $U_{вх} \leq 12$ м/с; соотношение средней скорости в патрубке пневмоканала $U_{нк}$ к средней скорости в осевом патрубке $U_{ос}$ равно $U_{нк}/U_{ос} \approx 0,8$

Общие выводы

1. В результате определения физико-механических свойств продуктов размола зерна. Установлено скорость витания частиц от 0,5 до 5,5 м/с, при этом расчетный эквивалентный диаметр составил от 122 до 1040 мкм соответственно.

2. Предложено усовершенствование технологической схемы сортирования промежуточных продуктов размола зерна, путем их предварительного разделения по крупности и аэродинамическим параметрам, которое реализовано в новой конструкции пневматического винтового классификатора со статической зоной сепарации.

3. Получено аналитическое выражение, описывающее пневмовинтовой поток, в канале с радиальными стоками позволяющее определить значение компонент скоростей энергоносителя в диапазоне от 0 до 12 м/с и угле подъема винтовой линии от 0 до 16° .

4. Разработана математическая модель разделения продуктов размола зерна позволяющая производить расчет скоростей и траекторий частиц. Были получены следующие данные: при $k=0,075$ частицы со скоростью витания от 0 до 1 м/с достигают стенки образующей при угле свыше 4π ; от 1 до 3,5 м/с при угле от 1π до 3π ; от 3,5 до 5,5 м/с при угле до π .

5. Установлена возможность разделения продуктов размола зерна на фракции в пневматическом винтовом классификаторе. Выявлены факторы оказывающее наибольшее влияние на процесс разделения: угол подъема винтовой линии – α° ; скорость воздушного потока в осевом патрубке – U_1 , м/с; скорость воздушного потока в патрубке пневмоканала – U_2 , м/с; нагрузка материала на классификатор – q , г/с.

6. Обоснованы параметры пневматического винтового классификатора: соотношение средней скорости в патрубке пневмоканала $U_{нк}$ к средней скорости в осевом патрубке $U_{ос}$ равно $U_{нк}/U_{ос} \approx 0,8$. Угол раскрытия конической части классификатора равен $\theta=60^\circ$.

проектированию пневматического винтового классификатора, предназначенного для разделения продуктов размола зерна.

На защиту выносятся:

Уточненные физико-механические свойства продуктов размола зерна.

Математическая модель процесса разделения продуктов размола зерна в пневмовинтовом канале с радиальными стоками.

Рациональные значения конструктивно-режимных параметров процесса разделения продуктов размола зерна в пневмовинтовом канале с радиальными стоками.

Практическая ценность работы. На основании результатов проведенных исследований разработан пневматический винтовой классификатор, техническая новизна которого защищена двумя патентами Российской Федерации на изобретение (RU №2378057 C1, RU №2430795 C1).

Внедрение пневматического винтового классификатора в поточно-технологическую линию мини-мельницы позволило выделить до 30 % муки и дунстов на стадии транспортирования продуктов размола после первой драной системы от вальцевого станка к рассеvu, что привело к повышению общего выхода муки в целом на 8 % за счет уменьшения потерь муки и дунстов в сходовые фракции на секции рассева драной системы.

Реализация работы. Разработанный опытный образец пневматического винтового классификатора, был установлен на мельнице «МВС-01» на ОАО «Тогучинский элеватор» Новосибирской области. Установка для разделения продуктов размола зерна включена в учебный процесс кафедры Механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции Инженерного института Новосибирского государственного аграрного университета.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на VII межрегиональной конференции молодых ученых и специалистов аграрных вузов СФО «Инновационный потенциал молодых ученых в развитии агропромышленного комплекса Сибири», проходившей в НГАУ, (г. Новосибирск) в 2009 году; на IV Международной научной конференции молодых ученых, посвященной 40-летию СО Россельхозакадемии «Новейшие направления развития аграрной науки в работах молодых ученых», проходившей в СО РАСХН (п. Краснообск) в 2010 году; на Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», проходившей в НГТУ (г. Новосибирск) в 2010 году; на региональной научно-практической конференции молодых ученых СФО с международным участием посвященной 65-летию Победы в Великой отечественной войне «Инновационные технологии в АПК», проходившей в ИрГСХА (г. Иркутск) в 2010 году; на III этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых аграрных вузов России, проходившем в Саратовском ГАУ, (г. Саратов) в 2011 году; на III международной научно-

практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях», (г. Москва) в 2011 году.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых ВАК РФ изданиях и получены 3 патента один на полезную модель и два на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, библиографического списка и приложений. Объем работы составляет 163 страниц, из них 147 страниц основного текста, 60 рисунков, 15 таблиц. Библиографический список включает 144 источника, в том числе 21 на иностранном языке.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненной работы, сформулирована цель исследования, научная новизна, практическая ценность, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе: «Состояние вопроса» дан анализ технологических схем размольных отделений мини-мельниц. Намечены пути совершенствования процесса переработки зерна в муку. Приведены характеристики промежуточных продуктов размола зерна. Дан анализ существующих конструкций и направлений пневмосепарационной техники.

Большой вклад в развитие теории и конструкции пневмосепарационной техники внесли: М.Д.Барский, И.П.Басина, Р.Бусройд, В.Ф.Веденев, М.А.Гольдштик, В.В.Гортинский, В.П.Горячкин, М.Е.Дейч, А.Б.Демский, А.М.Дзядзио, Е.А.Есеев, Н.И.Зверев, В.Л.Злочевский, С.В.Карпов, П.А.Коузов, В.А.Кубышев, И.П. Лапшин, В.Е.Масалов, А.А.Мезенов, В.Е.Мизонов, А.А.Орлов, А.И.Пирумов, Э.Н.Сабуров, Е.Я.Соколов, В.А.Сабашкин, С.Г.Ушаков, И.Я.Федоренко, Г.А.Филипов, Г.Н.Худяков и другие ученые.

Анализ исследований технологических схем размольных отделений мини-мельниц показал, что одним из основных факторов, влияющих на качество и общий выход муки, является наличие дополнительного сортирования и процесса обогащения крупок, без применения которого невозможно получение муки высшего сорта. Современные мини-мельницы – это модульные комплексы, поставляемые заводами-изготовителями готовыми блоками для облегчения монтажа и быстрого ввода в эксплуатацию. Установка на такие мельницы дополнительного отсева для сортировки и контроля муки сопровождается рядом трудностей: увеличение габаритов и массы модуля, требуется дополнительная рама и фундамент, увеличение стоимости оборудования, затраты на обслуживание, изменение технологической схемы и другое.

В этой связи перспективным направлением является использование пневмоцентробежных сепараторов для дополнительного сортирования промежуточных продуктов размола зерна, характеризующихся малыми габаритами,

Экспериментально определены параметры пневматического винтового классификатора, позволяющие обеспечить такие режимы работы, при которых коэффициенты извлечения требуемых фракций максимальны.

Результаты производственных испытаний в условиях ОАО «Тогучинский элеватор» на мини-мельнице МВС-01 представлены на рис. 16.

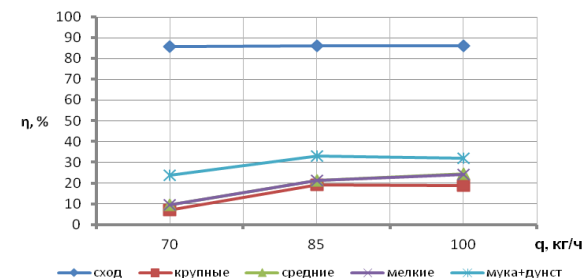


Рис.16 Зависимость коэффициента извлечения (η , %) от нагрузки q , кг/ч.

Для расчета экономической эффективности составлены количественные балансы помола до и после внедрения, представляющие собой документ, полностью отражающий все особенности технологического процесса на данном предприятии.

В итоге масса всех полученных продуктов, выраженная в процентах к I драной системе составила:

Таблица 3 Результаты количественного баланса помола

Наименование продукта	Базовый	Проектный
мука в/с.	40%	44,5%
мука I с.	32%	35,5%
отруби	25,8%	17,8%
кормовой зернопродукт	2,2 %	2,2 %
Итого:	100%	100%

Внедрение пневматического винтового классификатора позволило выделить до 30 % муки и дунстов на стадии транспортирования продуктов размола после первой драной системы, от вальцового станка к отсеиванию, что привело к повышению общего выхода муки в целом на 8 % за счет уменьшения потерь муки и дунстов в сходовые фракции на секции отсеивания драной системы.

В пятой главе: «Оценка экономической эффективности применения пневматического винтового классификатора» при пересчете производительности пневматического винтового классификатора на 1000 кг/ч экономический эффект от

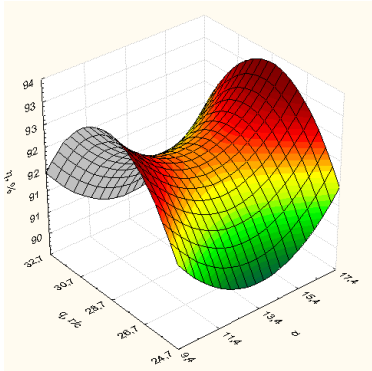


Рис.12 Влияние угла подъема винтовой линии, α° и нагрузки материала на классификатор, q , г/с на общий коэффициент извлечения η (%).

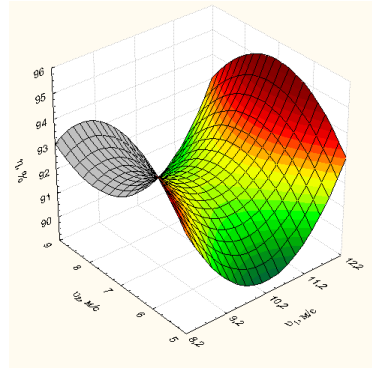


Рис.13 Влияние скорости воздушного потока в осевом патрубке, U_1 , м/с и скорости воздушного потока в патрубке пневмоканала, U_2 , м/с на общий коэффициент извлечения η (%).

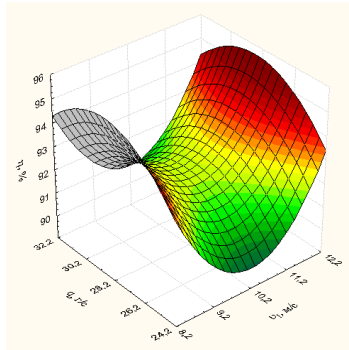


Рис.14 Влияние скорости воздушного потока в осевом патрубке, U_1 , м/с и нагрузки материала на классификатор, q , г/с на общий коэффициент извлечения η (%).

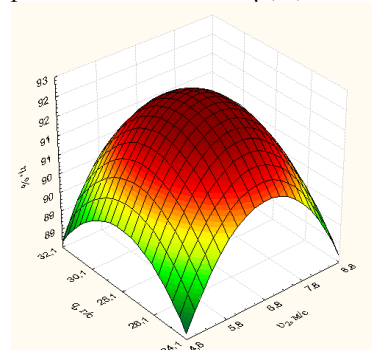


Рис.15 Влияние скорости воздушного потока в патрубке пневмоканала, U_2 , м/с и нагрузки материала на классификатор, q , г/с на общий коэффициент извлечения η (%).

Оценка влияния исследуемых параметров (α° ; U_1 , м/с; U_2 , м/с; q , г/с) на эффективность разделения продуктов размола зерна показала, что наибольшее влияние на коэффициент извлечения в исследуемом диапазоне имеет скорость воздушного потока в осевом патрубке, U_1 , м/с, затем скорость воздушного потока в патрубке пневмоканала, U_2 , м/с, в меньшей степени – нагрузка материала на классификатор, q , г/с и угол подъема винтовой линии, α° .

высокой эффективностью разделения, простотой и надежностью эксплуатации. При этом они легко интегрируются в имеющуюся поточно-технологическую линию. Теоретические исследования, направленные на повышение эффективности сепарации и увеличения количества получаемых фракций на основе закономерностей движения частиц в поле центробежных сил в воздушных сепараторах позволили выдвинуть **гипотезу: повышения эффективности сепарации можно достичь за счет использования пневмовинтового канала с радиальными стоками.**

Исследованиями существующих способов и конструкций для пневмоцентробежной сепарации установлено, что наиболее перспективным являются сепараторы со статической зоной сепарации.

Для повышения эффективности переработки зерна на мини-мельнице предложено осуществить предварительное разделение продуктов размола зерна перед рассевом на три фракции в пневматическом винтовом классификаторе.

Во второй главе: «Теоретическое исследование пневматического винтового классификатора» исследованы закономерности процесса сепарации частиц в закрученном воздушном потоке с радиальными стоками.

Моделирование процесса пневмоцентробежной сепарации основано на комбинации подходов Лагранжа и Эйлера. Исходными данными являются поле скоростей сплошной среды и физико-механические свойства частиц.

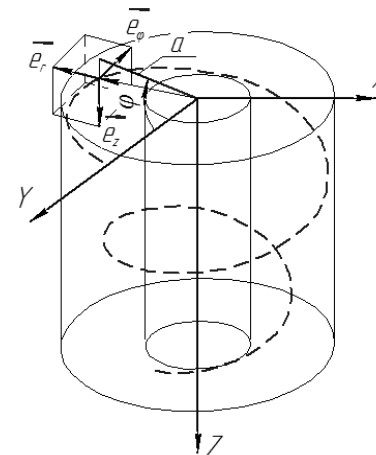


Рис. 1 Расчетная схема для определения поля скоростей энергоносителя в пневмовинтовом потоке

Моделирование поля скоростей основано на результатах исследования структуры воздушного потока в пневмовинтовом потоке с радиальными стоками. Вывод уравнения, описывающего поле скоростей, основан на уравнении неразрывности потока:

$$\bar{U} = -grad\Phi \quad (1)$$

В цилиндрической системе координат выражение (1) выглядит следующим образом:

$$\Delta\Phi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

Решение уравнения (2) можно представить в виде спиральной линии

описываемой радиус-вектором вида:

$$\Phi(a, \varphi, z) = a(\varphi) \cdot \vec{e}_r + h \cdot \frac{\varphi}{2\pi} \cdot \vec{e}_z \quad (3)$$

где a – радиус кривизны проекции спирали, м;

φ – угловая координата, рад;

h – шаг спирали, м;

Шаг спирали h по оси z принимаем постоянным, пропорциональным углу подъема винтовой линии канала α° .

Линии тока в пневмовинтовом потоке с радиальными стоками представляют собой пространственную винтовую линию, переменного радиуса кривизны. Принято, что радиус проекции спирали a изменяется аналогично линейной зависимости для спирали Архимеда:

$$a = a_0 - k \cdot \varphi / 2\pi \quad (4)$$

где a_0 – начальный радиус кривизны, м

($r_{oc} \leq a_0 \leq r_k$);

k – смещение потока за один оборот, м.

r_{oc} – радиус осевого патрубка, м;

r_k – радиус цилиндрического корпуса, м.

Принимаем смещение потока k прямо пропорциональным отношению значений скоростей сплошной среды в окнах осевого патрубка U_{oc} и тангенциальной составляющей скорости в пневмоканале U_t , тогда:

$$k = K \frac{U_{oc}}{U_t}, \quad (5)$$

где K – коэффициент пропорциональности.

После определения скоростей U_{oc} и U_t , получаем коэффициент смещения линии тока, связывающий регулируемые технологические и геометрические параметры пневмовинтового канала:

$$k = \frac{K \cdot \psi \sqrt{(U_{вых})^2 - (U_{осев})^2} \cdot r_{\varphi \max} \cdot b^2}{\beta (\zeta_1 U_{вых} \cdot b^2 + \zeta_2 U_{осев} \cdot B) \cdot a_0 \cdot e^{-\frac{1-a_0}{r_{\varphi \max}}}} \quad (6)$$

где $U_{вых}$ – средняя скорость потока в патрубке пневмовинтового канала, м/с;

$U_{осев}$ – средняя скорость потока в осевом патрубке, м/с;

ψ – коэффициент учитывающий форму и размер окон;

$r_{\varphi \max}$ – радиус на котором тангенциальная скорость максимальна $U_{t \max}$, м;

B – площадь осевого патрубка на выходе из аппарата, м²;

b – сторона сечения канала, м;

$\zeta_1 = 0,769$ – коэффициент сопротивления пневмовинтового канала;

$\zeta_2 = 0,505$ – коэффициент сопротивления окон осевого патрубка;

$$\eta = 83,46 + 0,075\alpha^2 + 0,8777U_1^2 - 0,5592U_2^2 - 0,1106q^2 - 1,3058a - 14,0358 + 6,2868 + 5,2614q - 0,1177aU_1 - 0,036aU_2 + 0,0679aq - 0,114U_1U_2 - 0,056U_1q + 0,1033U_2q \quad (17)$$

Разработанная модель позволила установить рациональные значения факторов при влажности материала $16 \pm 0,5\%$;

Таблица 2 Рациональные значения конструктивно-режимных параметров процесса разделения продуктов размола зерна в пневмовинтовом канале

α°	U_1	U_2	q	η
13,6°	10,3 м/с	6,8 м/с	28,5 г/с.	91,94%

Согласно модели, выраженной уравнением (17) построены поверхности отклика для визуальной оценки влияния того или иного параметра на изменение общего коэффициента извлечения η . Для чего проводилось каноническое преобразование модели (17), определялось смещение от центра плана эксперимента, определялся угол поворота осей от начального положения. Таким образом, поверхности отклика представлены со смещенным центром и с повернутыми осями.

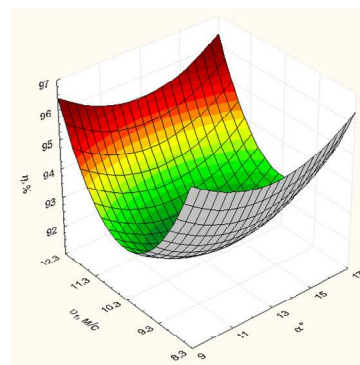


Рис.10 Влияние угла подъема винтовой линии, α° и скорости воздушного потока в осевом патрубке, U_1 , м/с на общий коэффициент извлечения η (%).

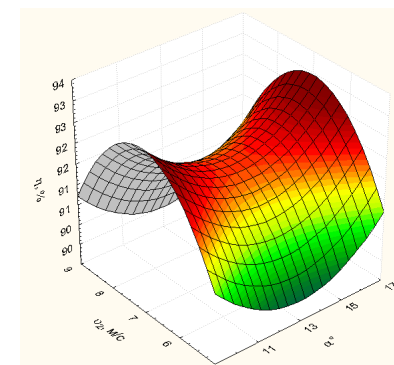


Рис.11 Влияние угла подъема винтовой линии, α° и скорости воздушного потока в патрубке пневмоканала, U_2 , м/с на общий коэффициент извлечения η (%).

действия центробежных сил. Вследствии чего мелкая фракция отжимается к периферии, оседает на стенке корпуса и выпадает вместе с крупными частицами из потока. Следовательно, с ростом скорости входа в пневмовинтовой канал коэффициент извлечения и процент содержания муки и дунстов в пробоотборнике патрубка пневмоканала уменьшается.

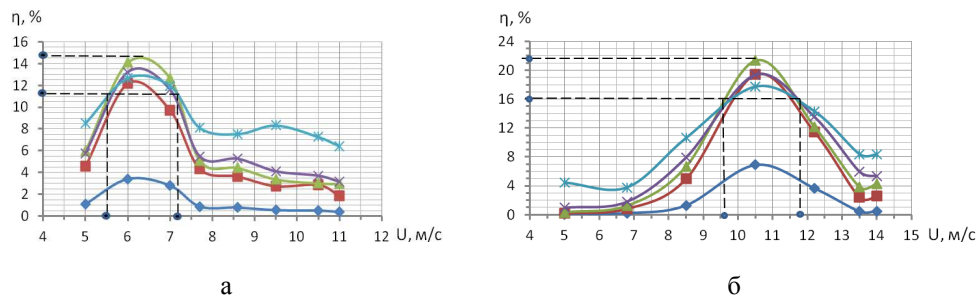


Рис. 8 Зависимость коэффициентов извлечения фракций η_i (%) в пробоотборнике осевого патрубка от:

- а) средней скорости в патрубке пневмоканала $U_{нк}$ при $U_{ос} = 8$ м/с;
 б) средней скорости в осевом патрубке $U_{ос}$ при $U_{нк} = 8$ м/с.

—●— сход —■— крупные —▲— средние —×— мелкие —*— мука+дунст

Результаты как экспериментальных, так и теоретических исследований позволили сделать вывод о том, что коническая часть практически не влияет на процесс разделения продуктов размола зерна в пневмовинтовом канале, что дает основание принять угол раскрытия конической части классификатора равным $\theta = 60^\circ$.

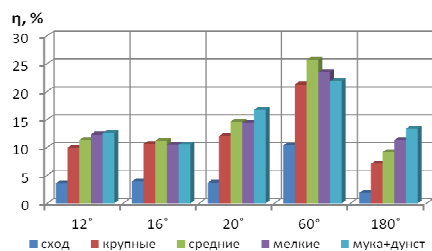


Рис.9 Гистограмма коэффициентов извлечения каждой фракции η_i для различных углов раскрытия конической части θ .

Обработка статистических данных, полученных в ходе многофакторного эксперимента, позволила получить модель процесса разделения продуктов размола зерна в пневмовинтовом канале в виде уравнения регрессии:

$\beta = 1,5$ – осредненный по эмпирическим данным коэффициент соотношения максимальной и средней скоростей в потоке, зависящий от конструкции канала;

Тогда дифференцируя уравнение (3) с учетом (4-6), получим уравнение, описывающее поле скоростей воздушного потока с радиальными стоками в окна осевого патрубка:

$$\vec{U} = \left(-k \frac{\omega}{2\pi} \right) \cdot \vec{e}_r + \left(\omega \cdot \left(a_0 - k \frac{\varphi}{2\pi} \right) \right) \cdot \vec{e}_\varphi + h \cdot \frac{\omega}{2\pi} \cdot \vec{e}_z \quad (7)$$

где ω – угловая скорость потока, рад/с.

В выражении (7) коэффициенты, стоящие перед ортами $\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$, представляют собой проекции вектора скорости энергоносителя \vec{U} на соответствующие оси системы координат.

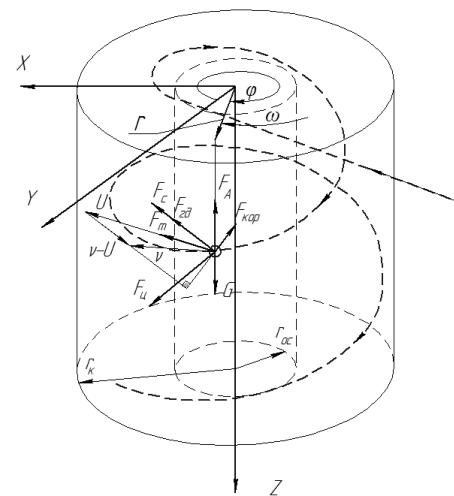


Рис.2 Силы действующие на частицу в пневмовинтовом потоке

Для анализа сил, действующих на частицу, сделаем ряд допущений:

- 1) влияние частиц на несущий поток отсутствуют;
- 2) влияние турбулентных пульсаций на осредненное движение частицы отсутствует.

Предполагается, что на частицу вовлекаемую в движение энергоносителем будут действовать силы: тангенциальная сила инерции \vec{F}_T ; центробежная сила $\vec{F}_ц$; сила Кориолиса $\vec{F}_{кор}$; сила аэродинамического сопротивления $\vec{F}_с$; сила гидравлического сопротивления $\vec{F}_{гд}$; сила Архимеда \vec{F}_A ; сила тяжести \vec{G} .

Действием остальных сил пренебрегаем в силу малой величины их воздействия на процесс разделения. Тогда представим уравнение движения отдельных частиц в форме второго закона Ньютона:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = 2m\omega U_t + m\omega^2 r + 2m\omega(\vec{v} - \vec{U}) + 3\pi\mu_s d_s(\vec{v} - \vec{U}) + \xi\pi d_s^2 \rho_s (\vec{v} - \vec{U})^2 / 8 + m\vec{g}(\rho_s / \rho_m) + m\vec{g} \quad (8)$$

где m – масса частицы, кг;
 ω_1 – угловая скорость воздушного потока, рад/с;
 U_t – тангенциальная скорость потока, м/с;
 r – радиус пневмовинтового канала, м;
 \vec{v} – вектор скорости частицы, м/с;
 μ_b – коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с;
 d_3 – эквивалентный диаметр частицы, м;
 ζ – коэффициент гидродинамического сопротивления;
 ρ_e – плотность среды, кг/м³;
 ρ_m – плотность материала, кг/м³;
 g – ускорение свободного падения, м/с².

Влияние формы частиц и условий стесненности их движения учитывается коэффициентом гидродинамического сопротивления ζ определяемого следующей зависимостью:

$$\zeta = k_1 k_2 (0,462 k_3 + 30/Re) \quad (9)$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий условия стесненности движения частиц вследствие их взаимодействия;
 k_2 – коэффициент, учитывающий условия стесненности вследствие влияния стенок;
 k_3 – коэффициент, учитывающий влияние формы частиц.

Влияние фактора формы частиц учитывается методом экспериментального нахождения истинной скорости витания частицы v_b . Далее по уравнению $\zeta = f(Re)$ и соотношению $Ar = 3\zeta Re^2/4$ итерационным методом вычисляется эквивалентный диаметр частицы, величина которого учитывает поправку на не сферичность и непосредственно используется в дальнейших расчетах:

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{v^2 \rho A r}{g(\rho_m - \rho)}} \quad (10)$$

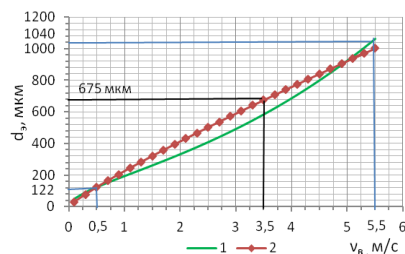


Рис.3 Расчетная зависимость эквивалентного диаметра d_3 от скорости витания частиц v_b при следующих значениях параметров:

$$\rho_e = 1,09 \text{ кг/м}^3; \rho_m = 1500 \text{ кг/м}^3; \\ \nu = 17,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

1- расчетные формулы по О.М. Годесу;
 2- расчетные формулы по М. Лева

Исходные уровни и интервалы варьирования факторов устанавливались на основе поисковых исследований разделения продуктов размола зерна в пневмовинтовом потоке.

Исходя из числа существующих факторов и рекомендаций по выбору планов эксперимента выбран композиционный симметричный трехуровневый план В₄, основой для выбора именно этого плана явились наилучшие совместные характеристики.

В четвертой главе: «Результаты экспериментальных исследований и их анализ» приведены результаты лабораторных и производственных испытаний.

Анализ результатов исследования аэродинамических и физико-механических свойств продуктов размола зерна показал, что исходная смесь является не полностью делимой по такому признаку как скорость витания частиц можно лишь выделить три класса: I – до 2,5 м/с; II – от 2,5 до 3 м/с; III – свыше 3,5 м/с.

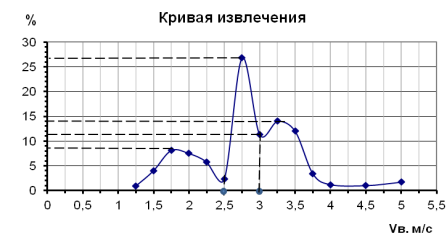


Рис. 7 Кривая извлечения по скоростям витания

Разделение по геометрическим параметрам также является неполным, одинаковые по размеру частицы имеют различную плотность ρ , следовательно, разную скорость витания. Для каждой мельницы необходимо индивидуально определять свойства продуктов размола после I-й драной системы, поскольку они зависят от индивидуальных особенностей технологического процесса измельчения.

Проведенные эксперименты позволили определить рациональное соотношение средней скорости в патрубке пневмоканала $U_{нк}$ к средней скорости в осевом патрубке $U_{ос}$ равное $U_{нк}/U_{ос} \approx 0,8$, при условии выделения муки и дунстов в патрубок пневмоканала, а крупок в окна осевого патрубка.

Полученные зависимости объясняются следующим. При попадании исходной смеси в пневмовинтовой канал на участке в 120° происходит самосортирование частиц, что наблюдается визуально и подтверждается в ряде работ. Далее по мере продвижения продукта наблюдается расслоение потока частиц. Мелкие частицы всплывают и на ходятся в верхней части пневмовинтового канала, крупные частицы выпадают из потока и оседают на винтовую поверхность, при этом более крупные частицы под действием центробежных сил отжимаются к периферии. Средние частицы увлекаются радиальными течениями газа через окна осевого патрубка. Увеличение скорости потока в одном из патрубков неизбежно влечет за собой увеличение входной скорости в пневмовинтовой канал, что ведет к увеличению

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2)(1 - \eta_3) \quad (15)$$

где η_1, η_2, η_3 – коэффициенты извлечения, соответственно: крупной фракции из первого выходного патрубка; средней фракции из второго выходного патрубка; мелкой фракции из третьего выходного патрубка;

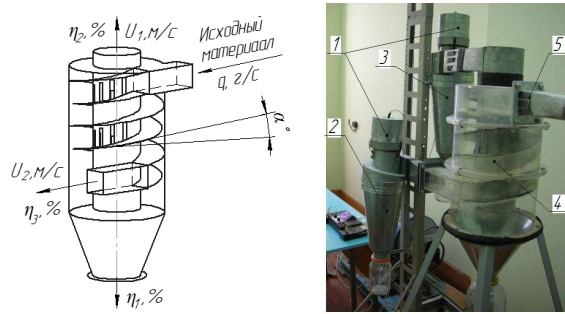


Рис.6 Схема экспериментальной установки:

1 – вентилятор; 2 – циклон-отделитель мелкой фракции; 3 – циклон-отделитель средней фракции; 4 – пневматический винтовой классификатор; 5 – материалопровод.

Коэффициент извлечения η_1, η_2, η_3 (%) характеризуется отношением количества фактически извлеченных частиц Π_n к его количеству в исходной смеси Π_0 и находится по формуле:

$$\eta_{1-3} = (\Pi_n / \Pi_0) 100 \quad (16)$$

В результате изучения конструкций пневмосепарирующих систем и анализа литературы были определены основные факторы, влияющие на эффективность процесса пневмоцентробежной сепарации, априорно и на основании отсеивающих экспериментов выделены наиболее значимые, к которым относятся:

Таблица 1 Уровни и интервалы варьирования факторов эксперимента

Факторы	Условные обозначения	Код	Уровни факторов			Интервал варьирования
			-1	0	+1	
Угол подъема винтовой линии, °	α	X ₁	8	12	16	4
Скорость воздушного потока в осевом патрубке, м/с	U ₁	X ₂	8	10	12	2
Скорость воздушного потока в патрубке пневмоканала, м/с	U ₂	X ₃	5	7	9	2
Нагрузка материала на классификатор, г/с	q	X ₄	26	30	34	4

Поскольку скорость витания частиц продуктов размола зерна после I первой драной системы находится в пределах 0,5-5,5 м/с, то эквивалентный диаметр этих частиц в диапазоне 122-1040 мкм, так частица со скоростью витания $v_0 = 3,5$ м/с имеет эквивалентный диаметр $d_0 = 675$ мкм.

В скалярной форме уравнение (8) будет эквивалентно системе 3-х уравнений:

$$\begin{cases} m \frac{dv_x}{dt} = -2m\omega U_t \cdot \cos \varphi + m\omega^2 r \cdot \cos \varphi - 2m\omega(v_x - U_x) - 3\pi\mu_0 d_0(v_x - U_x) - \xi\pi d_0^2 \rho_c (v_x - U_x)^2 / 8 \\ m \frac{dv_y}{dt} = 2m\omega U_t \cdot \sin \varphi + m\omega^2 r \cdot \sin \varphi - 2m\omega(v_y - U_y) + 3\pi\mu_0 d_0(v_y - U_y) + \xi\pi d_0^2 \rho_c (v_y - U_y)^2 / 8 \\ m \frac{dv_z}{dt} = 3\pi\mu_0 d_0(v_z - U_z) + \xi\pi d_0^2 \rho_c (v_z - U_z)^2 / 8 - mg(\rho_c / \rho_m) + mg \end{cases} \quad (11)$$

Перейдем к безразмерным значениям скоростей \bar{v}' , \bar{U}' и координаты ρ , определяемые соотношениями:

$$U'_r = \frac{U_r}{U_{ax}}; U'_\varphi = \frac{U_\varphi}{U_{ax}}; U'_z = \frac{U_z}{U_{ax}}; v'_r = \frac{v_r}{U_{ax}}; v'_\varphi = \frac{v_\varphi}{U_{ax}}; v'_z = \frac{v_z}{U_{ax}}; \rho = \frac{r}{R_k} \quad (12)$$

Выразив массу частицы через ее плотность и объем, дополнив систему уравнений (11) уравнениями кинематики, после математических преобразований получаем полную систему уравнений. В цилиндрической системе координат:

$$\begin{cases} \frac{d\rho}{d\varphi} = \rho \frac{v'_r}{v'_\varphi} \\ \frac{dv'_r}{d\varphi} = v'_\varphi - 2(v'_r - U'_r) - \frac{\rho}{v'_\varphi} \frac{1}{St_k} (v'_r - U'_r) - K_\xi \frac{\rho}{v'_\varphi} (v'_r - U'_r)^2 \\ \frac{dv'_\varphi}{d\varphi} = \frac{2U'_t}{U_{ax}} - 2(v'_\varphi - U'_\varphi) + \frac{\rho}{v'_\varphi} \frac{1}{St_k} (v'_\varphi - U'_\varphi) + K_\xi \frac{\rho}{v'_\varphi} (v'_\varphi - U'_\varphi)^2 \\ \frac{dv'_z}{d\varphi} = \frac{\rho}{v'_\varphi} \frac{1}{St_k} (v'_z - U'_z) + K_\xi \frac{\rho}{v'_\varphi} (v'_z - U'_z)^2 - \frac{1}{Fr} \frac{\rho}{v'_\varphi} (\rho_c / \rho_m) + \frac{1}{Fr} \frac{\rho}{v'_\varphi} \end{cases} \quad (13)$$

где St_k – число Стокса
 Fr – число Фруда;
 K_ξ – безразмерный параметр определяющий гидравлическое сопротивление частицы:

$$K_\xi = \frac{6R_k \xi \rho_c}{8\rho_m \cdot d_0} \quad (14)$$

Система уравнений (13) с учетом выражения (7) представляет собой математическую модель процесса разделения продуктов размола зерна в пневматическом винтовом канале с радиальными стоками.

Нелинейная система дифференциальных уравнений реализована в программе MATLAB 7.11.0 численным методом Рунге-Кутты 4-го порядка с автоматическим изменением шага с точностью 10^{-6} . Была разработана программа, позволяющая моделировать процесс сепарации частиц различной дисперсности при различных начальных условиях, результаты представлены в графическом виде.

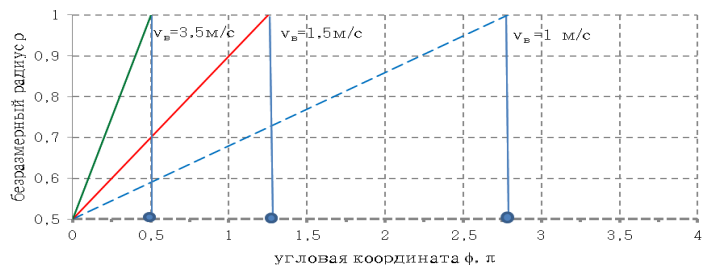


Рис.4 Зависимость радиуса r от ϕ для частиц с различными скоростями витания при $g_0=0,08\text{м}$; $k=0,01$.

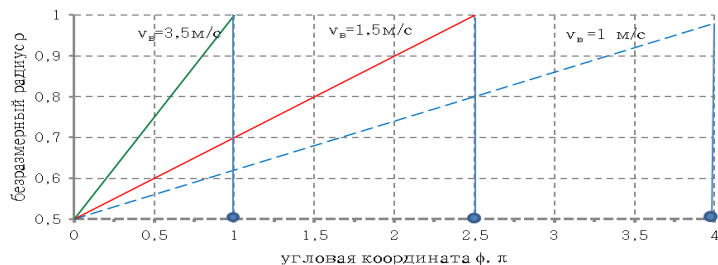


Рис.5 Зависимость радиуса r от ϕ для частиц с различными скоростями витания при $g_0=0,08\text{м}$; $k=0,075\text{м}$

Анализ полученных зависимостей позволил оценить влияние параметра k на траекторию частиц различной дисперсности. При $k=0,01$ частицы со скоростью витания $v_b=3,5\text{м/с}$ достигают стенки образующей пневмоканала при $\phi=\pi/2$; $v_b=1,5\text{м/с}$ при $\phi=5\pi/4$; $v_b=1\text{м/с}$ при $\phi=11\pi/4$. При $k=0,075$ частицы со скоростью витания $v_b=3,5\text{м/с}$ достигают стенки образующей пневмоканала, уже при $\phi=\pi$, $v_b=1,5\text{м/с}$ при $\phi=10\pi/4$, а $v_b=1\text{м/с}$ продолжают движение в границах пневмоканала на рассматриваемом участке.

Полученные результаты позволяют производить расчет траекторий движения частиц с заданными параметрами, при различном соотношения скоростей в осевом и тангенциальном патрубках, для пофракционного вывода полученных фракций.

В третьей главе: «Программа и методика экспериментальных исследований» описаны программа, общие и частные методики экспериментальных исследований, применяемая измерительная аппаратура и оборудование.

Экспериментальные исследования процесса разделения продуктов размола зерна в пневмовинтовом канале с радиальными стоками предусматривали:

- изучение аэродинамических и физико-механических свойств продуктов измельчения зерна;
- разработку и изготовление экспериментальной установки для изучения аэродинамических параметров воздушного потока, влияющих на протекание процесса разделения продуктов размола зерна;
- изучение влияния факторов на процесс разделения в пневмовинтовом канале;
- определение структуры воздушного потока в зоне разделения;
- выбор плана проведения многофакторного эксперимента, установление уровней и интервалов варьирования исследуемых параметров процесса;
- определение рациональных технологических и геометрических параметров процесса разделения продуктов измельчения зерна;
- определение гидравлического сопротивления классификатора;
- проведение производственных испытаний экспериментального образца классификатора.

Задача экспериментальных исследований состояла в подтверждении основных теоретических положений работы, а также для определения оптимальных параметров процесса разделения продуктов измельчения зерна в пневмовинтовом потоке.

Для проведения лабораторных и производственных исследований была разработана экспериментальная установка, смонтированная на кафедре «Механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции» Инженерного института ФГБОУ ВПО Новосибирского государственного аграрного университета (рис.6)

Работа экспериментальной установки осуществляется следующим образом. Исходный материал из бункера с дозатором поступает по материалопроводу 5 через входной тангенциальный загрузочный патрубок в пневматический винтовой классификатор 4, где происходит разделение материала на три фракции, которые выводятся из аппарата и в циклонах-разгрузителях 2,3 отделяются от воздуха.

Регулирование процесса разделения осуществляется изменением скорости воздуха в пневмоканале и осевом разгрузочном патрубке, изменяя частоту вращения роторов вентиляторов 1.

В качестве критерия оптимизации выбран общий коэффициент извлечения η (%), так как пневматический винтовой классификатор осуществляет разделение продуктов измельчения зерна в три робоотборника, то η определяется по формуле: