

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический  
университет имени П.А. Костычева»

**На правах рукописи**



Полякова Анастасия Анатольевна  
**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СМЕСИТЕЛЯ  
КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ КОРМОВ**

**Диссертация**

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Специальность: 05.20.01 - Технологии и средства  
механизации сельского хозяйства

Научный руководитель:  
д.т.н., доцент Д.Е Каширин

Рязань, 2018 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1 Эффективность использования сухих концентрированных кормов в животноводстве.....	10
1.2 Анализ способов и средств смешивания концентрированных кормов.....	12
1.3 Анализ теоретических исследований процесса смешивания концентрированных кормов.....	22
1.4 Цель и задачи исследования.....	30
Выводы.....	31
Глава 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕСИТЕЛЯ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ КОРМОВ.....	32
2.1 Анализ движения сыпучих кормовых смесей в камере смесителя.....	32
2.1.1 Теоретическое исследование движения частиц в смешиваемых твердых фазах.....	36
2.2 Математическая модель процесса смешивания, протекающая в смесителе концентрированных кормов.....	40
2.3 Решение установленного дифференциального уравнения движения вязкой смеси методом сеточных уравнений.....	46
2.4 Уравнение движения потока частиц по лопастям механического активатора.....	56
2.4.1 Определение условий рационального движения механического активатора.....	58
2.5 Схема смесителя концентрированных кормов.....	59
Выводы.....	61
Глава 3 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СМЕСИТЕЛЯ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ КОРМОВ.....	63

3.1 Программа лабораторного исследования.....	63
3.2 Конструкция лабораторной установки смесителя концентрированных кормов с активатором.....	66
3.3 Методика лабораторных исследований смесителя концентрированных кормов.....	71
3.3.1 Методика исследования влияния высоты слоя смешиваемой массы на усилия необходимого для перемещения частиц .....	71
3.3.2 Методика проведения многофакторного исследования параметров смесителя концентрированных кормов.....	73
3.3.3 Методика исследования производительности смесителя концентрированных кормов.....	75
3.3.4 Методика исследования мощности и энергоемкости смесителя концентрированных кормов.....	76
3.3.5 Методика исследования влияния продолжительности смешивания компонентов без использования активатора на коэффициент вариации.....	78
3.3.6 Методика исследования механического активатора на коэффициент вариации. Планирование многофакторного эксперимента.....	80
3.3.7 Методика исследования влияния продолжительности смешивания при использовании активатора на коэффициент вариации.....	83
3.4 Результаты лабораторных исследований смесителя концентрированных кормов.....	83
3.4.1 Результаты исследования усилия необходимого для перемещения зерна внутри зерновой массы.....	83
3.4.2 Результаты исследования производительности лабораторной установки и энергоемкости смешивания при демонтированном активаторе на коэффициент вариации .....	90
3.4.3 Результаты исследования влияния времени смешивания без использования активатора на коэффициент вариации .....	96
3.4.4 Результат исследования параметров механического активатора	

на коэффициент вариации.....	97
3.4.5 Результаты исследования влияния продолжительности смешивания при использовании активатора на коэффициент вариации .....	100
Выводы.....	101
Глава 4 ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СМЕСИТЕЛЯ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ КОРМОВ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ЕГО ВНЕДРЕНИЯ.....	104
4.1 Программа и методика производственных испытаний.....	104
4.2. Результаты производственного испытания смесителя концентрированных кормов.....	108
4.3. Определение стоимости предлагаемого оборудования.....	110
4.4 Расчет показателей экономического эффекта.....	113
Выводы.....	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	121
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	145

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** «Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации», утвержденная Указом Президента Российской Федерации от 30 января 2010 г., предусматривает перевод продовольственного снабжения нашей страны на самообеспечение к 2020 г., а по мясу на 80...85% [24]. Для выполнения требований правительства необходимо активное развитие практически всех отраслей сельского хозяйства, особое внимание уделяется животноводству.

Важнейшим условием развития животноводства является совершенствование процесса кормоприготовления, так как к кормам предъявляется целый ряд требований, выполнение которых необходимо для раскрытия генетического потенциала животных [3, 6, 36, 43, 44].

Известно, что стоимость кормов в животноводстве может достигать 75% от стоимости самой продукции [1, 20, 21]. При этом наиболее дорогими являются концентрированные корма. Учитывая логистику перевозок, которая в значительной мере может удорожать стоимость используемых кормов, а также требования, предъявляемые к хранению готовых концентрированных кормов, в ряде случаев представляется наиболее целесообразным производство кормов непосредственно в хозяйстве [5, 58, 59].

Современные рационы кормления сельскохозяйственных животных предусматривают использование концентрированных кормов в рационе КРС до 30%, при выращивании свиней до 95%, а у птицы до 100%. Большое внимание уделяется сбалансированности готовых кормосмесей, так как получение кормов, включающих весь спектр необходимых для животных питательных веществ, обеспечивает увеличение их продуктивности на 10...15% [10]. Как следствие, снижаются производственные издержки, увеличивается рентабельность производства [84, 85, 86, 87, 88, 144, 146, 150, 153, 154].

Таким образом, обоснование устройств для приготовления концентрированных кормов имеет существенное значение для развития страны.

**Степень разработанности темы.** Совершенствованием процесса смешивания кормов занимались многие известные ученые: В.Г. Артемьев, А.В. Байдов, А.М. Григорьев, А.И. Завражнов, Ю.М. Исаев, С.Г. Карташов, Ю.М. Колпаков, В.В. Коновалов, В.Г. Коба, Г.М. Кукта, В.И. Курдюмов, С.В. Мельников, К.Я. Мотовилов, Ю.В. Назаренко, И.Г. Панин, И.Ф. Сараев, Ф.Г. Стукалкин, В.В. Утолин, С.К. Филатов, В.Ю. Фролов, В.Д. Хмыров, Вохер, Т.А. Oxley, A. Peterson и др.

Известно, что смесители шнекового типа имеют свои явные преимущества, в частности простота конструкции обеспечивает высокую техническую надежность. Относительно невысокая энергоемкость процесса смешивания в сочетании с эксплуатационными преимуществами обеспечили широкое распространение данного типа смесителей.

Несмотря на явные преимущества шнековых смесителей, качество получаемой смеси не всегда отвечает предъявляемым требованиям, поскольку данный класс смесителей требует хорошей сыпучести смешиваемых компонентов. В связи с этим снабжение шнековых смесителей дополнительными рабочими органами, позволяющими устранить имеющиеся недостатки, представляется вполне актуальным.

Анализ известных исследований показал, что недостаточно исследован вопрос влияния механического активатора лопастного типа, устанавливаемого на выходе из шнека, на процесс смешивания концентрированных кормов.

Работа выполнена по плану НИР ФГБОУ ВО РГАТУ на 2010-2013 гг. по теме 8 «Повышение эффективности эксплуатации электрооборудования, систем электроснабжения и автоматизация потребителей» (№ гос. рег. 01201174435), а так же 2016-2018 гг. по теме 3 «Совершенствование технологий, средств механизации, электрификации и технического сервиса в сельскохозяйственном производстве» (№ гос. рег. АААА – А16 – 116060910025 - 5).

**Цель исследований.** Обоснование параметров смесителя концентрированных кормов.

Для решения поставленной цели определены следующие **задачи исследования:**

1. Провести анализ смесителей концентрированных кормов.
2. Теоретически и экспериментально обосновать параметры смесителя концентрированных кормов, снабженного механическим активатором.
3. Разработать смеситель концентрированных кормов, снабженный механическим активатором.
4. Испытать смеситель концентрированных кормов в производственных условиях и оценить его технико-экономический эффект.

**Объект исследований.** Влияние параметров механического активатора на смешивание компонентов концентрированного корма в смесителе.

**Предмет исследований.** Теоретические и экспериментальные закономерности, связывающие параметры смесителя с энергетическими показателями и коэффициентом вариации, характеризующим приготавливаемую смесь.

**Научная новизна** диссертационной работы:

1. Теоретические зависимости показателей работы смесителя концентрированных кормов от его параметров.
2. Экспериментально установленные эмпирические модели энергоемкости и коэффициента вариации приготовления кормов в смесителе.
3. Результаты испытания смесителя концентрированных кормов, снабженного механическим активатором, в производственных условиях и оценка его технико-экономического эффекта.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Установлены аналитические и экспериментальные зависимости, позволяющие определять параметры смесителя концентрированных кормов с активатором, влияющие на производительность и энергоемкость. Разработан смеситель концентрированных кормов, содержащий бункер для смешиваемых сыпучих компонентов, шнек и механический активатор, воздействующие на зерновой поток. Новизна конструкции защищена патентом на полезную модель № 166266.

**Методология и методы исследований.** Теоретические исследования выполнены на основе методик теоретической механики, прикладной теории гидродинамики, термодинамики и физики.

Экспериментальные исследования проводили в соответствии с известными методиками планирования и проведения эксперимента. Для постановки опытов использовали сертифицированное оборудование. Статистическая обработка опытных данных производилась с помощью ПЭВМ в среде программы MathCAD.

**Положения, выносимые на защиту:**

- аналитическая модель влияния параметров смесителя на смешивание концентрированных кормов;
- экспериментальные зависимости влияния параметров смесителя на коэффициент вариации получаемой смеси и энергоемкость процесса смешивания;
- результаты производственных испытаний и технико-экономические показатели смесителя кормов.

**Степень достоверности результатов исследований.** Достоверность результатов исследования базируется на основании применения методик, соответствующих требованиям ГОСТов 13496.4-93, 13496.0-80, 13586.5-2015, сертифицированного поверенного контрольно-измерительного оборудования, сходимостью теоретических и экспериментальных исследований, составляющей 93,5%. Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, согласуются с результатами, опубликованными в независимых источниках по теме исследования, и прошли широкую апробацию в печати, на международных и всероссийских научно-практических конференциях.

**Реализация результатов исследований.** Результаты исследований внедрены в ООО "Ока Молоко" Шацкого района Рязанской области и АО "Октябрьское" Пронского района Рязанской области. Результаты исследования могут быть использованы проектными и научно-исследовательскими организациями для проектирования и совершенствования конструкций смесителей концентрированных кормов.



**Вклад автора в решение поставленных задач** состоит в разработке и формировании цели работы, определении направлений теоретических и экспериментальных исследований, установлении принципиальных методологических и методических положений, организации и проведении комплексных исследований.

#### **Апробация результатов исследований.**

Основные результаты выполненной работы обсуждены на международных научно-практических конференциях «Инновационные технологии и средства механизации в растениеводстве и животноводстве»; «Научное сопровождение инновационного развития агропромышленного комплекса: теория, практика, перспективы» (Рязанского ГАТУ, 2011, 2014, 2017, 2018 гг.); «Инновационные направления развития технологий и технических средств механизации сельского хозяйства» (Воронеж, 2015 г.); «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки» (Южно-Уральский ГАУ", 2016 г.).

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в печати в 10 научных работах, из них 5 статей в журналах, включенных в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук», получен 1 патент РФ на полезную модель. Общий объем публикаций составит 3,6 п.л., из которых 3,1 п.л. приходится на долю автора.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 144 страницах машинописного текста и содержит 8 таблиц, 46 рисунков и 7 приложений. Список литературы включает 166 источников.

# ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## **1.1 Эффективность использования сухих концентрированных кормов в животноводстве**

Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации на период до 2020 г. намечен постепенный переход сельского хозяйства нашей страны на самообеспечение как со стороны производства машин и оборудования, так и со стороны компонентов производственного и технологического цикла, в частности кормов [24].

Одно из важнейших направлений, обеспечивающих выполнение ключевых элементов, обозначенных в доктрине, направлено на разработку собственных конструкций смесителей концентрированных кормов [10]. Эффективно развивать сельское хозяйство нашей страны возможно путем активного внедрения интенсивных технологий выращивания сельскохозяйственных животных [155]. Современные интенсивные технологии выращивания сельскохозяйственных животных построены на основе кормления животных концентрированными кормами.

К современным концентрированным кормам предъявляется ряд инновационных требований. Корма должны содержать все необходимые для роста и развития организма животного питательные вещества, при этом должны иметь возможность длительно храниться, легко дозироваться [12].

Известно, что в сложившихся экономических условиях наиболее рентабельным представляется приготовление концентрированных кормов в условиях хозяйства. Производить отдельные виды зерна и приготавливать на их основе высококачественные обогащенные виды корма гораздо дешевле, чем закупать готовые корма, а также тратить средства на транспортировку закупленных кормов [19, 23].

Для приготовления смесей концентратов в условиях хозяйства нет необходимости использовать дорогостоящее металлоемкое и высокопроизводительное оборудование. Наиболее приемлемым, исходя из экономических и эксплуатационных соображений, представляется использование небольших кормоприготовительных комплексов оборудования [28].

Для приготовления концентрированных кормов в условиях хозяйства наиболее перспективной представляется упрощенная схема кормоприготовления [33]. Схема кормоприготовления сводится к последовательному выполнению нескольких технологических операций:

- накопление и хранение компонентов кормосмеси;
- дозированная подача компонентов на смешивание;
- смешивание.

Таким образом, основной операцией практически любой из современных технологий кормоприготовления является смешивание.

К современным смесителям предъявляется большое количество разнородных требований [35]:

- смесь кормов может приготавливаться из нескольких десятков компонентов;
- кормосмесь может быть обогащена микродобавками, концентрация которых может достигать 0,001%.
- необходимо обеспечить приготовление смеси, требования которой отвечают требованиям коэффициента вариации для различных видов животных.

Большое количество требований предъявляется также и непосредственно к самим конструкциям смесителей [21, 22]:

-смесители должны обладать высокой технической надежностью, позволяющей эксплуатировать их на протяжении нескольких лет в тяжелых эксплуатационных условиях (при отрицательных и положительных температурах, а также при высокой влажности воздуха);

- смесители должны при необходимости быстро изменять производительность;

- смесители должны иметь широкую универсальность (обеспечивать приготовление кормов по различным рецептурам);
- смесители не должны измельчать смешиваемые корма и нарушать макроструктуру компонентов;
- смесители не должны вызывать порчу кормов;
- смесители должны иметь высокие эргономические свойства.

Для использования в условиях мелкого и среднего хозяйства наиболее приемлемыми оказываются две следующие схемы кормоприготовления:

- прямочная (при непосредственной подаче компонентов кормосмеси на смешивание);
- последовательно-параллельная, заключающаяся в подготовке всех видов корма к смешиванию и однократное дозирование.

Современный рынок кормоприготовительного оборудования вполне насыщен смесителями, в том числе зарубежного производства, при этом весьма высокой остается стоимость оборудования, часто недоступная для большинства мелких производителей. В связи с этим представляется вполне оправданным производство российских смесителей, доступных по цене.

## **1.2 Анализ способов и средств смешивания концентрированных кормов**

Современные рационы кормления сельскохозяйственных животных с одной стороны должны быть высококалорийными и насыщенными питательными веществами, а с другой стороны не должны вызывать заболеваний животных. Поэтому предусмотрено производство концентрированных кормов как в жидком и полужидком состоянии, так и в тестообразном и сухом рассыпчатом. Безусловно, что в настоящее время выпускаются смесители для каждого вида корма, имеется также ряд универсальных устройств. С позиций производства наиболее технологичным видом концентрированных кормов являются сухие рассыпчатые концентрированные корма, так как они имеют ряд преимуществ [76]:

- кормосмесь может длительное время сохраняться без порчи;
- возможно, использовать различные по плотности компоненты;
- приготовленный корм обладает хорошими технологическими свойствами.

Исследованию процесса смешивания посвящены работы многих известных как российских, так и зарубежных ученых. Совершенствованием процесса смешивания кормов занимались многие известные ученые: В.Г. Артемьев, А.В. Байдов, А.М. Григорьев, А.И. Завражнов, Ю.М. Исаев, Ю.М. С.Г. Карташов, Колпаков, В.В. Коновалов, В.Г. Коба, Г.М. Кукта, В.И. Курдюмов, С.В. Мельников, К.Я. Мотовилов, Ю.В. Назаренко, И.Г. Панин, И.Ф. Сараев, Ф.Г. Стукалкин, В.В. Утолин, С.К. Филатов, В.Ю. Фролов, В.Д. Хмыров, Voxer, T.A.Oxley, A. Peterson и др.

Смесители, которые выпускаются промышленностью, имеют большое разнообразие конструкций, различающихся как по назначению, так и принципу действия. В связи с вышесказанным, весьма затруднительным представляется классификация смесителей, основанная на одном принципиальном отличии. На наш взгляд наиболее рациональным представляется более сложная классификация данной группы устройств, основанная на ряде конструктивно-технологических показателей [38, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97].

В соответствие с существующими схемами смешивания, смесители можно разделить на устройства непрерывного действия и периодического [67]. Смесители периодического действия, как правило, имеют меньшую удельную производительность, то есть производительность, отнесенную к массе самого устройства [155]. Энергоемкость таких устройств, как правило, выше, чем у смесителей непрерывного действия, так как ограниченный объем корма циркулирует внутри устройства многократно. При этом значительно проще получить высокое качество кормосмеси и обеспечить точность дозирования компонентов и равномерность распределения по всей массе концентрированного корма микродобавок, количество которых в смеси не превышает одного процента [52].

Смесители непрерывного действия, как правило, имеют большую удельную производительность. Качество приготавливаемой кормосмеси в смесителях непрерывного действия также несколько хуже, так как ограничено время взаимодействия компонентов смеси, что ограничивает возможности использования микродобавок. Анализируя достоинства и недостатки смесителей непрерывного и периодического действия, можно заключить, что смесители непрерывного действия пригодны для использования при больших объемах производства, когда требования к коэффициенту вариации кормов имеют широкий диапазон [53]. Смесители периодического действия целесообразно применять при необходимости соблюдения высоких требований к приготавливаемой кормосмеси.

Традиционными критериями оценки эффективности использования смесителя являются:

- возможность смешивания кормов различной влажности;
- коэффициент вариации получаемых кормосмесей;
- энергоёмкость процесса кормоприготовления;
- эргономичность;
- возможность быстрого изменения параметров технологического процесса;
- возможность проведения термической обработки корма во время кормоприготовления;
- высокая техническая надежность.

Смесители, как правило, представляют собой вращающуюся или неподвижную рабочую камеру (бункер), внутри которой расположены вращающиеся или неподвижные рабочие органы (шнек или лопастные мешалки). Сам корпус изготавливают различной геометрической формы и размеров. Известны устройства с прямоугольными и цилиндрическими корпусами, а также корпусами различной степени уплощения, близкой к эллипсоиду. Смесители с вращающимся рабочим корпусом проводят перемешивание практически всего объема содержащейся в нем смеси. Режим работы смесителя с вращающимся корпусом имеет свои явные преимущества [37, 104]:

-компоненты приготавливаемого корма значительно меньше взаимодействуют с рабочими органами, а, следовательно, практически не измельчаются;

-внутри смесительной камеры не создаются застойные зоны, а как следствие, бункер смесителя остается практически чистым, что в конечном итоге повышает качество приготавливаемой кормосмеси.

Особенностью смесителей с вращающимся корпусом является относительно невысокая производительность, так как для эффективной работы данного класса устройств требуется наличие свободного места внутри смесительного бункера около 15...20% его объема. Конструкция смесителя, построенного на основе вращающегося корпуса, представляется весьма сложной, так как требуется вращать большие массы как самого корпуса, так и загруженного в него объема корма. Привод таких смесителей должен обеспечивать высокие мощностные характеристики. Предъявляются особые требования к рабочей площадке, на которой устанавливается смеситель такого типа. Необходимо исключить воздействие корпуса на обслуживающий персонал, что также требует изготовления разного рода защитных ограждений [16, 25, 140].

Смесители, имеющие неподвижный корпус, как правило, снабжены вращающимися валами, на которых расположены рабочие органы. Известны конструкции смесителей, построенные на основе одного, двух, трех, четырех и шести рабочих валов. При этом и способ расположения валов также оказывает значимое влияние, как на процесс смешивания, так и на конструктивные особенности самих смесителей. Устройства с вертикальным или наклонным расположением валов, как правило, используют для объединения нескольких технологических функций, например дозированную выдачу. Смесители, построенные на основе одного рабочего вала, отличаются большими габаритными размерами и низкой производительностью [142, 143].

Существенным отличием конструкций смесителей является также скорость вращения рабочих органов. На основании этого критерия смесители разделяют на быстроходные и тихоходные [145].

Снижение энергоемкости процесса смешивания возможно за счет перемещения потоков зерна под действием силы тяжести, реализуемое в гравитационных смесителях [149]. Процесс таких устройств заключается в том, что несколько видов сыпучих компонентов корма под действием силы тяжести истекают внутри смесительной камеры, при этом потоки компонентов соприкасаются с пассивными рабочими органами. Происходят множественные завихрения, нарушаются скорости движения потоков зерна, что приводит к их взаимопроникновению. Для обеспечения эффективной работы таких устройств требуются большие габаритные размеры смесительной камеры. Рассматриваемый класс устройств отличается низкими удельными затратами энергии и невысоким качеством приготавливаемой смеси.

Известен ряд способов улучшения рабочего процесса гравитационных смесителей. Использование вибрации сыпучей массы при ее истечении под действием силы тяжести в ряде случаев приводит к значительному улучшению качества приготавливаемой смеси. Иногда гравитационные смесители дополнительно снабжают активными рабочими органами, что, по мнению разработчиков, также значительно повышает коэффициент вариации приготавливаемой кормосмеси.

Разработаны смесители, позволяющие обрабатывать зерновую массу сжатым воздухом перед смешиванием. Такая обработка изменяет величину трения внутри сыпучей среды, что в свою очередь приводит к изменению характера взаимодействия сыпучих потоков корма при их извлечении, частицы разнородных компонентов активнее проникают в массу друг друга, что в конечном итоге значительно улучшает коэффициент вариации приготовленной смеси [108].

Смеситель периодического действия, как правило, представляет собой емкость для смешивания, внутри которой расположены рабочие органы. Известно, что эффективность смешивания зависит от формы и геометрических размеров корпуса смесителя, а также конструкции рабочих органов. При этом корпус может быть как неподвижным, так и вращающимся [155].



Наиболее распространенной конструкцией смесителя периодического действия является порционный смеситель СМ-2, представленный на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Общий вид смесителя СМ-2

Он содержит цилиндрический бункер, внутри которого вертикально расположен вал с лопастями, внизу на вал насажен шкив ременной передачи, который приводится от асинхронного электродвигателя, мощностью 3 кВт. Достоинством конструкции является явная простота, а как следствие и высокая механическая надежность. В качестве недостатков можно отметить то, что дозирование смешиваемых компонентов осуществляется вручную, технологический процесс весьма энергоемкий, да и выгрузка приготовленной смеси требует дополнительных усилий от обслуживающего персонала.

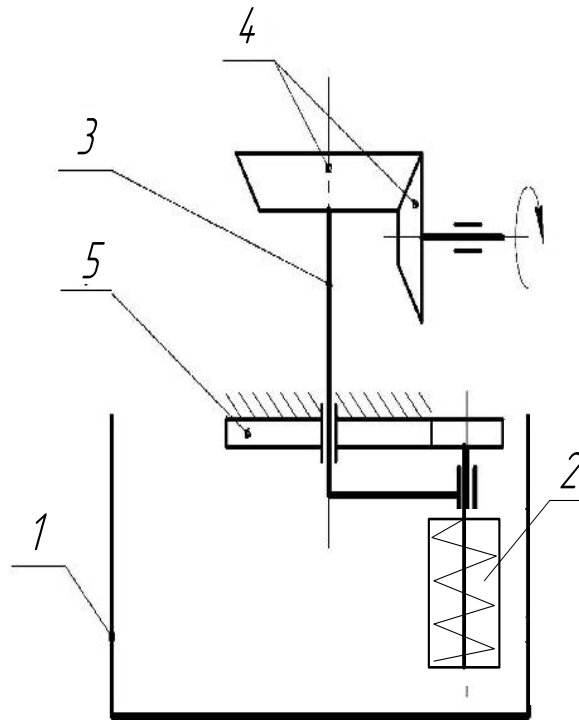
Данная конструкция является смесителем периодического действия, в связи, с чем процесс обогащения приготавливаемого концентрированного корма премиксами может значительно увеличить продолжительность смешивания. Для перемешивания продуктов с такими свойствами разработали смесители планетарного типа, например СПШ/20 [152].

Процесс смешивания в смесителях планетарного типа осуществляется, как правило, шнеком или лопастными мешалками. Общий вид смесителя СПШ/20,

представлен на рисунке 1.2 а. Конструкция привода (рисунок 1.2 б) такова, что заставляет шнек совершать сложное движение.



а



б

1 – смесительный бункер; 2 – шнек; 3 – водило;

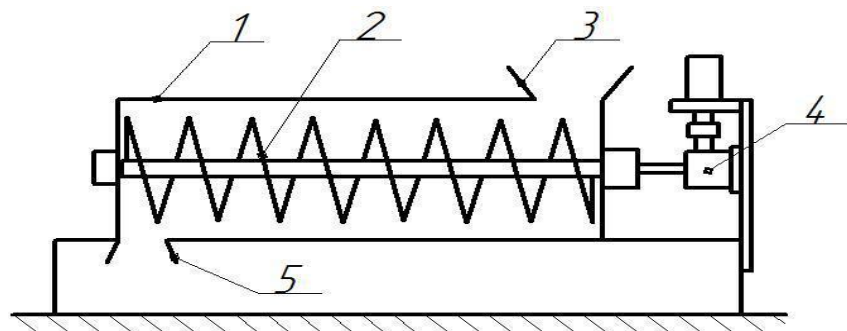
4 – шестерни; 5 – шестерня закрепленная неподвижно в рабочем бункере

Рисунок 1.2 – Общий вид (а) и кинематическая схема (б) планетарно - шнекового смесителя СПШ/20

Шнек одновременно перемещается по траектории, копирующей внутреннюю поверхность бункера, и при этом вращается. За счет вращения содержимое бункера перемещается снизу наверх и подвергается сложному нагружению. При этом комки, находящиеся в перемешиваемой массе, разрушаются. Стенки смесительного бункера имеют форму конуса, что заставляет содержимое бункера непрерывно перемещаться вверх вниз, при этом плотность приготавливаемой смеси выравнивается. За счет сложной работы мешалки

увеличивается коэффициент вариации смеси, разрушаются комки. К недостаткам данной конструкции можно отнести некоторую сложность при изготовлении привода рабочего органа. Смеситель рассматриваемого вида, как правило, имеет небольшие габаритные размеры [148].

Если смешиваемые компоненты близки по плотности и гранулометрическому составу, а к качеству смеси не предъявляются особые требования, наиболее целесообразным представляется применение простого шнекового смесителя (рисунок 1.3).



- 1 – корпус шнека; 2 – шнек; 3 – загрузочная горловина; 4 – электродвигатель и понижающий редуктор;  
5 – выгрузная горловина

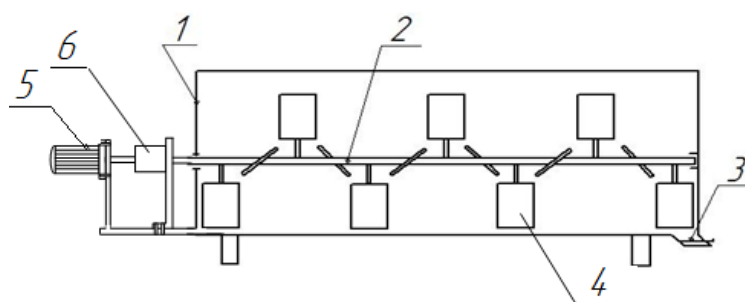
Рисунок 1.3 – Схема одновального шнекового смесителя

Шнековые смесители представляются наиболее простыми в изготовлении и эксплуатации. Получить высокое качество смеси в шнековом смесителе не всегда возможно, так как шнек хорошо выполняет функцию транспортирования, при этом масса корма транспортируется как бы порциями, поочередно, а смешивание осуществляется не достаточно активно. Во время транспортирования происходит трение корма о навивку шнека и вал, поэтому улучшить качество смеси, возможно, путем увеличения длины шнека. Существует ряд и других известных способов, позволяющих улучшить качество приготавливаемой смеси, в частности изготовление сегментной или перфорированной навивки, установка на одном валу навивки под разными углами атаки, размещение в одном корпусе нескольких

шнеков, которые транспортируют продукт как в одну, так и в противоположные стороны [147].

Достоинством шнековых смесителей является возможность совмещения процессов смешивания с процессом запаривания или процессом измельчения компонентов приготавливаемого корма. Наилучший эффект дает совмещение шнека с различного вида установками активации смешивания [26].

Лопастные смесители, конструкция которых в общем виде представлена на рисунке 1.4, отличаются от шнековых несколько большей эффективностью, что позволяет изготавливать их более компактными.



- 1 – смесительный бункер; 2 – вал;  
3 – выгрузная горловина; 4 – смешивающие лопасти;  
5 – электродвигатель; 6 – редуктор

Рисунок 1.4 – Схема лопастного смесителя

Достоинством ряда лопастных смесителей является так же возможность изменения параметров конструкции, в частности установка смешивающих лопаток под разными углами атаки и изменение их площади и формы, что позволяет смешивать сыпучие материалы и жидкость как высокой, так и небольшой плотности.

Практический интерес представляет возможность обогащения концентрированных кормов жировыми компонентами или мелассой и равномерное распределение этих добавок по всему объему корма. Наибольшей эффективностью смешивания обладают смесители, имеющие два лопастных вала, создающих встречные потоки корма, что обеспечивает возможность смешивания

кормов со сложной геометрией и физическими свойствами. Поэтому в настоящее время производится большое количество различных лопастных смесителей: С-7(12),(30); МСН и т.д. Для смешивания и одновременного запаривания выпускаются следующие модели: С-2(7),(12);СКЦ-Ф-3. Для обогащения сыпучих смешиваемых кормов жидкими добавками производят смесители серий: НРВ; НСН; РМ; VKL [61].

На рисунке 1.5 приведена предложенная нами классификация смесителей по виду рабочих органов и рабочему процессу [155, 156, 157, 158, 159, 160].

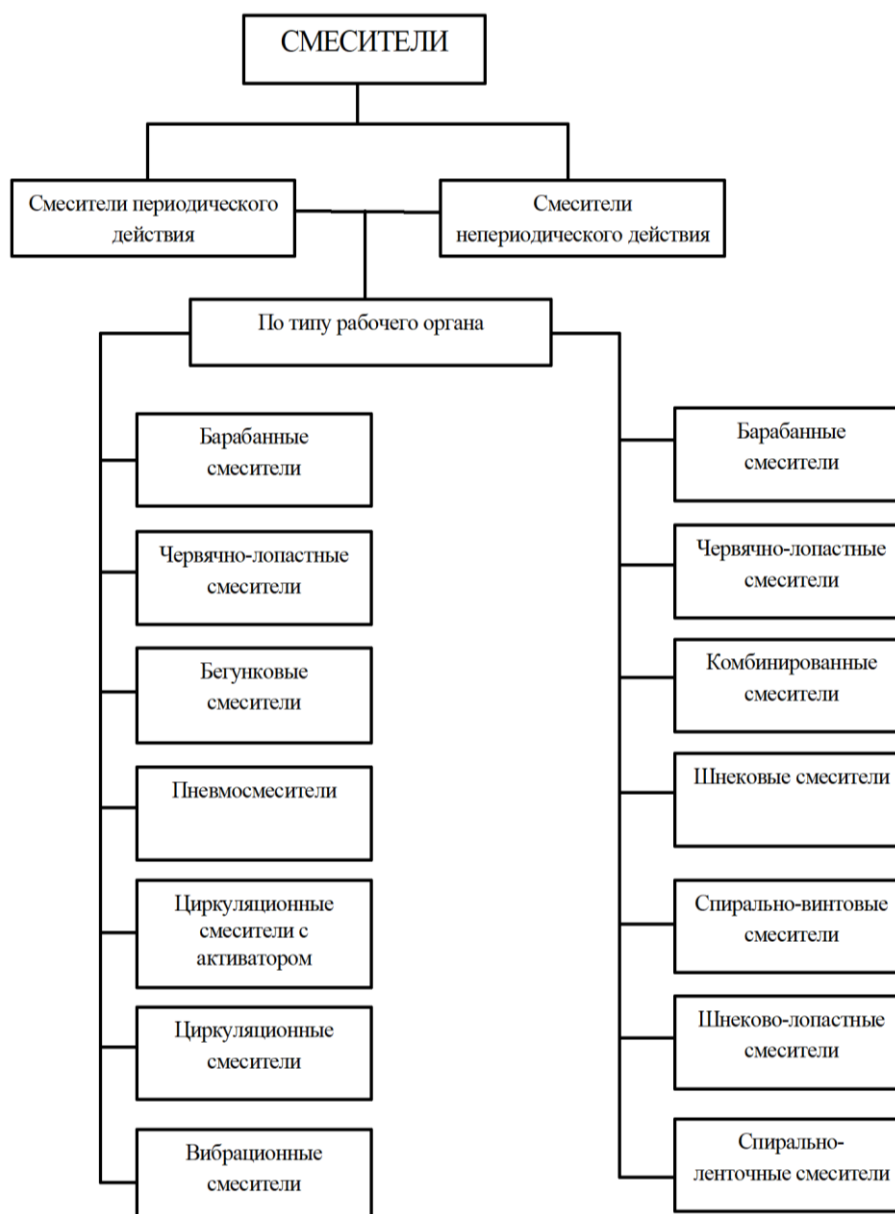


Рисунок 1.5 – Классификация смесителей по виду рабочих органов и рабочему процессу

К общим недостаткам существующих смесителей относятся: горизонтальное расположение шнека, сложность конструкции и громоздкость. Исходя из анализа выше изложенных конструкций смесителей, можно сделать вывод, что для смешивания концентрированных сыпучих кормов в условиях малых животноводческих ферм, наиболее предпочтительно использовать шнековый смеситель вертикального типа. Именно такая конструкция смесителя обеспечит высокий коэффициент вариации и минимизирует энергоемкость установки за счет большей площади смешивания.

### **1.3 Анализ теоретических исследований процесса смешивания концентрированных кормов**

Смешивание нескольких сыпучих компонентов концентрированного корма – весьма сложный физико-механический процесс, в результате которого необходимо получить равномерное распределение частиц, различных по гранулометрическим свойствам, массе и состоянию поверхности в каждой «точке объема». Во время смешивания происходят сложные процессы передвижения частиц в сыпучих или жидких массах под действием внешних сил. Перемещение частиц сыпучих компонентов происходит как внутри, так и на поверхности смешиваемой массы. Имеют место быть процессы падения и полета смешиваемых частиц. В смесителях происходят сложные процессы взаимного проникновения и сегрегации, являющиеся антагонистами [32, 42, 54]. В связи с вышесказанным, подходы к процессу смешивания часто разнятся. Существует множество теорий, описывающих как процесс смешивания, так и параметры рабочего процесса смесительных устройств. Ключевыми показателями при приготовлении любой смеси является её количество и качество. Для оценки качества приготавливаемой смеси существует ряд показателей. Одним из наиболее распространенных показателей, позволяющим определить качество смеси путем взятия проб, является коэффициента вариации [27]. Принимая во внимание, что смесь готовится из нескольких компонентов, количество которых может отличаться

множественно, наиболее целесообразным представляется экспериментальная оценка коэффициента вариации и сравнение с некоторым теоретически возможным идеалом. Коэффициент вариации смеси [49, 30] оценивают как среднеквадратическое отклонение по следующим формулам:

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - p)^2}{n-1}}, \quad (1.1)$$

$$\sigma_{\mathcal{E}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}{n-1}}, \quad (1.2)$$

где  $x_i$  – массовая доля анализируемого компонента в исследуемой пробе.

$p$  – количество анализируемого компонента (в идеальном теоретически возможном случае).

$n$  – количество проб, забираемых при проведении исследований.

$x_{cp}$  – величина показателя, вычисляемая в результате определения среднеарифметического значения анализируемого компонента во всех исследуемых пробах.

Весьма объективную оценку качества приготовленной смеси может дать так же и критерий неоднородности, в значительной степени схожий с формулой [64]:

$$v = \frac{p \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n \frac{x_i - p}{n-1}}{100}}}{100}, \quad (1.3)$$

В процессе поиска наилучшего режима смешивания необходимо стремиться к минимизации величины данного критерия; если его значение составляет менее 20 единиц, можно сделать заключение о соответствии качества практически любой кормосмеси зоотехническим требованиям [64].

Удобной для практического применения при проведении анализов является формула, позволяющая определить степень коэффициента вариации в лабораторных условиях [50]. Анализ качества смеси основан на анализе концентрации смешиваемых компонентов в исследуемой пробе:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \frac{B_i/B_0}{n}, & B_i < B_0 \\ \sum_{i=1}^n \frac{2-B_i/B_0}{n}, & B_i > B_0 \end{cases} \quad (1.4)$$

где  $B_i$  – содержание компонента смеси в исследуемой  $i$ -й пробе смешенного продукта, %.

$B_0$  – «эталонная» доля содержания компонента, %.

$n$  – количество выполняемых испытаний (отобранных для исследования проб).

Для обеспечения высокого уровня достоверности полученных данных необходимо отбирать большое количество проб из различных участков приготовленной смеси, а так же обеспечить многократную повторность отбора проб.

Так, Кукта рекомендует отбирать не менее пяти проб из различных участков готовой смеси и обеспечивать пятикратную повторность каждой пробы [68].

В случае приготовления многокомпонентной смеси и существенной разнице количества компонентов по массе, степень коэффициента вариации приготовленной смеси, возможно, определить, выполнив расчет по формуле [66]:

$$\theta = \frac{\Phi_0(z_i)}{\Phi_0(z-3z)}, \quad (1.5)$$

где  $\Phi_0$  – значение функции Лапласа величины нормативных факторов.

$z$  – величина диапазона, предусматривающая рамки допустимого отклонения.

В производственных условиях степень коэффициента вариации кормовой смеси  $\lambda$ , % можно оценить по величине коэффициента вариации [26]. Коэффициент вариации смеси выражается формулой:

$$\lambda = 100 - \lambda, \quad (1.6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент вариации, %.

Коэффициент вариации  $\lambda$ , % определяется следующим выражением:

$$\lambda = \frac{100 \cdot \sigma}{B_{cp}} \quad (1.7)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение содержания контрольного компонента в смеси.

$B_{cp}$  – среднее арифметическое содержание контрольного компонента, найденное экспериментально, %.



Значение среднеквадратического отклонения [69, 70, 71] находится из выражения:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{(B_i - \bar{B})^2}{n-1}}, \quad (1.8)$$

где  $B_i$  – содержание контрольного компонента в  $i$ -й пробе, %.

В качестве контрольного компонента обычно берут компонент с меньшей массовой долей в смеси. Пробы берут с разных участков объема готовой смеси в количестве не менее 5 проб с каждого участка. При анализе сухих смесей с относительной влажностью не более 17%, в частности комбикормов, рекомендованная масса пробы составляет 2-5 г [17].

Принимая во внимание, что основным свойством относительной частоты вероятности является устойчивость, для обеспечения достоверности анализа качества смеси необходимо обеспечить большую повторяемость взятия проб [127].

Подытоживая основные аналитические методики определения качества приготовленной смеси кормов, необходимо отметить, что цель смешивания – это приготовление продукта, отвечающего зоотехническим требованиям. Для каждого вида животных предусмотрены свои требования к кормовой смеси. Рекомендации в более общем виде предусматривают оценку качества готовой смеси как процентное отношение количества исследуемого компонента в пробе корма к «идеальному значению» того же компонента, указанному в рецептуре. Если  $\lambda$  превышает 92%, смесь считается хорошей, при величине  $\lambda$  менее 85% качество смеси считается плохим, при величине  $\lambda$ , находящейся в диапазоне 85% - 92%, смесь считается удовлетворительного качества [65].

Конструкции промышленно выпускаемых смесителей прошли определенный период «технической эволюции» и имеют довольно ограниченный набор рабочих органов. Расчет конструктивно-технологических параметров отличается некоторой консервативностью подхода [15, 16, 20, 31].

Важнейшим параметром любого смесителя, определяющим соотношение его габаритных размеров и мощностных характеристик, является производительность или пропускная способность. Для определения возможных

значений производительности смесителя с ленточным шнеком предложена формула [137]:

$$Q_{max} = \pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot n \cdot S \cdot \rho \cdot \psi, \quad (1.9)$$

где  $D$  – внешний диаметр навивки шнека, м.

$d$  – диаметр трубы, на которой закреплена навивка шнека, м.

$n$  – частота вращения шнека,  $c^{-1}$ .

$S$  – шаг установки навивки ленточного типа на шнеке, м.

$\rho$  – усредненная величина объемной массы смешиваемых компонентов,  $кг/м^3$ .

$\psi$  – коэффициент, учитывающий степень заполнения свободного пространства шнека продуктом.

В.В. Коновалов для более точного расчета производительности шнекового смесителя, предложил следующую формулу [51]:

$$Q_{min} = 0,25 \cdot 3,14 \cdot (D^2 - d^2) \cdot \omega \cdot r_c \cdot \rho \cdot \psi \cdot \sin \alpha_c \cdot (\cos \alpha_c - f \cdot \sin \alpha_c), \quad (1.10)$$

где  $\omega$  – угловая скорость рабочего вала шнека,  $м/с$ .

$r_c$  – средний радиус ленточного шнека, м.

$\alpha_c$  – средний угол развертки винта, рад.

$f$  – коэффициент трения смеси по шнеку.

В том случае, когда шнек является сегментированным, то есть имеет характеристики близкие к лопастному смесителю, производительность целесообразно определять по следующей формуле [4, 56]:

$$Q_{л} = \frac{3600 R_{л}^2 k_{в} \omega_{л} \cos \alpha (Z_1 - Z_2) \sin \beta}{2} \varphi_{н}, \frac{м^3}{с} \quad (1.11)$$

где  $Z_1, Z_2$  – число лопастей в пределах одного шага соответственно с положительным и отрицательным углами установки, шт.

$k_{в}$  – коэффициент обратного перемещения смеси, равный 0,68...0,75.

$\beta$  – угол подъема корма по винтовой линии, образуемой лопастями ( $\beta = \frac{t}{2\pi R_{л}}$ ),

град.

$t$  – шаг винта лопастей, м.

Производительность смесителя, использующего в качестве рабочих органов лопастные мешалки, возможно, определить по формуле [138]:

$$Q_{л} = \frac{D^2 S n \rho \varphi_H}{8}, \frac{кг}{с} \quad (1.12)$$

где  $n$  – частота вращения лопастей,  $с^{-1}$ .

$\varphi_H$  – коэффициент заполнения пустот в емкости шнековой камеры.

Р.Л. Зенков исследовал свойства зерновой массы и на основании полученных результатов предложил проводить расчет наклонно расположенного шнека по следующей формуле [34]:

$$Q = 48 \cdot n_{в} \cdot S_{в} \cdot \rho \cdot h^2 \sqrt{\frac{D_{в}}{h} - 1}, \quad (1.13)$$

где  $n_{в}$  – частота вращения вала шнека, об/мин.

$S_{в}$  – шаг шнековой навивки, м.

$\rho$  – объемная масса транспортируемых сыпучих компонентов,  $кг/м^3$ .

$h$  – толщина слоя перемещаемого продукта, м.

$D_{в}$  – диаметр навивки, м.

Толщина слоя продукта определяется по следующей формуле:

$$h = D_{в} - L_{вт} \cdot tg(\beta + a_{об}), \quad (1.14)$$

где  $\beta$  – угол расположения оси шнека относительно плоскости горизонта, град.

$a_{об}$  – угол, при котором происходит обрушение сыпучей массы (условно допускается, что величина угла равна коэффициенту внутреннего трения), град.

$L_{вт}$  – дистанция между ближайшими точками, расположенными на краю навивок двух соседних шнеков, м.

По данным некоторых исследований, формулой, наиболее близкой к реально полученным результатам, является формула В.Г. Кобы [45].

Формула, определяющая производительность как производную от восьми переменных, позволяет учесть изменение параметров переменной массы от угла наклона шнека, коэффициента его заполнения и прочих конструктивных особенностей [78]:

$$Q_{ш} = 0,105 \cdot S \cdot n \cdot \psi \cdot k \cdot \left[ \frac{R_0^2 - r^2}{2} - c^2 - 2 \frac{m \cdot c \cdot R_0 \cdot r}{c^2 + R_0 \cdot r} \cdot (R_0 - r) \right], \quad (1.15)$$

где  $S$  – шаг витка шнековой навивки, м.

$n$  – частота вращения шнека, об/мин.

$\psi$  – коэффициент заполнения кожуха шнека.

$k$  – усредненная величина объемной массы материала, кг/м<sup>3</sup>.

$R_0$  – радиус навивки шнека, м.

$r$  – радиус вала, на котором закреплена навивка шнека, м.

$m$  – показатель, выражающий значение трения смешиваемых компонентов о материал рабочего органа (шнека).

$c = \frac{S}{2\pi}$  – площадь сектора, образуемого в результате вращения шнека на один радиан, м.

Наряду с производительностью, одной из важнейших характеристик, описывающих процесс смешивания, является его продолжительность – период времени, по истечению которого смесь достигает заданного качества. Поскольку продолжительность течения физических процессов, протекающих при перемешивании сыпучих масс, в значительной степени зависит от скорости движения взаимодействующих потоков, выразить длительность смешивания возможно, приняв во внимание скорости воздействия рабочих органов на зерновую массу, по следующей формуле[63]:

$$t_2 = t_1 \cdot \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^m \quad (1.16)$$

где  $n_1, n_2$  – частота вращения лопастного вала, мин<sup>-1</sup>.

$m$  – эмпирический коэффициент, учитывающий зависимость от интенсивности перемешивания, направленности процесса и т.д.

$t_1, t_2$  – продолжительность процесса перемешивания, мин.

В практических расчетах удобно использовать формулу:

$$t = \frac{\ln \cdot \left( \frac{C_H}{C_H - C_K} \right)}{p} \quad (1.17)$$

где  $p$  – константа для стабилизированных условий смешивания (определяется экспериментально).

$C_K$  – массовая доля контрольного компонента в конце процесса.

$C_H$  – массовая доля контрольного компонента в начале процесса.

Одной из важнейших характеристик любого смесителя, позволяющей определить его основные конструктивные характеристики, является потребляемая мощность. Поскольку для шнекового конвейера известен ряд методик определения мощности, приведем наиболее распространенные [29].

Так, А.М. Григорьев предлагает определять мощность как работу, совершаемую при подъеме корма за единицу времени на требуемую высоту [9]:

$$N = \frac{Q(L_2 \cdot W + H)}{367}, \quad (1.18)$$

где  $Q$  – производительность транспортирующего устройства, кг/с.

$L_2$  – проекция траектории движения кормосмеси на горизонтальную плоскость, м.

$W$  – коэффициент, учитывающий сопротивление перемещенного корма, создаваемое за счет трения о внутренние стенки конвейера.

$H$  – высота транспортирования корма, м.

Аналогичная зависимость, но в несколько упрощенном виде [141], получается при рассмотрении шнека как конвейера, оказывающего некоторое сопротивление прохождению корма внутри цилиндрической камеры:

$$N_{ш} = 0,01 \cdot k \cdot Q \cdot H, \quad (1.19)$$

где  $k$  – вычисляемый коэффициент, показывающий величину сопротивления, оказываемую кормом при транспортировке по шнеку.

$Q$  – производительность транспортирующего устройства, кг/с.

$H$  – высота транспортирования смеси, м.

Известно, что транспортируемая смесь может иметь различные показатели влажности, но и величина трения, создаваемая кормом при трении о стенки корпуса и рабочие органы, может значительно отличаться. При высокой скорости движения порции корма могут возникать условия, близкие к гидравлическому трению в диапазоне широко распространенных устройств [75]. Мощность шнекового конвейера может быть определена по формуле:

$$N = \frac{(N_1 + N_2 + N_3)k}{\eta}, \quad (1.20)$$

где:  $N_1$  —затраты мощности, возникающие при трении корма о поверхность навивки шнека, Вт.

$N_2$  —затраты энергии, необходимые для преодоления трения корма о кожу шнека, Вт.

$N_3$  —мощность, необходимая для транспортировки корма по транспортеру (в чистом виде), Вт.

$k$  —коэффициент, который суммирует потери энергии, возникающие в результате частичного перемешивания корма и частичного его измельчения при транспортировке внутри цилиндра шнека.

$\eta$  —суммарное значение КПД элементов системы привода транспортера, %.

#### 1.4 Цель работы и задачи исследования

**Цель исследований.** Обоснование параметров смесителя концентрированных кормов.

Для решения поставленной цели определены следующие **задачи исследования:**

1. Провести анализ смесителей концентрированных кормов.
2. Теоретически и экспериментально обосновать параметры смесителя концентрированных кормов, снабженного механическим активатором.

3. Разработать смеситель концентрированных кормов, снабженный механическим активатором.

4. Испытать смеситель концентрированных кормов в производственных условиях и оценить его технико-экономический эффект.

### **Выводы**

Выполненный обзор литературных источников позволяет сделать следующие выводы:

1. Кормление основных сельскохозяйственных животных наиболее целесообразно проводить сухими рассыпчатыми кормами, так как при этом сокращаются затраты на кормоприготовление, корма могут длительное время сохраняться, появляется возможность оперативного изменения состава рациона и использования различных кормовых добавок.

2. Тенденция совершенствования конструкций смесителей предполагает повышение технической надежности существующих устройств при снижении себестоимости производства концентрированного корма, производство смесителей с расширенными функциональными возможностями и соблюдении высоких технологических и эргономических свойств.

3. Перспективным направлением совершенствования смесителей является создание устройств, объединяющих в своей конструкции гравитационные смесительные устройства и активаторы механического шнека. Сочетания двух принципов смешивания позволяет получить снижение энергоемкости технологического процесса при небольших габаритных размерах устройства.

## ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕСИТЕЛЯ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ КОРМОВ

### 2.1 Анализ движения сыпучих кормовых смесей в камере смесителя

Известно, что однородная кормовая масса, находясь в движении (падении) ведет себя как жидкость со свойствами, близкими к идеальной [151].

Давление в любой точке кормовой массы одинаково. При этом внутри движущей массы появляются так называемые сталкивающие силы, определяющие одну частицу относительно другой в процессе движения.

Так как плотность в каждой точке массы равна плотности в любой другой точке, то рассматриваемая среда обнаруживает свойство заполнения пустых полостей. Если рассматривать движущуюся частицу в фиксированный момент времени, то она имеет свой вектор скорости. Складывая скорости по координатам  $P(x,y,z)$ , можно определить среднюю скорость массы. В конкретной точке скорость описывают значениями  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – составляющими по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Значение скорости равно:

$$|v_a| = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}. \quad (2.1)$$

Сама же скорость по величине и направлению есть вектор

$$v_a = u\bar{i} + v\bar{j} + w\bar{k}, \quad (2.2)$$

где  $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$  – единичные векторы (орты) в направлении координатных осей.

$\bar{v}$  – скорость, м/с (векторная величина).

Понятие линия тока движения говорит о векторе направленности скорости частиц смеси концентрированных кормов в конкретный момент времени. Кривые, направление которых одинаково с линией тока, выражаются формулой:

$$\frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w}, \quad (2.3)$$

где аргумент  $t$  функций  $u$ ,  $v$ ,  $w$  нужно считать постоянным параметром.



Так как траектории движения не совпадают с линиями течения тока, то можно обобщить эти траектории кривыми совокупной системы:

$$\frac{dx}{dt} = u, \frac{dy}{dt} = v, \frac{dz}{dt} = w, \quad (2.4)$$

где аргумент  $t$  функций  $u, v, w$  является, в отличие от уравнений (2.3), независимой переменной. Как частный случай можно рассмотреть вариант, когда течение частиц идет вдоль некоторой плоскости, отдельные частицы должны двигаться друг относительно друга, чтобы пространство между ними было заполнено без полостей.

В этом случае заполняющий элемент объёма  $d\tau = dx dy dz$ , в котором масса смеси

$$dm = \rho d\tau, \quad (2.5)$$

может измениться за время  $dt$  лишь вследствие изменения её плотности.

Составим уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \bar{w})}{\partial z} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v_a) = 0. \quad (2.6)$$

Для кормовой несжимаемой массы оно принимает более простой вид:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \Leftrightarrow \text{div} v_a = 0. \quad (2.7)$$

В этом случае оно служит выражением того факта, что количество поступающего зерна равно количеству выгружаемого.

Для более подробного анализа процесса смешивания введем величину – производительность, отнесенная к единице объёма, в этом случае заменим уравнение более общим:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_a)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \bar{w})}{\partial z} = e \Leftrightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v_a) = e. \quad (2.8)$$

Для движения частицы в плоскости приведем уравнение неразрывности к виду:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.9)$$

Это уравнение проинтегрируем функцией  $\psi(x, y)$  (или  $\psi(x, y, t)$  для нестационарного движения). Пусть

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (2.10)$$

Из равенства тока получим:

$$d\psi = 0 \Leftrightarrow \psi = \text{const}, \quad (2.11)$$

где функция  $\psi$  называется функцией потока.

По теореме Гаусса (поток), можно говорить, что поток через абстрактное сечение будет положительным, если он совпадает с вектором нормали к поверхности. Пусть  $\bar{n}$  – вектор (единичный) к элементу поверхности  $dS$ , и через  $d\bar{S} = \bar{n}$  – направленный элемент поверхности. Тогда  $\iint_{\partial V} \rho v_a \bar{n} dS$  или  $\iint_{\partial V} \rho v_a d\bar{S}$  есть поток через ограниченную площадь. Оценим активность стока через ограниченную поверхность:

$$\iiint_V \text{div}(\rho v_a) d\tau. \quad (2.12)$$

Отсюда получается

$$\iiint_V \text{div}(\rho v_a) d\tau = \iint_{\partial V} \rho v_a d\bar{S}. \quad (2.13)$$

В случае постоянной плотности имеем

$$\iiint_V \text{div} v_a d\tau = \iint_{\partial V} v_a d\bar{S},$$

или

$$\iiint_V \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) d\tau = \iint_{\partial V} (u \cos \alpha + v \cos \beta + w \cos \gamma) dS$$

где  $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$  суть направляющие косинусы нормали. Это уравнение носит название теоремы Гаусса (иногда, особенно в английской литературе, оно причисляется к теоремам Грина) [152].

Из уравнения можно получить несколько более общую форму теоремы Гаусса:

$$\iiint_V v_a \operatorname{grad} p d\tau + \iiint_V \rho \operatorname{div} v_a dt = \iint_{\partial V} \rho v_a dS$$

Рассмотрим движение массы концентрированных кормов как движение идеальной жидкости.

Внешние силы суть силы объёмные или массовые, т. е. пропорциональные массам рассматриваемых элементов жидкости. Силу, отнесённую к единице массы, мы обозначим через  $\bar{F}$  (Н), а составляющие её по осям координат – через  $X, Y, Z$ . Кроме них, на каждую частицу действует в качестве поверхностной силы давление жидкости; величину этой силы на единицу поверхности мы обозначим через  $p$  [136,151].

Выразим равнодействующую сил дифференциалом следующего вида:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}, -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (2.14)$$

Принимая во внимание, что физические свойства смешиваемой среды весьма мобильны и на границы действует  $\rho$ , возможно, при небольшом динамическом давлении внутри смеси.

Выразим величины ускорений в системе координат через  $\frac{du}{dt}, \frac{dv}{dt}, \frac{dw}{dt}$  и составим уравнения движения:

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{dv}{dt} = Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}, \\ \frac{dw}{dt} = Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}, \end{cases} \Leftrightarrow \frac{dv_a}{dt} = \bar{F} - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p. \quad (2.15)$$

Необходимо учесть, что при росте ускорения ограниченного объёма зерновой массы существует зависимость от массы нулевого объёма, так как при стремлении массы к нулю ускорение будет стремиться к конечной величине. Для усреднения величины ускорения элементарного объёма, составим для

элементарного объёма уравнение, учитывающее приложения всех поверхностных сил и положим ее равной производной во времени от количества движения:

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \rho v_a d\tau = \iiint_V \rho \bar{F} d\tau + \iint_{\partial V} p d\bar{S}. \quad (2.16)$$

### 2.1.1 Теоретическое исследование движения частиц в смешиваемых твердых фазах

Рассмотрим процесс перемешивания одной твёрдой фазы (Б) внутри другой твёрдой и движущейся фазы (А). При решении данной задачи нет необходимости точно описывать движение каждой частицы фазы Б, поскольку это движение порождено случайными причинами (столкновениями). В той ситуации, которую мы исследуем, отметим следующие закономерности:

- 1) столкновение частиц фазы Б между собой достаточно редки по сравнению со столкновением между частицами различных фаз;
- 2) внесение фазы Б не приводит к существенному изменению динамики движения;
- 3) вероятностный характер поведения частицы фазы Б обусловлен только ближайшими соседями этой частицы.

Стоит заметить, что именно такие соображения были положены в теорию броуновского движения. Роль температуры, которая порождает хаотическое движение малых частиц, в нашем случае выполняют поля тяжести и скоростей [151, 153].

Рассмотрим сразу трёхмерную систему, поскольку данное действие наиболее применимо при математическом подходе, и не допускает дополнительных сложностей. Рассмотрим условия и параметры протекания процесса с позиций физического подхода. Принимая во внимание хаотичность движения частиц корма будем считать ее броуновской частицей, под которой мы понимаем частицу фазы Б, теоретически возможно описать характер ее движения, но принимая во внимание вероятностные условия движения потока частиц

целесообразнее рассмотреть эволюцию единичной частицы с помощью функции плотности распределения, что допустимо, поскольку мы рассматриваем явление в достаточно грубой временной шкале. Это означает, что за достаточно малый интервал времени, происходит множество соударений частиц фаз А и Б. В качестве такого интервала времени, например, может быть выбрано время, за которое частица фазы Б переместится по всей области движения. Не следует путать функцию плотности распределения фазы Б (вероятность найти частицу фазы Б в единичном объёме) и плотность фазы (количество массы фазы А(Б) в единичном объёме). Так как распределение по импульсам частиц в этой временной шкале носит характер максвеловского распределения импульсов сил, при рассмотрении условий движения частицы целесообразно иметь возможность устанавливать наличие частицы в конкретный момент времени – движущейся частицы в объёме  $(\vec{r}, \vec{r} + d\vec{r})$  в момент времени  $t$ , причем

$$\iiint_V \rho(\vec{r}, t) d\vec{r} = 1 \quad (2.17)$$

Так как жизненный цикл рассматриваемых нами частиц стабилен, то есть они не исчезают, не рождаются вновь, то и структура плотности, выраженная функцией, должна быть непрерывной:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \vec{r}}(f\vec{v}) = \frac{\partial f}{\partial t} + \text{div}(f\vec{v}_a) = 0. \quad (2.18)$$

Оставаясь в рамках полуфеноменологического рассмотрения, представим поток плотности вероятности  $f\vec{v}_a$  как бы складывающимся из двух частей:

$$\vec{v}_a = \vec{v}_0 + \vec{v}_{\text{случ}} \quad (2.19)$$

Первая часть является своего рода результатом действия сил, вторая часть представляет некоторую резистентность вероятностного поля или флуктуацию, выражающую суммарное воздействие среды (с аналогичным разделением на «регулярную» и «случайную» части пользуются и в физике).

Для регулярной части мы можем использовать представления макроскопической гидродинамики о движении тела в вязкой среде. Случайное же блуждание с макроскопической точки зрения имеет характер диффузионного процесса.

Поэтому упорядоченный поток частиц можно записать как:

$$f v_0 = -\frac{1}{\rho} f \frac{\partial V}{\partial \bar{r}}, \quad (2.20)$$

где  $V$  — потенциал внешнего силового поля, например, силы тяжести,  $H$ .

Диффузионный поток частиц (случай малых градиентов) мы запишем как

$$f v_{\text{случ}} = -D \frac{\partial f}{\partial \bar{r}}, \quad (2.21)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии, учитывающий многочисленные параметры среды, включая вязкость, плотность при движении в ней частицы, обладающей размерами, весом и т.д.

Конечно, в каждом конкретном случае величина  $D$  может быть определена экспериментально, но заготовить таблицы значений  $D$  на все варианты не представляется целесообразным. В связи с этой трудностью рассмотрим предел  $t \rightarrow \infty$ , когда система достигает своего состояния динамического равновесия. Напомним, что такое состояние характеризуется постоянством во времени всех характеристик системы и отсутствием потоков любого типа. Поэтому, помимо  $\partial f / \partial t = 0$ , имеем три уравнения для частиц компонентов потока плотности вероятности

$$f v_a = -\left(\frac{1}{\rho} f \text{grad } V + D \text{grad } f\right) = 0, \quad (2.22)$$

что проще преобразовать в вид

$$\frac{\partial \ln f}{\partial \bar{r}} = \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(-\frac{V}{D\rho}\right). \quad (2.23)$$

Решение этого уравнения

$$f(\bar{r}) = \text{const} \cdot e^{-\frac{V(\bar{r})}{D\rho}} \quad (2.24)$$

Рассматриваемая нами система по своей природе очень близка к свойствам идеального газа, состоящего из броуновских частиц в поле  $V(\bar{r})$  с равновесным характером распределения больцмановского типа.

Решение уравнения позволяет получить коэффициент диффузии  $D$ , который довольно просто связан с силовым полем, вязкостью среды и размером броуновских частиц:

$$D = \frac{\theta}{\rho} \quad (2.25)$$

Предполагая, что смесь может быть описана уравнениями движения жидкости, получим, что вязкость подчиняется закону Стокса:

$$F = 6\pi\eta rV, \quad (2.26)$$

где  $F$  – сила тяжести, Н.

$\eta$  – вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с.

$r$  – характерный размер частиц, м.

$V$  – скорость движения жидкости, м/с.

Отсюда вязкость равна:

$$\eta = \frac{F}{6\pi rV} \quad (2.27)$$

С другой стороны, модель броуновского движения предполагает, что коэффициент диффузии равен:

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta rV} \quad (2.28)$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана.

$T$  – температура, град.

Подставим в это выражение предыдущее и получим искомое выражение для коэффициента диффузии:

$$D = \frac{k_B T V}{F} \quad (2.29)$$

Именно это значение и применим в математической модели смешивания [118].

Подставляя установленную величину в функцию, выражающую поток  $f\bar{v}_{\text{случ}}$ , и собирая все члены вместе, мы приходим к уравнению Фоккера-Планка для функции плотности распределения вероятности нахождения частиц фазы Б в единичном объеме  $f(\bar{r}, t)$ .

$$\frac{\partial f}{\partial t} - \frac{1}{\rho} \operatorname{div}(f \operatorname{grad} V) - \frac{\theta}{\rho} \Delta f = 0. \quad (2.30)$$

Таким образом, удалось свести процесс к линейному дифференциальному

уравнению по структуре параболического вида при интервальной нормировке условий, формирующих начальные и граничные значения и определяющих основные условия искомой функции  $f(\vec{r}, t)$ . Решение полученной системы позволяет получить данные об эволюции системы. В диапазонах времени, много больших, чем интервалы взаимных соударений частиц фаз А и Б, начинает проявляться релаксационный характер (при распределении Больцмана) при времени релаксации, зависящим в значительно большей мере не от характера свойств смеси как конгломерата частиц, а от формы области, типа её границ, начального распределения и т.д.

## 2.2. Математическая модель процесса смешивания, протекающего в смесителе концентрированных кормов

Исследуем различные кинематические режимы движения механического активатора, при котором будет достигнута приемлемая степень смешивания.

Условно представим, что бункер представляет собой двумерную область прямоугольной формы: вертикальное сечение ёмкости, в которой происходит смешивание (рисунок 2.1).

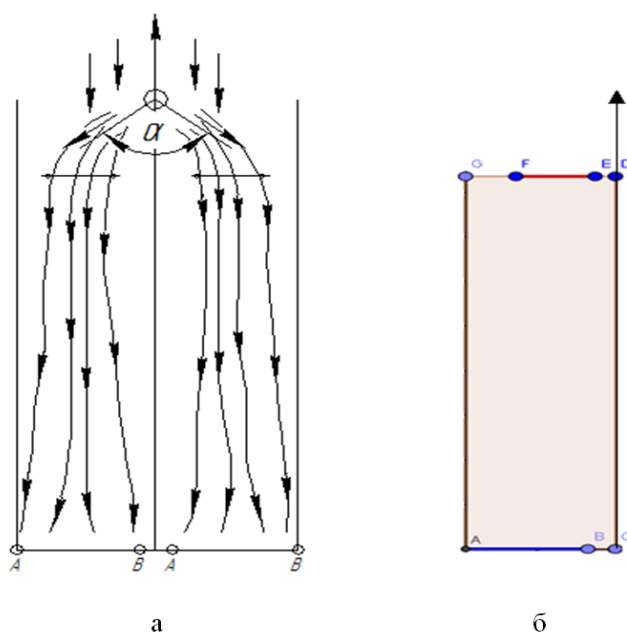


Рисунок 2.1– Схема распределения компонентов активатором (а) и расчетная область процесса смешивания (б)



Запишем теперь все уравнения. Будем использовать привычные обозначения и систему координат, как показано на рисунке 2.1 б.

Предполагая, что область симметрична относительно своей середины, ограничимся рассмотрением только левой половины области.

Вертикальный отрезок AG – высота смесителя, отрезок EF – область загрузки смеси, отрезок AB – область выгрузки смеси.

Уравнение установившегося движения смеси концентрированных кормов будет похоже на следующее:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{FE} = -v_0, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{AB} = v_0, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{BC+CD+ED+FG+GA} = 0 \end{array} \right. \quad (2.31)$$

Это уравнение первое, которое мы будем решать. Его основная цель – получить приближенное значение поля скоростей для поиска более сложного решения – уравнения движения смешиваемой массы, обладающей вязкими свойствами. Временем установления стационарного поля скоростей пренебрегаем по сравнению с общей продолжительностью процесса смешивания.

Уравнения (стационарного вида) движения вязкой смеси и граничные условия для выделения единственного решения принимают вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho u \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \\ \rho v \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho g, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{AC} = \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{DG} = 0, u|_{CD+AG} = 0, \\ \frac{\partial v}{\partial n} \Big|_{CD} = \frac{\partial v}{\partial n} \Big|_{AG} = 0, v|_{BC+DE+FG} = 0, \\ v|_{AB} = v_0, v|_{EF} = -v_0 \end{array} \right. \quad (2.32)$$

Это существенно более сложная система двух уравнений. Поэтому в качестве начального приближения выбираем решение предыдущего уравнения.

Уравнения (нестационарные) диффузии Фоккера-Планка и граничные условия для выделения единственного решения принимают вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial t} = b_{11} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + b_{22} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left( u \frac{\partial f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v \frac{\partial f}{\partial y} \right), \\ f|_{t=0} = f_0 \\ f|_{AB+BC+CD+DE+EG+GF+FA} = 0 \end{cases} \quad (2.33)$$

Блок-схема решения задачи оптимизации показана на рисунке 2.2.

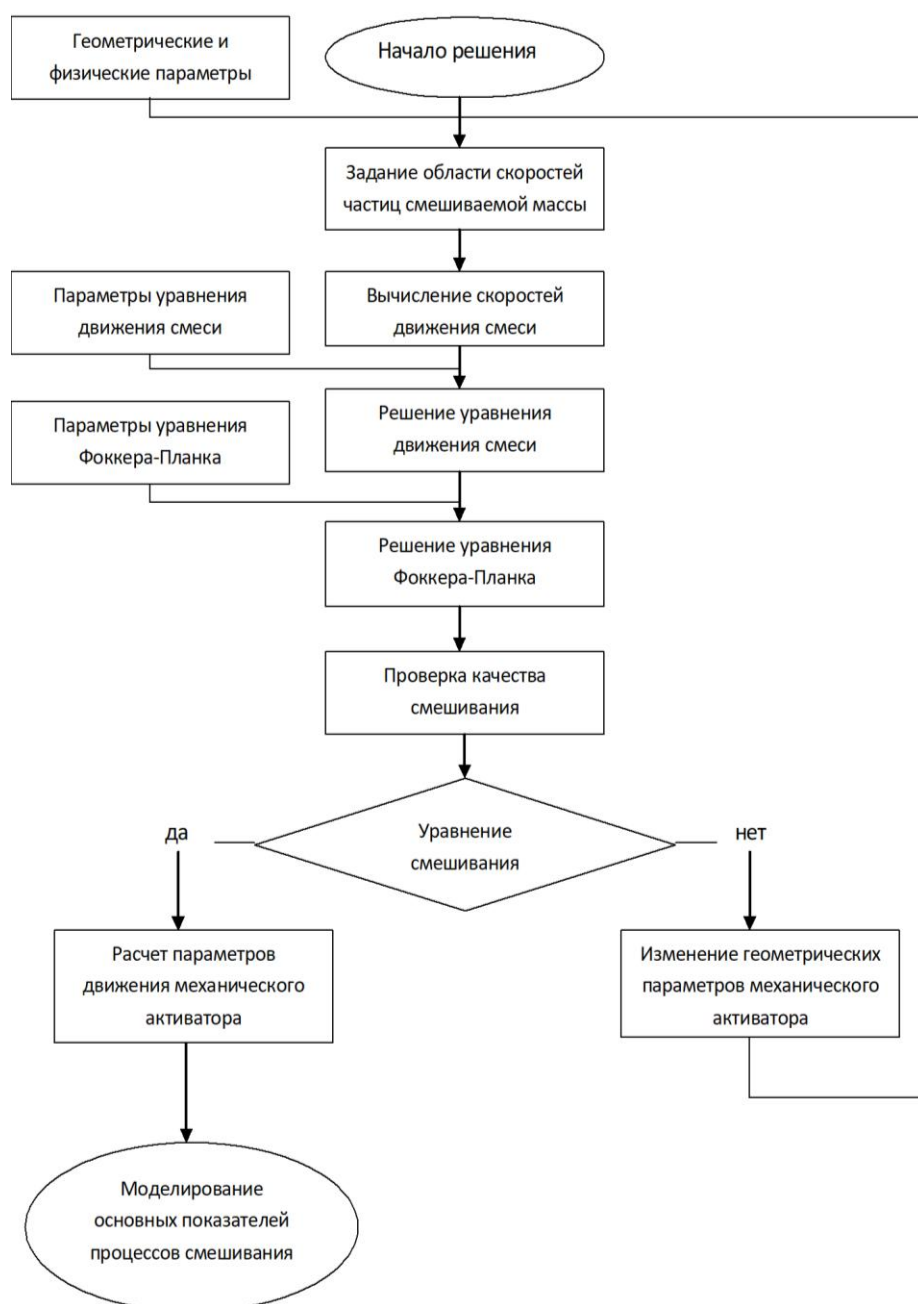


Рисунок 2.2 – Блок-схема задачи оптимизации

Каждую из перечисленных краевых задач будем решать в следующей последовательности:

- 1) вводим в области и на границе сетку;
- 2) аппроксимируем в области и на границе дифференциальные операторы их сеточными аналогами, в результате чего получаем систему линейных уравнений, которую и решаем;
- 3) полученное решение сеточного уравнения принимаем в качестве искомого решения соответствующей краевой задачи.

### 2.3 Решение установленного дифференциального уравнения движения вязкой смеси методом сеточных уравнений

Примем следующие обозначения. Пусть  $lx$  – геометрический размер области по направлению горизонтальной оси, а  $ly$  – по направлению вертикальной оси. Зададимся произвольным числом  $N$ . Определим множество точек на плоскости (рисунок 2.3).

$$(x_i, y_j) = \left( \frac{lx}{N} \cdot i, \frac{ly}{N} \cdot j \right), i, j = 0, 1, \dots, N$$

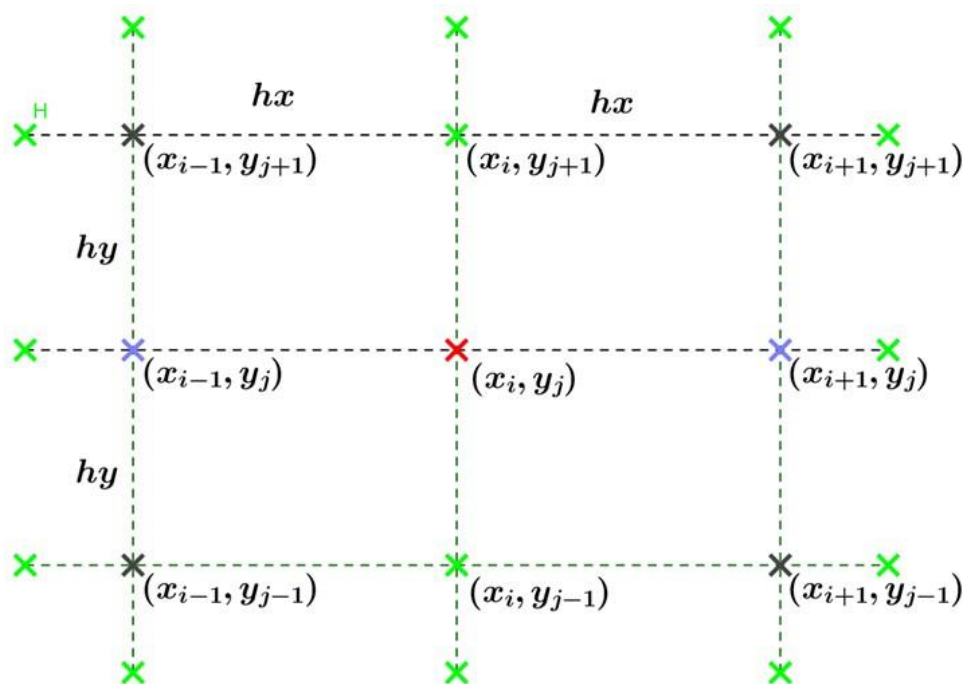


Рисунок 2.3 – Сеточный шаблон

Эти точки называют узлами сетки. Если в области задана некоторая функция  $u(x, y)$ , то примем обозначение  $u_{ij} = u(x_i, y_j)$  – значение этой функции в узле сетки.

Поскольку дифференциальные уравнения кроме самих функций содержат и их производные, то необходимо найти аппроксимации производных на сетке. Для этой цели достаточно подобрать некоторую линейную комбинацию значений функции в узлах сетки таким образом, чтобы она приближённо равнялась той или иной производной.

#### *Аппроксимация первой производной*

Рассмотрим построение разностной производной в некотором узле. Для этой цели воспользуемся определением самой производной, например, частной по направлению оси  $Ox$ :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{u(x + \Delta x, y) - u(x, y)}{\Delta x} \quad (2.34)$$

Если положить в этом определении  $x = x_i, x + \Delta x = x_{i+1}, y = y_j$ , то получаем приближенное равенство

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{ij} = u'_{xij} \approx \frac{u_{i+1j} - u_{ij}}{hx}, \quad (2.35)$$

которое тем точнее, чем мельче выбирается шаг сетки. Аналогично, для производно по оси  $Oy$  получаем выражение:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{ij} = u'_{yij} \approx \frac{u_{ij+1} - u_{ij}}{hy} \quad (2.36)$$

Нормальные производные  $\frac{\partial u}{\partial n}$ , значения которых определяются на границах области, выражаются через разностные производные по направлению осей  $Ox$  и  $Oy$ , поскольку границы области являются координатными линиями.

#### *Аппроксимация второй производной*

Теперь выведем сеточное выражение и для второй производной.

Для применения численных методов, как уже было сказано, необходимо аппроксимировать дифференциальные уравнения сеточными. Предполагая, что

функция имеет необходимое число производных в каждом узле, воспользуемся формулой Тейлора:

$$\begin{aligned} u_{i+1j} &= u_{ij} + u'_{xij}hx + \frac{1}{2}u''_{xxij}hx^2 + \bar{o}(hx^2) \\ u_{i-1j} &= u_{ij} - u'_{xij}hx + \frac{1}{2}u''_{xxij}hx^2 + \bar{o}(hx^2) \end{aligned} \quad (2.37)$$

Эти два равенства можно сложить и выразить вторую производную

$$\left. \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right|_{ij} = u''_{xxij} \approx \frac{u_{i+1j} - 2u_{ij} + u_{i-1j}}{hx^2} \quad (2.38)$$

Аналогично, и для второй производной по переменной  $y$  получаем

$$\left. \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right|_{ij} = u''_{yyij} \approx \frac{u_{ij+1} - 2u_{ij} + u_{ij-1}}{hy^2} \quad (2.39)$$

Это значит, что следует рассматривать дифференциальные уравнения не в произвольной точке области, а только в узлах сетки. Более того, в каждом узле следует применить аппроксимацию производных. В результате получаем разностную систему линейных уравнений стационарного движения перемешиваемой сыпучей массы, имеющей физические свойства, сходные с идеальной жидкостью:

$$\left\{ \begin{aligned} &\frac{\varphi_{i+1j}}{hx^2} + \frac{\varphi_{i-1j}}{hx^2} + \frac{\varphi_{ij+1}}{hy^2} + \frac{\varphi_{ij-1}}{hy^2} - \left( \frac{2\varphi_{ij}}{hx^2} + \frac{2\varphi_{ij}}{hy^2} \right) = 0, \\ &\quad i, j = 1, \dots, N-1 \\ &\left. \frac{\varphi_{iN} - \varphi_{iN-1}}{hy} hx \right|_{(i,j) \in FE} = v_0, \\ &\left. \frac{\varphi_{i1} - \varphi_{i0}}{hy} hx \right|_{(i,j) \in AB} = -v_0, \\ &\left. \frac{\varphi_{i1} - \varphi_{i0}}{hy} \right|_{(i,j) \in BC} = 0, \left. \frac{\varphi_{iN} - \varphi_{iN-1}}{hy} \right|_{(i,j) \in DE+FG} = 0, \\ &\left. \frac{\varphi_{1j} - \varphi_{0j}}{hx} \right|_{(i,j) \in GA} = 0, \left. \frac{\varphi_{Nj} - \varphi_{N-1j}}{hx} \right|_{(i,j) \in CDA} = 0, \end{aligned} \right. \quad (2.40)$$

Полученная система линейных алгебраических уравнение имеет единственное решение, которое может быть получено самыми разнообразными способами. Зная потенциал движения смеси концентрированных кормов,

имеющей свойства идеальной жидкости, скорость определяется выражением –  $grad \varphi$  или его сеточным аналогом, который следует использовать в качестве начального приближения при решении уравнений движения компонентов смеси:

$$u_{ij} = \frac{\varphi_{i+1j} - \varphi_{ij}}{hx}, v_{ij} = \frac{\varphi_{ij+1} - \varphi_{ij}}{hy} \quad (2.41)$$

Сеточные уравнения уже являются нелинейными. Для поиска их решения следует применить итерационный метод, например, метод Зейделя или метод покоординатного спуска [62].

Выпишем сеточные уравнения движения исследуемой среды:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{ij} \left( \frac{u_{i+1j} - u_{ij}}{hx} + \frac{u_{i+1j} - u_{ij}}{hy} \right) = \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{u_{i+1j} + u_{i-1j}}{hx^2} + \frac{u_{i+1j} + u_{i-1j}}{hy^2} - \frac{2u_{ij}}{hx^2} - \frac{2u_{ij}}{hy^2} \right) \\ v_{ij} \left( \frac{v_{i+1j} - v_{ij}}{hx} + \frac{v_{i+1j} - v_{ij}}{hy} \right) = \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{v_{i+1j} + v_{i-1j}}{hx^2} + \frac{v_{i+1j} + v_{i-1j}}{hy^2} - \frac{2v_{ij}}{hx^2} - \frac{2v_{ij}}{hy^2} \right) - g, \\ i, j = 1, \dots, N-1, \\ \frac{u_{i+1j} - u_{ij}}{hx} + \frac{v_{i+1j} - v_{ij}}{hy} = 0, i, j = 1, \dots, N-1, \\ \frac{u_{i1} - u_{i0}}{hy} \Big|_{i \in AC} = \frac{u_{iN} - u_{iN-1}}{hy} \Big|_{i \in DG} = 0, u_{Nj} = u_{0j} = 0, j = 1, \dots, N \\ \frac{\partial v}{\partial n} \Big|_{CD} = \frac{\partial v}{\partial n} \Big|_{AG} = 0, v \Big|_{BC+DE+FG} = 0 \\ v \Big|_{AB} = v_0, v \Big|_{EF} = -v_0, \end{array} \right. \quad (2.42)$$

### Решение сеточного уравнения Фоккера-Планка

Выпишем сеточные уравнения Фоккера-Планка. Исходное уравнение – параболического типа, дополнительно зависит и от времени. Поэтому сначала построим дискретный аналог по пространственным переменным. Получаем следующую систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно неизвестной плотности:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial f}{\partial t} = (b_{11} - u_{ij}) \frac{f_{i+1j} - 2f_{ij} + f_{i-1j}}{hx^2} + (b_{22} - v_{ij}) \frac{f_{i+1j} - 2f_{ij} + f_{i-1j}}{hy^2} - \\ - \frac{u_{i+1j} - u_{ij}}{hx} \cdot \frac{f_{i+1j} - f_{ij}}{hx} - \frac{v_{i+1j} - v_{ij}}{hy} \cdot \frac{f_{i+1j} - f_{ij}}{hy}, \\ f_{ij} \Big|_{t=0} = f_0 \\ f_{ij} \Big|_{ij \in AB+BC+CD+DE+EG+GF+FA} = 0 \end{array} \right. \quad (2.43)$$

Полученная система обыкновенных линейных дифференциальных уравнений, при заданных начальных условиях заведомо имеет единственное решение, которое может быть найдено с помощью численных методов системы MathCAD. Решение зависит от временной переменной. Заранее известно, что при достаточно большом интервале времени решение стремится к постоянному для произвольного узла сетки:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f_{ij}(t) = \frac{f_0}{N^2} \quad (2.44)$$

С практической точки зрения, задача смешивания должна быть решена за конечное время. В качестве такового выберем время, за которое частица совершит два оборота по области. Именно так и происходит и перенос фазы, и её диффузионное размывание.

Теперь необходимо ввести некоторую характеристику качества смешивания. Остановимся на одной из них – коэффициенте вариации – отношение стандартного отклонения (корня из дисперсии) к среднему (математическому ожиданию):

$$v = \frac{\sqrt{D[f]}}{M[f]} \quad (2.45)$$

В нашем случае может быть найден только выборочный коэффициент вариации концентрации фазы Б. Для этой цели вычисляем выборочный начальный момент первого порядка – выборочное среднее – среднюю концентрацию:

$$A_1 = \frac{1}{(N-1)^2} \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} f_{ij} h_y h_x \quad (2.46)$$

Затем выборочный начальный момент второго порядка:

$$A_2 = \frac{1}{(N-1)^2} \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} f_{ij}^2 h_y h_x \quad (2.47)$$

Из последней величины вычисляем квадрат выборочного среднего, и получаем выборочную дисперсию:

$$M_2 = A_2 - A_1^2 \quad (2.48)$$

И наконец, искомую величину выборочного коэффициента вариации:

$$\bar{v} = \frac{\sqrt{M_2}}{A_1} \quad (2.49)$$

При самом неудачном варианте смешивания коэффициент вариации близок к величине объёма области. А для равномерного распределения фазы Б близок к нулю. Поэтому чем меньше коэффициент вариации, тем удачнее выбран режим смешивания. Приведём два варианта расположений пятен заброса, чтобы сформулировать окончательные выводы относительно моделирования полей скоростей и концентраций.

Рассмотрим расположение пятна заброса. Его границы: левая 0.05 м, правая 0.15 м. Протяжённость пятна равна 0.1 м. Результат моделирования приведен на рисунке 2.4.

Поясним полученный рисунок. Цвет на рисунке соответствует значению потенциала. Красный цвет – наибольшее значение, фиолетовый – наименьшее. Такого же принципа будем придерживаться и при рассмотрении остальных рисунков. Линии на рисунке – эквипотенциальные линии. Они перпендикулярны границам. Скорость движения всегда перпендикулярна этим линиям, а величина скорости обратно пропорциональна расстоянию между линиями.

Поле потенциала таково, что эквипотенциальные линии практически горизонтальны или направлены влево. Это означает, что конвекционные потоки переноса направлены вниз и к центру. Только малая часть их разносит концентрацию фазы Б в правую часть.

Минимальное значение горизонтальной скорости  $-0.384 \frac{M}{c}$ , максимальное  $0.18 \frac{M}{c}$ , среднее  $-0.072 \frac{M}{c}$ . Это значит, что основное направление горизонтального перемещения справа налево (рисунок 2.5).

Минимальное значение горизонтальной скорости  $-0.384 \frac{M}{c}$ , максимальное  $0.18 \frac{M}{c}$ , среднее  $-0.072 \frac{M}{c}$ . Это значит, что основное направление горизонтального перемещения справа налево (рисунок 2.5). Соответственно для вертикальной скорости эти величины равны  $-0.268 \frac{M}{c}$ ,  $0.164 \frac{M}{c}$  и  $-0.12 \frac{M}{c}$ . Заметим, что скорость вертикального перемещения стала больше (рисунок 2.6). Среднее



время одного оборота смеси составило 72 с. Среднее значение модуля скорости возросло примерно в 10 раз до величины  $0.079 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  (рисунок 2.7). Величина выборочного коэффициента вариации уменьшилась до  $\nu_a = 0.819$  (рисунок 2.8). Обратим внимание на то, что область, закрашенная фиолетовым цветом, сократилась.

Изменим положения пятна заброса. Его границы: левая 0.02 м, правая 0.19 м. Протяжённость пятна равна 0.17 м.

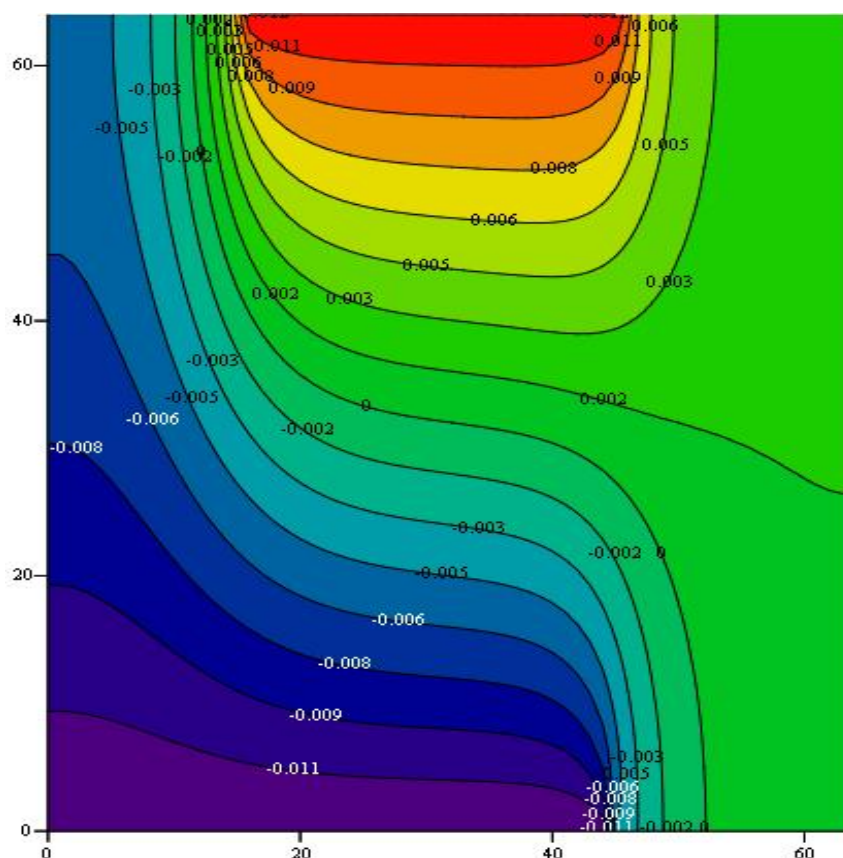


Рисунок 2.4– Потенциал (вариант 1)

Пятно значительно стало больше. Оно занимает практически всю верхнюю поверхность области. Смесь (фаза Б) вбрасывается не в отдельную точку, а сразу во все верхние точки (рисунок 2.9).

Поле потенциала таково, что основное направление скоростей конвекции направлено влево и вниз, то есть в сторону пятна выгрузки. Тем не менее, часть конвекционных потоков направлена в верхний правый угол, что приводит к более равномерному распределению фазы Б.

Заметим, что при этом конвекционные скорости уменьшились.

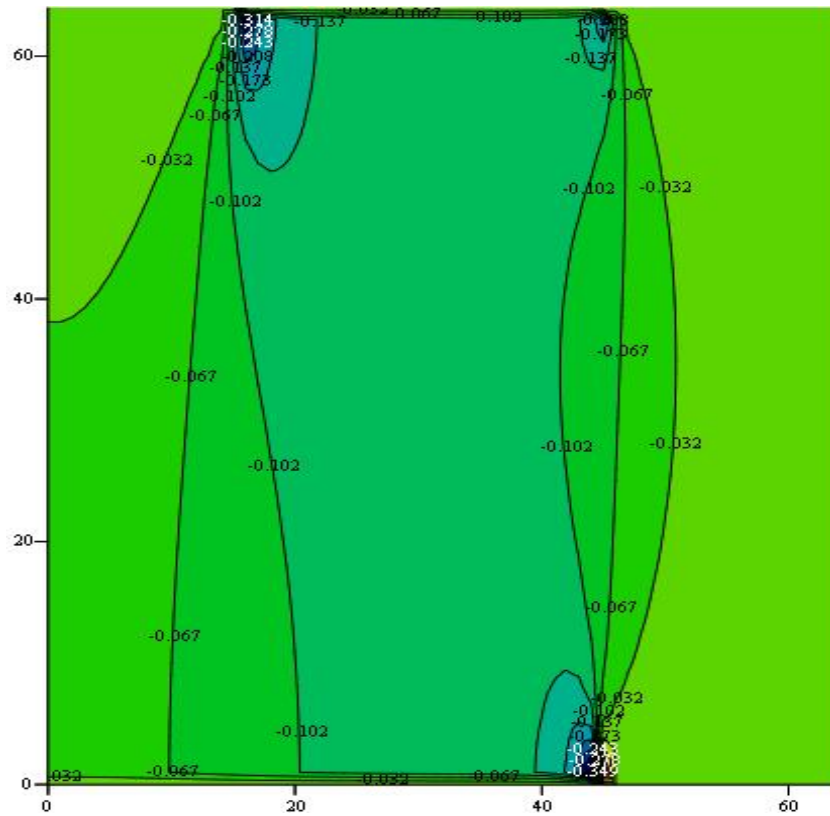


Рисунок 2.5 – Горизонтальная составляющая скорости (вариант 1)

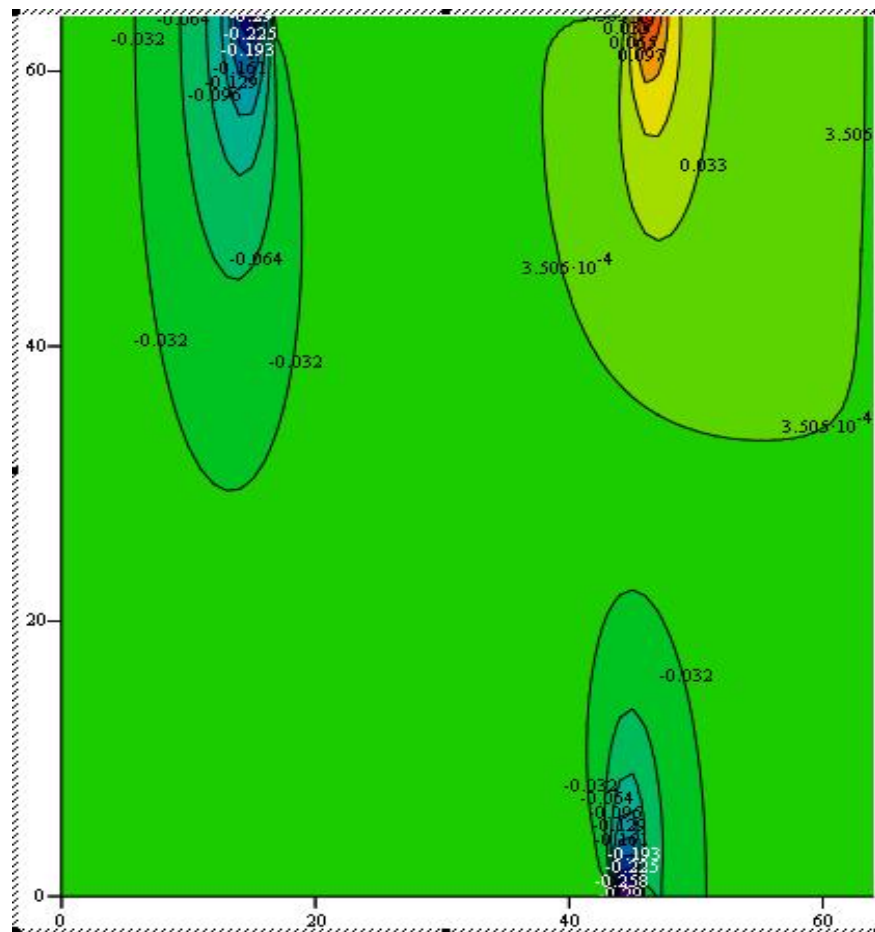


Рисунок 2.6 – Вертикальная составляющая скорости (вариант 1)

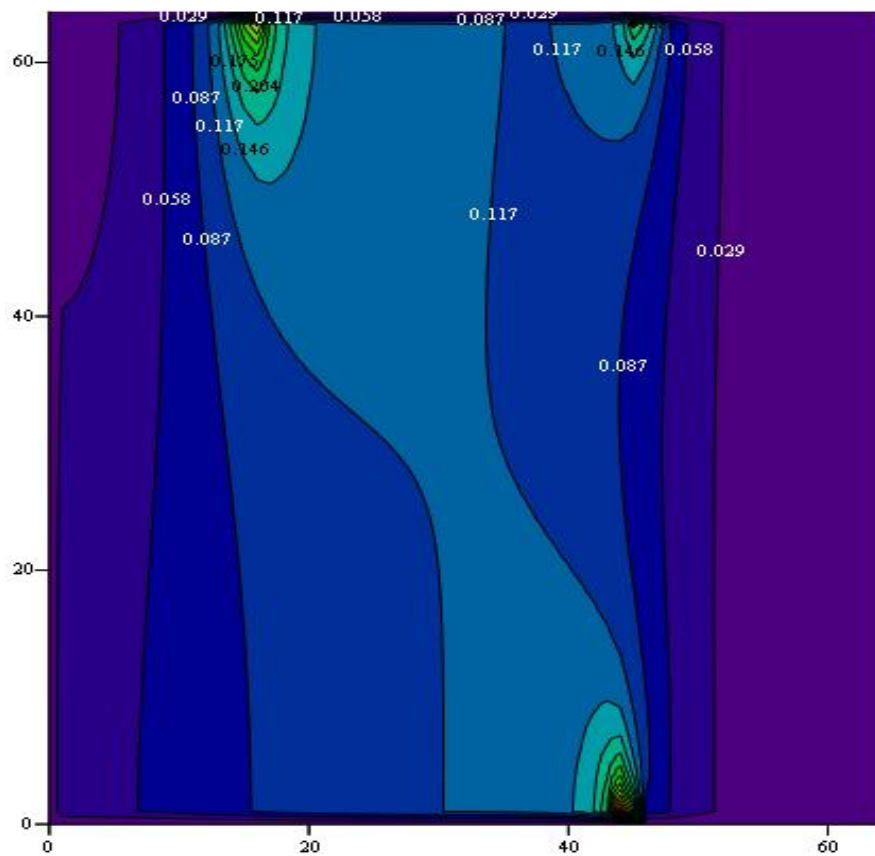


Рисунок 2.7 – Модуль скорости (вариант 1)

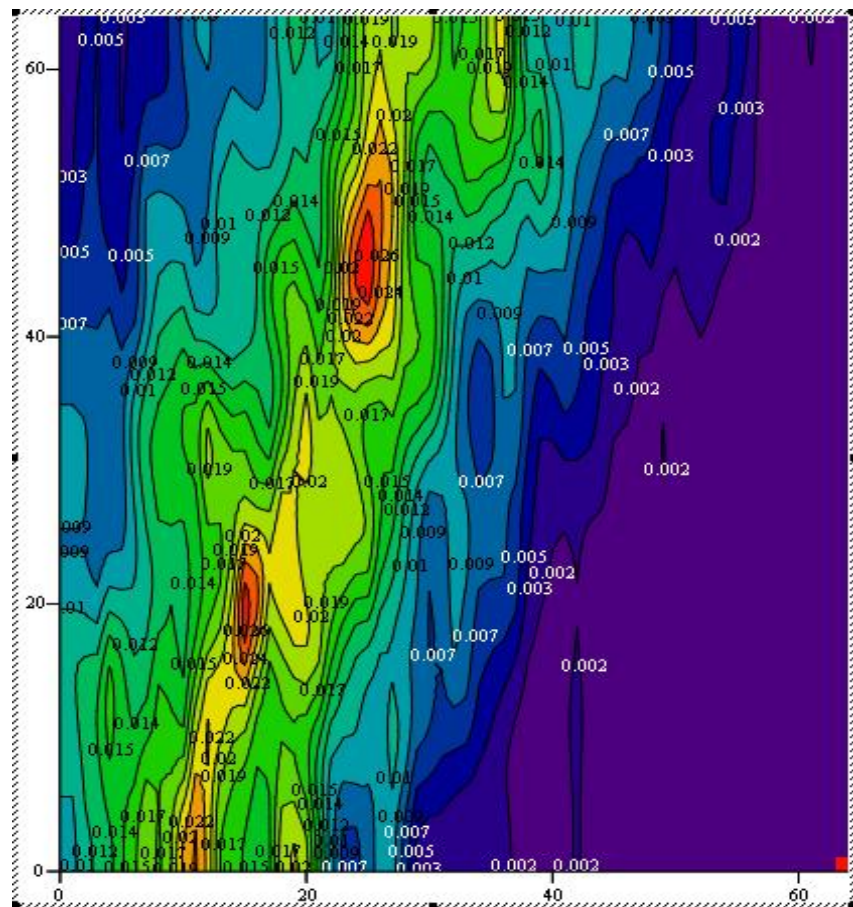


Рисунок 2.8 – Распределение концентрации (вариант 1)

Минимальная горизонтальная скорость  $-0.141 \frac{m}{c}$ , максимальная  $0.07 \frac{m}{c}$ , средняя  $-0.026 \frac{m}{c}$  (рисунок 2.10). Те же величины для вертикальной скорости:  $-0.101 \frac{m}{c}, 0.016 \frac{m}{c}$  и  $-0.004 \frac{m}{c}$  (рисунок 2.11). Для модуля скорости имеем:  $0.0004 \frac{m}{c}, 0.172 \frac{m}{c}$  и  $0.0027 \frac{m}{c}$ . Несмотря на то, что качество приготовления смеси стало лучше ( $v_a = 0.466$ ), время одного оборота возросло до 210 с (рисунок 2.12).

Область, закрашенная фиолетовым цветом, существенно сократилась. Концентрация фазы Б стала существенно более равномерной, по сравнению с первым вариантом.

В результате проведённого вычислительного эксперимента при заданном временном интервале смешивания можно заключить следующее:

- 1) существует принципиальная возможность управления качеством смешивания при помощи выбора положения и размеров пятна заброса смеси;
- 2) чем меньше размеры пятна заброса, тем больше коэффициент вариации, хуже качество смешивания;
- 3) чем ближе пятно заброса смеси к центру или к краю области, тем больше коэффициент вариации;
- 4) расчет поля скоростей без учёта вязкости (уравнение движения идеальной жидкости) не приводит к значительному отклонению от поля скоростей, рассчитываемому с помощью уравнений вязкой жидкости. Различия не превышают относительной величины в 10-15 %.

На основании сформулированных выводов поступим далее следующим образом. При различных значениях параметров пятна заброса определим значения выборочного коэффициента вариации. То есть будем неоднократно решать задачи движения уравнения идеальной жидкости и уравнения Фоккера-Планка. Результаты сведём в таблицу 2.1. Для большей наглядности основные значения математического моделирования вынесены на рисунок 2.13.

Результаты рассмотренных двух вариантов также включены в таблицу (выделены). Прослеживается закономерность, которая сформулирована в выводах.

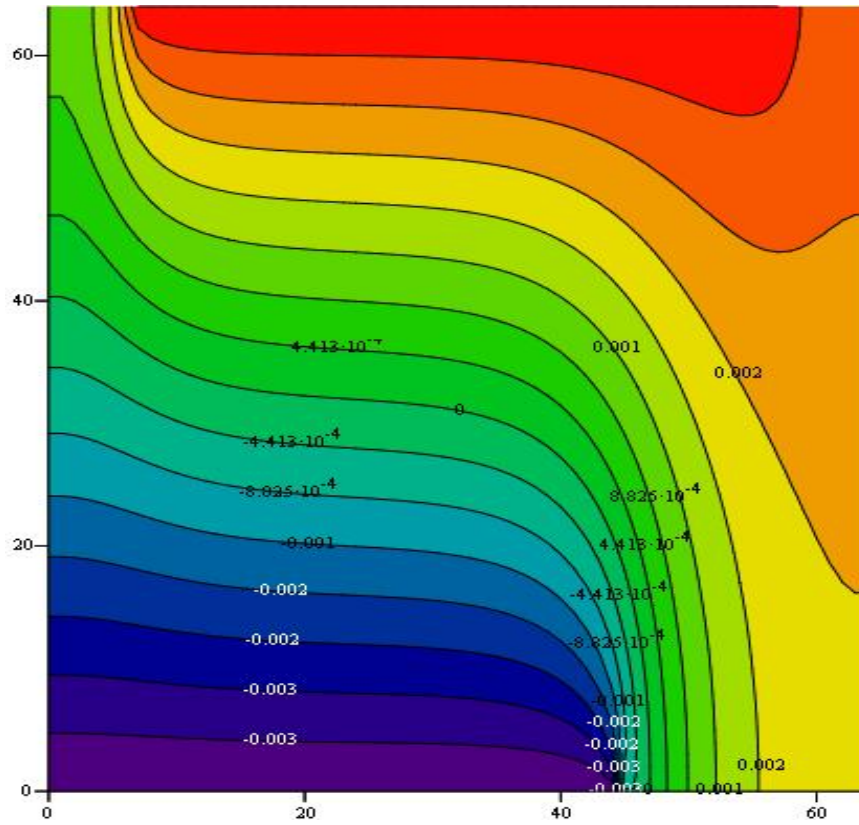


Рисунок 2.9 – Потенциал (вариант 2)

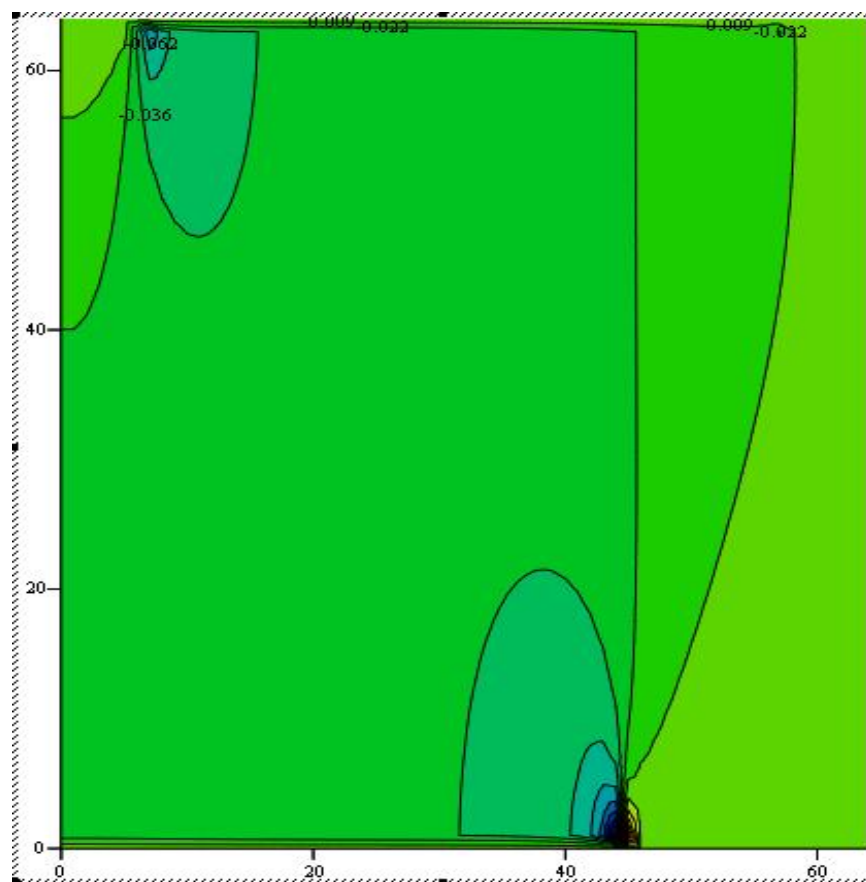


Рисунок 2.10 – Горизонтальная составляющая скорости (вариант 2)

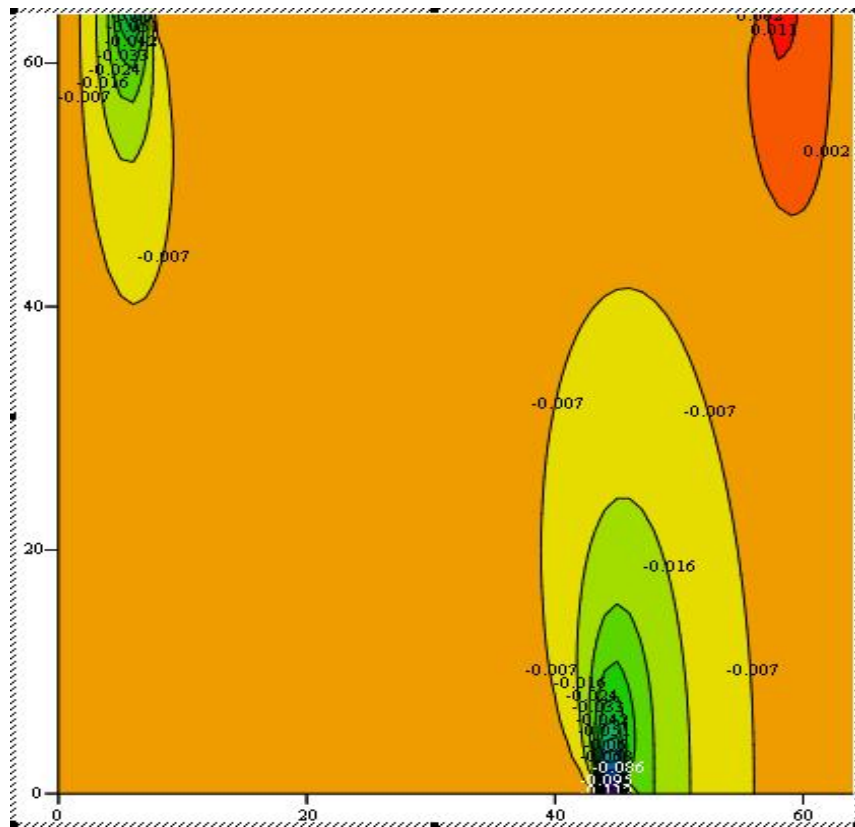


Рисунок 2.11 – Вертикальная составляющая скорости (вариант 2)

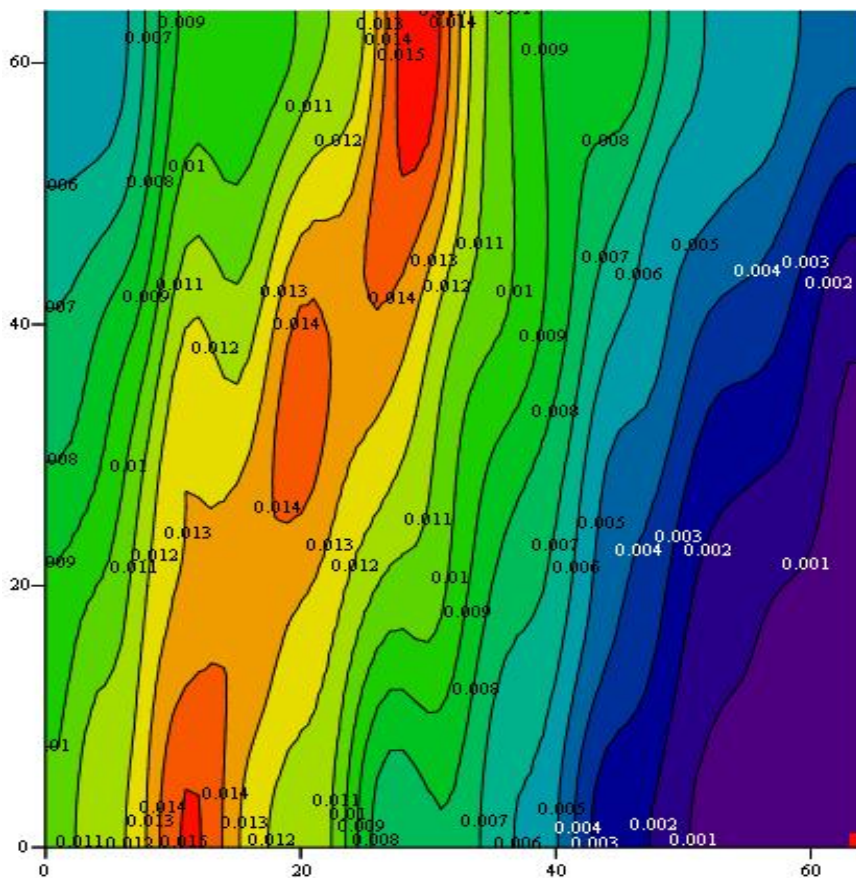


Рисунок 2.12– Распределение концентрации (вариант 2)

Вероятно, самое удачное расположение пятна заброса: левая граница пятна 0,02 м и правая граница 0,15 м. Возможно, здесь существует некоторый компромисс. Нельзя слишком приближаться к центру, в этом случае частицы фазы Б будут ускоренно продвигаться сверху вниз, не испытывая достаточно большого числа столкновений, чтобы случайным образом диффундировать в области с меньшей концентрацией. Аналогично, слишком близкое расположение пятна к внешней границе приводит к тому, что большое число частиц попадает в область, где они вследствие отсутствия конвекции задерживаются надолго.

Таблица 2.1 – Значения коэффициентов вариации

		Правая граница, м					
		0.02	0.05	0.1	0.13	0.15	0.19
Левая граница, м	0.01	1.95	1.57	<b>1.116</b>	8.835	0.589	0.601
	0.02		1.361	1.096	0.615	0.444	<b>0.466</b>
	0.05			1.358	0.955	<b>0.819</b>	0.821
	0.1				1.472	1.103	0.923
	0.15						1.322

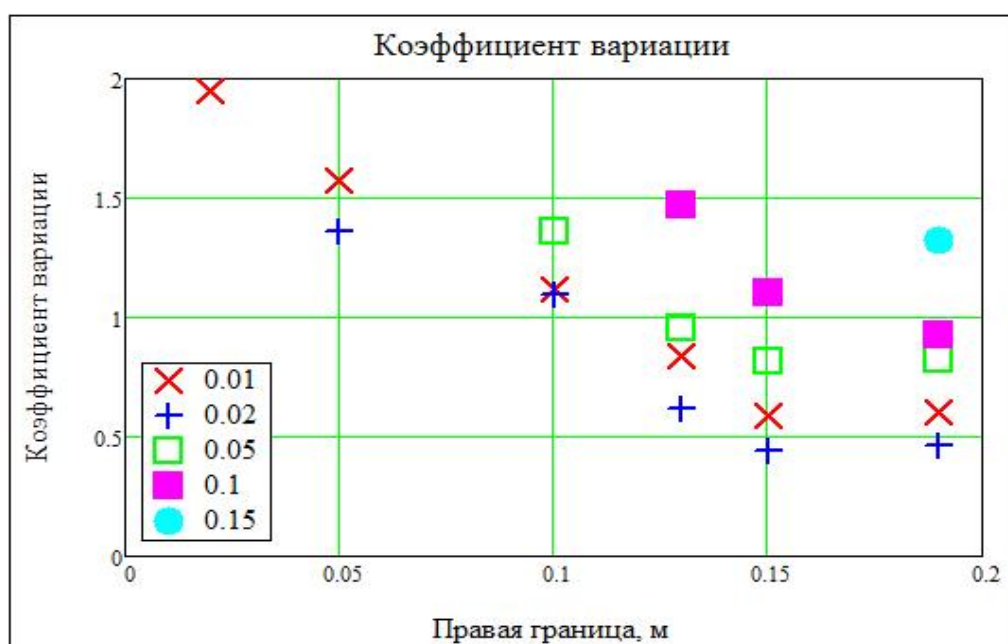


Рисунок 2.13 – Значения коэффициентов вариации

## 2.4 Уравнение движения потока частиц по лопастям механического активатора

В предыдущих разделах определены причины, приводящие к различным значениям коэффициента вариации. Нам известны параметры пятна заброса, при которых достигается приемлемый уровень коэффициента вариации. Теперь попытаемся понять, как должен двигаться механический активатор, чтобы падающий поток частиц накрывал пятно заброса смеси.

Пусть  $a$  и  $b$  – соответственно правая и левая координата пятна заброса смеси механическим активатором. Рассмотрим наклонную плоскость, по которой движется поток частиц. Предполагая, что скорости частиц равны, можно рассмотреть движение только одной частицы. Воспользуемся квазистатическим приближением, то есть пренебрежём силами инерции, возникающими при движении по движущейся поверхности. Это означает, что угол наклона  $\varphi$  плоскости, зависящий от времени  $t$ , будем считать постоянным (плоскость заморожена) и рассматривать величину как некоторый переменный параметр.

Поскольку частица движется по наклонной плоскости без отрыва от нее, то равнодействующая сила, перпендикулярная этой плоскости, равна нулю, а равнодействующая вдоль плоскости есть сумма скатывающей силы и силы трения (рисунок 2.14).

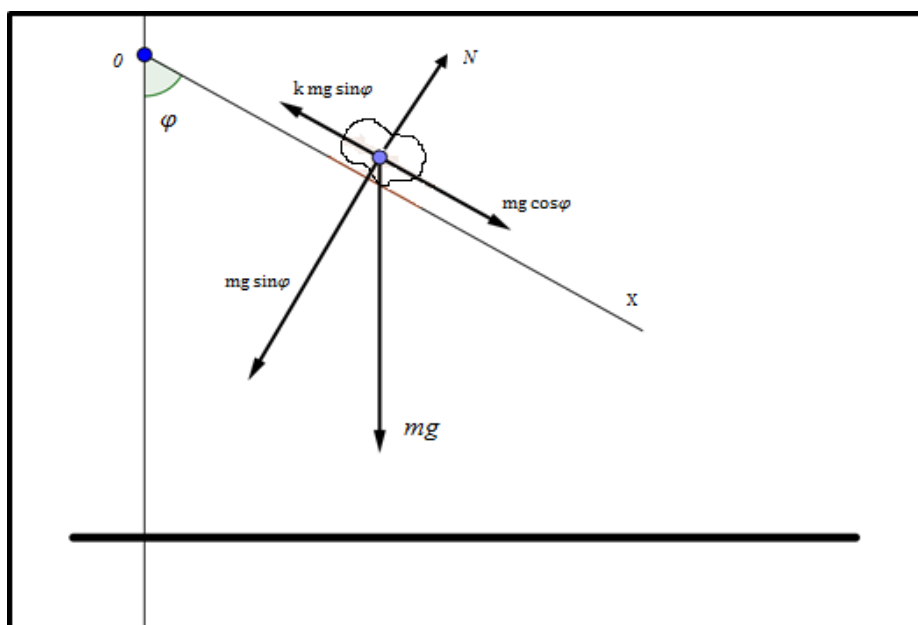


Рисунок 2.14 – Частица на наклонной плоскости



Это позволяет выписать закон движения в следующем виде:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = mg \cos \varphi - k mg \sin \varphi \quad (2.50)$$

где  $m$  – масса смеси на лопастях активатора, кг.

$g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

$k$  – коэффициент трения.

После сокращения на величину массы получаем искомое выражение

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = g(\cos \varphi - k \sin \varphi) = g^* \quad (2.51)$$

Если к этому уравнению добавить начальные условия  $x(0) = 0$  и  $\frac{dx(0)}{dt} = v_0$ ,

то получаем решение для скатывающей скорости

$$v(t) = v_0 + g^* t \quad (2.52)$$

и для пройденного пути

$$x(t) = v_0 t + \frac{1}{2} g^* t^2 \quad (2.53)$$

где  $t$  – время, с.

Отсюда находим время пребывания частицы на наклонной плоскости

$$x(t) = L \Rightarrow t^* = \frac{-v_0 + \sqrt{v_0^2 + 2g^* L}}{g^*} \quad (2.54)$$

К этому времени частица приобретёт скорость покидания лопасти активатора

$$v_n = v(t^*) = v_0 + g^* t^* \quad (2.55)$$

Найдём координаты точки на поверхности смеси, в которую попадёт эта частица в конце своего свободного падения. Если  $H$  – высота точки подвеса механического активатора, то высота падения равна  $H - L \cos \varphi$ . Тогда время падения является решением уравнения

$$v_n \cos \varphi t + \frac{1}{2} g t^2 = H - L \quad (2.56)$$

где  $H$  – высота, м.

$L$  – длина, м.

Решение этого уравнения

$$t_n = \frac{-v_n \cos \varphi + \sqrt{v_n^2 \cos^2 \varphi + 2g(H - L \cos \varphi)}}{g} \quad (2.57)$$

позволяет найти и саму точку падения

$$L \sin \varphi + v_n \sin \varphi t_n \quad (2.58)$$

Теперь наименьший  $\varphi_a$  и наибольший  $\varphi_b$  угол поворота механического активатора определяется решением следующей системы

$$\begin{cases} L \sin \varphi + v_n \sin \varphi t_r \\ L \sin \varphi + v_n \sin \varphi t_r \end{cases} \quad (2.59)$$

### 2.4.1 Определение условий рационального движения механического активатора

Произведём расчёт закона движения механического активатора, используя конструктивные параметры устройства.

Пусть  $a = 0.05$  м и  $b = 0.15$  м – границы пятна заброса, полученные в предыдущем пункте. Зададимся следующими величинами:  $L = 0.19$  м – длина механического активатора;  $H = 0.2$  м – высота подвеса механического активатора;  $v_0 = 0.05$  м/с – начальная скорость движения частицы по поверхности активатора;  $k = 0.01$  – коэффициент трения частиц по металлу. Получаем, что наименьший угол равен  $\varphi_{min} = 15^\circ$ , а наибольший угол  $\varphi_{max} = 46^\circ$ . Один из возможных законов движения механического активатора выглядит следующим образом:

$$\varphi(t) = 30.5 + 15.5 \cdot \sin \omega t \quad (2.60)$$

где  $\omega$  – частота колебаний (выбираем произвольно), Гц.

В заключении обоснуем корректность квазистатического приближения. Для этого достаточно потребовать, чтобы инерционные силы, связанные с непрямолинейным движением механического активатора, были пренебрежимо малы по сравнению с остальными силами. Основная сила, связанная с вращением, – это центростремительная сила, вызываемая ускорением  $\omega^2 r$ . Это ускорение

должно быть, по крайней мере, меньше ускорения свободного падения. Получаем неравенство:  $\frac{\omega^2 L}{2} < g$  и получаем ограничение на частоту в виде неравенства

$$\omega < \sqrt{\frac{2g}{L}} \text{ или } \nu < \sqrt{\frac{2g}{2\pi^2 L}} \quad (2.61)$$

При используемых значениях величин правая часть примерно равна 1,5 ед. Гц. Это значит, что частота колебаний механического активатора не должна превышать 1,5 ед. Герца.

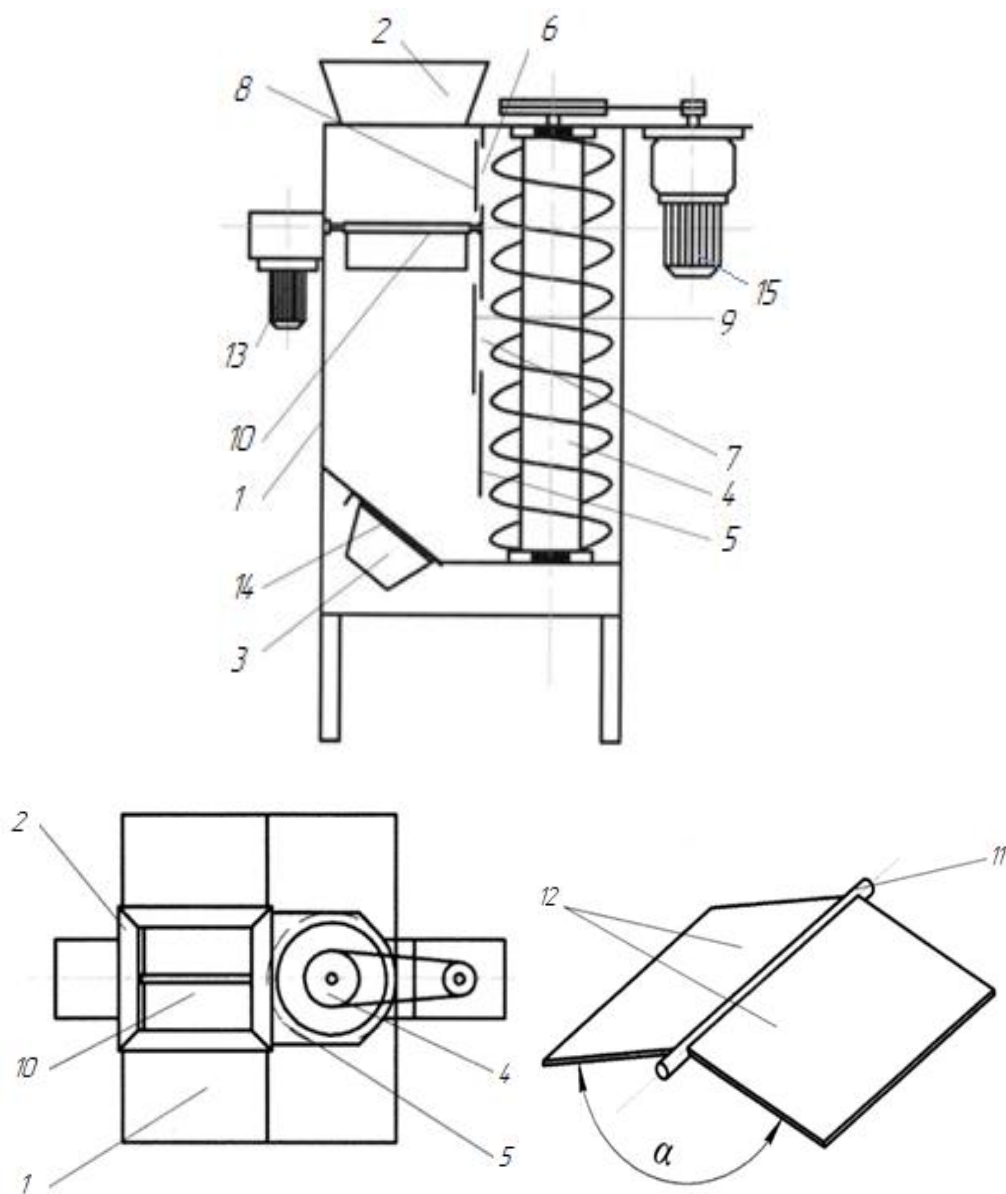
## 2.5 Схема смесителя концентрированных кормов

Схема смесителя концентрированных кормов представлена на рисунке 2.15. Смеситель концентрированных кормов состоит из бункера 1 с загрузочным приемником 2 и выгрузной горловиной 3, вертикального шнека 4 и охватывающего его кожуха 5 с перепускными окнами 6 и 7, с заслонками 8 и 9, регулирующими площадь их проходного сечения. Одно из перепускных окон 7 с заслонкой 9 расположено в средней части кожуха 5, в бункере 1 между перепускными окнами 6 и 7 установлен активатор 10. Он содержит вал 11 с двумя отражателями 12, выполненными в виде пластин, расположенных под углом  $\alpha$  друг к другу и симметрично относительно оси вращения вала 11. Активатор оснащен приводом от электродвигателя 13. Привод шнека осуществляется от электродвигателя 15.

Работа смесителя осуществляется следующим образом: компоненты концентрированной кормовой смеси через загрузочный приемник 2 засыпаются в бункер 1 послойно при закрытой заслонке 14 горловины 3. В процессе работы электродвигатель 15 приводит шнек 4, что обеспечивает перемещение ингредиентов смеси вдоль кожуха 5 вверх. При открытии заслонки 9 перепускного окна 7 меньшая часть компонентов вытесняется посредством шнека 4 обратно в бункер 1, что способствует лучшему их перемешиванию.

Оставшаяся большая часть компонентов через открытую заслонку 8 в кожухе 5 проходит через перепускное окно 6 и попадает на пластины 12

активатора 10. Благодаря электродвигателю 13 активатор 10 совершает колебательные движения относительно оси вращения вала 11. От воздействия пластин компоненты кормовой смеси равномерно распределяются по объему бункера 1, что и способствует лучшему их перемешиванию. После двух-трех циклов циркуляции смесь приобретает однородные свойства, и ее выгружают через горловину 3 через открытую заслонку 14 [116].



1 – рама; 2 – загрузочный приемник; 3 – выгрузная горловина; 4 – шнек; 5 – кожух шнека; 6, 7 – перепускные окна; 8, 9 – заслонки; 10 – механический активатор; 11 – вал активатора; 12 – лопасти активатора; 13, 15 – электродвигатели приводов; 14 – шиберная заслонка.

Рисунок 2.15 – Схема смесителя концентрированных кормов

Совместная работа шнека и механического активатора смесителя обеспечивает высокие показатели коэффициента вариации приготавливаемого концентрированного корма, а также равномерное распределение порошкообразных кормовых добавок (премиксов) по объему смеси. Во время осуществления технологического процесса приготовления концентрированных кормов рабочие органы смесителя приводят в движение сыпучие компоненты, в рабочем процессе присутствуют так же фаза полета, скольжения по поверхности, фазы конвекции в бункере и т.д.

В связи с вышесказанным, для построения модели смешивания необходимо выбрать математический аппарат, с помощью которого могут быть описаны наблюдаемые факты. На наш взгляд, следует использовать аппарат гидродинамики, термодинамики и статистической физики. Обоснованиями для такого утверждения являются следующие допущения:

- 1) смесь мелких частиц в фазе полета ведёт себя подобно жидкости;
- 2) наличие свободного пространства в бункере для падения частиц обеспечивает направленное движение смеси, т.е. её конвекцию;
- 3) временные интервалы, на которых исследуются процессы, достаточно велики, так что движение частиц можно считать установившимся.

## **Выводы**

В результате выполненных теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Смеситель концентрированных кормов должен содержать бункер для зерна и шнек, при этом шнек должен обеспечивать циркуляцию зерна в бункере, забирая его из нижней части бункера и подавая в верхнюю. Перед поступлением в бункер корм должен попадать на лопасти механического активатора, который распределяет его по поверхности бункера, за счет чего интенсивность смешивания многократно увеличивается.

2. Теоретически установлено, что интенсивность процесса смешивания зависит от пятна заброса корма в зерновой бункер, создаваемого механическим

активатором. Так, при расположении его левой границы на 0,02 м и правой на 0,17 м среднее время одного оборота смеси составляет 210 с, коэффициент вариации 0,466, а при расположении его от левой границы на 0,05 м и от правой на 0,15 м, время оборота смеси уменьшается до 72 с, а коэффициент вариации увеличивается до 0,819.

3. Теоретически определено, что параметры механического активатора находятся в следующих границах: средняя скорость зерна, поступающего на его поверхность, 0,05 м/с, длина лопастей составляет 0,19 м, высота его расположения над уровнем зерна в бункере 0,2 м, а частота его колебаний не должна превышать 1,5 Гц.

## ГЛАВА 3 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СМЕСИТЕЛЯ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ КОРМОВ

### 3.1 Программа лабораторных исследований

В современных условиях возникает необходимость обеспечения продовольственной безопасности нашей страны [24]. В связи с этим процессы производства, заготовки, хранения и приготовления кормов для сельскохозяйственных животных приобретают особую значимость. К используемым машинам, в частности, смесителям концентрированных кормов, предъявляют ряд требований, приобретающих особое значение для их производства [21, 41, 47,]. Вот далеко не полный, но основной перечень требований:

- низкая энергоёмкость технологического процесса;
- универсальность;
- возможность быстрого изменения рецептуры приготавливаемых кормов;
- высокие эргономические и эксплуатационные свойства;
- высокая техническая надёжность;
- отсутствие потерь, порчи, а так же измельчения компонентов кормовой смеси.

Предложенная нами конструкция смесителя должна отвечать представленным выше требованиям и обеспечивать при этом приготовление качественных многокомпонентных сухих концентрированных кормов, апри необходимости – обогащать приготавливаемую кормовую смесь сыпучими премиксами и масленнорастворимыми кормовыми добавками, вводимыми в незначительных количествах [115, 116, 134, 135].

Известно, что физико-механические свойства приготавливаемой смеси концентрированных кормов зависят от целого ряда управляемых и неуправляемых факторов [14, 55, 98, 99, 100, 101, 102], к которым относятся:

- влажность и температура смешиваемых компонентов;

- степень очистки зерна от пылевидных частиц;
- размеры отдельных зерен в зерновой массе;
- степень измельчения компонентов зерновой смеси;
- количественное соотношение компонентов смеси и т.д.

Значительное влияние на свойства приготавливаемой смеси так же оказывают конструктивно-технологические особенности смесителя [57, 58, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 120].

Конструктивные особенности смесителей, помимо прочего, определяются культурой их производства и предельными отклонениями и допусками. В частности, из-за неточности изготовления и сборки могут отличаться углы навивки шнека и расстояние между стенкой рабочей камеры и навивкой шнека [109, 110, 111, 112, 113, 114, 129].

Принимая во внимание представленные выше обстоятельства, можно утверждать, что полное аналитическое обоснование конструктивно-технических параметров разработанной установки представляется весьма приближенным, так как ряд процессов, протекающих при смешивании, имеет вероятностный характер. Перед изготовлением производственного образца смесителя концентрированных кормов необходимо экспериментально определить основные параметры и режимы его работы.

В качестве критериев оптимизации, позволяющих оценивать эффективность рабочего процесса смесителя сухих концентрированных кормов, можно принять следующие:

- производительность  $Q$  (кг/с) и энергоемкость  $E$  (кВт·ч/т) рабочего процесса;
- продолжительность рабочего процесса  $t$ , мин, обеспечивающая достижение требуемой степени коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , %, которая характеризует качество приготавливаемого корма.

Теоретическое исследование предложенной нами конструкции смесителя концентрированных кормов, а так же анализ известных теорий смешивания, позволяют утверждать, что наиболее целесообразно программу исследований



провести в два этапа [120, 122, 165, 166, 167]. На первом этапе исследования необходимо установить параметры и режимы работы шнека. На втором этапе исследования необходимо изучить влияние конструктивно-технологических параметров механического активатора и режимов его работы на качество приготовления смеси концентрированных кормов.

Для обоснования основных конструктивно-технологических параметров рабочего процесса предлагаемого смесителя концентрированных кормов необходимо реализовать следующую программу исследований.

1. Исследовать влияние высоты насыпи на усилие, необходимое для перемещения частиц в смешиваемой массе (динамический коэффициент внутреннего трения).

2. Исследовать совместное влияние частоты вращения рабочего шнека, угла его отклонения от вертикали в сторону выгрузной горловины и степени открытия перепускного окна на производительность и энергоемкость технологического процесса лабораторной установки смесителя с демонтированным активатором. Установить математические модели, описывающие влияние перечисленных факторов на производительность и энергоемкость. Определить значения исследуемых факторов, обеспечивающие максимальную производительность рабочего шнека.

3. Установить зависимость качества смешивания, выраженную показателем коэффициента вариации зерновой смеси, от времени технологического процесса при демонтированном активаторе и значениях перечисленных в пункте 1 факторов.

4. Исследовать процесс механического активатора. Установить математическую модель, описывающую влияние угла раскрытия лопастей активатора, его поворота относительно оси рабочего вала и частоты его колебаний на показатель коэффициента вариации смеси.

5. Установить зависимость качества смешивания, выраженную показателем коэффициента вариации зерновой смеси, от времени технологического процесса при установленном активаторе и оптимальных значениях перечисленных в пункте

3 факторов. На основании полученных данных определить время приготовления кормосмеси.

### **3.2 Конструкция лабораторной установки смесителя концентрированных кормов с активатором**

Для проведения лабораторных исследований, был изготовлен опытный образец смесителя концентрированных кормов [121, 123, 131, 132].

На рисунке 3.1 представлен общий вид смесителя с активатором. Для более подробного рассмотрения внутреннее устройство смесительной камеры и конструкция механического активатора представлены на рисунке 3.2.

Смеситель состоит из рамы 1 (рисунок 3.1), расположенной на подвижной платформе 2, на которой вертикально установлен смесительный бункер 3. В задней части бункера закреплен кожух 4 с установленным внутри смесительным шнеком 5. Привод шнека осуществляется от электродвигателя 6 через цепную передачу 7. В передней части рабочей камеры находится выгрузное окно 8, закрываемое шиберной заслонкой 9. Имеется так же пульт управления 10, позволяющий осуществлять пуск и остановку электродвигателя и его реверс.

Корпус смесителя концентрированных кормов снабжен устройством для изменения величины угла наклона рабочего шнека 5 от вертикального положения в диапазоне  $\pm 15^\circ$ , а также системой контроля величины наклона шнека 11.

Кожух шнека соединен с рабочей камерой посредством перепускного окна 13, размер открытия которого регулируется при помощи заслонки 14, управляемой ручкой 15 и фиксируемой при помощи устройства 16. В нижней части смесительного бункера 3 имеется окно 17, через которое зерно подается на лопасти шнека 5, а в верхней части имеется выгрузное окно 18, через которое осуществляется выход циркулирующего потока зерна. Имеется так же дополнительная шестерня 12, позволяющая изменять частоту вращения рабочего шнека и его крутящий момент.

Конструкция механического активатора представлена на рисунке 3.2.

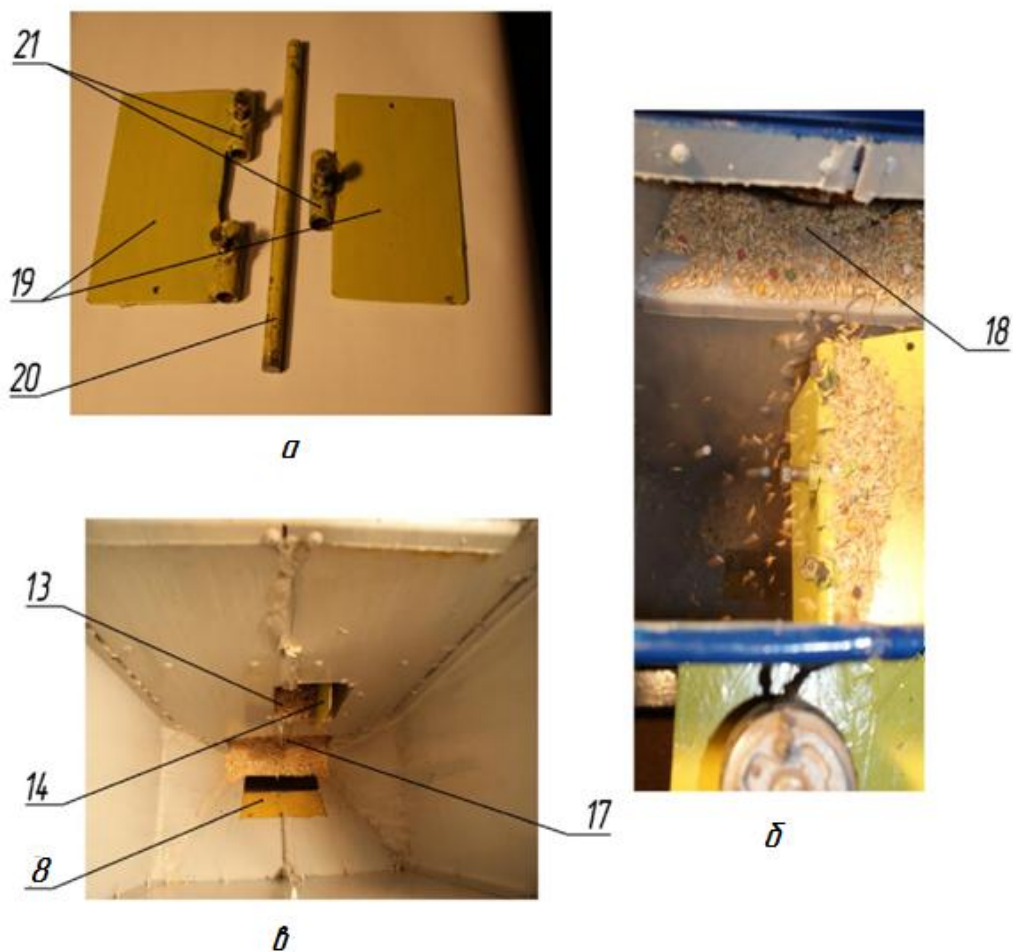


а – вид спереди; б, в – вид сбоку; г – вид привода;

д – вид выгрузного окна

Рисунок 3.1 – Общий вид смесителя концентрированных кормов

Конструкция механического активатора, представленного на рисунке 3.2-а, состоит из двух пластин-лопастей 19, закрепленных на валу 20. Пластины снабжены регулировочными втулками 21, позволяющими закреплять их на валу 20 под необходимым углом. В передней части установки имеется шатунно-кривошипный механизм 22 привода активатора, снабженный электрическим двигателем 23. Шатунно-кривошипный механизм позволяет совершать активатору возвратно-поступательные движения относительно своей оси.



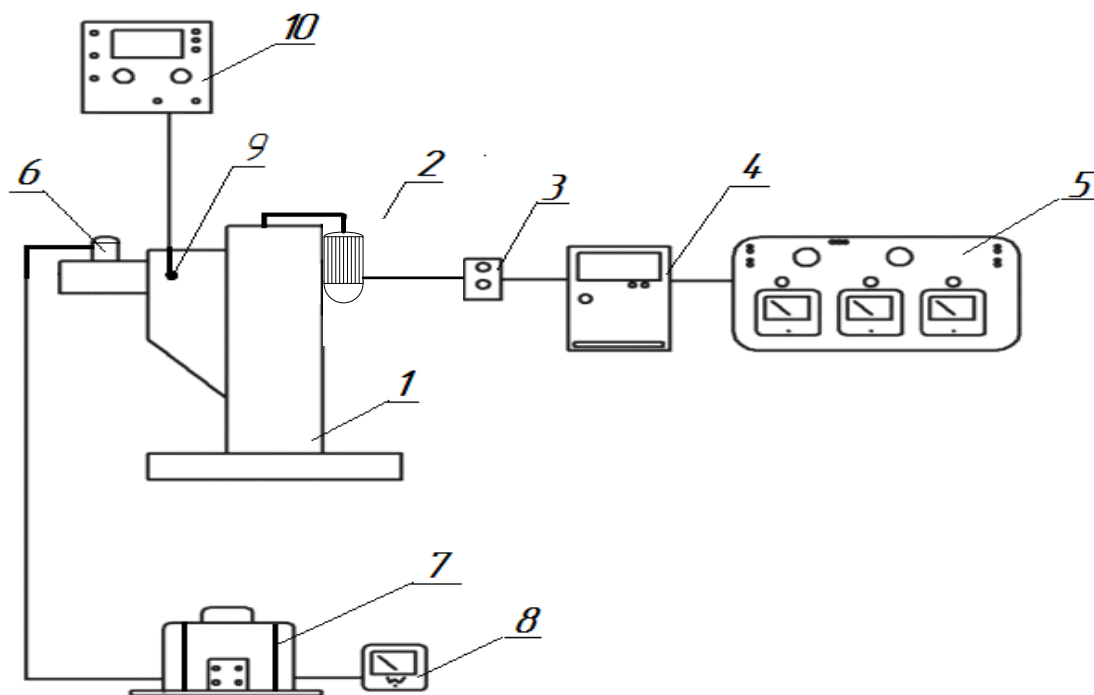
а – механический активатор (разобран); б – механический активатор во время работы, в – рабочая камера смесителя с демонтированным активатором.

Рисунок 3.2 – Вид смесительного бункера смесителя концентрированных кормов

Для проведения экспериментальных исследований опытный образец смесителя концентрированных кормов был дополнительно оснащен контрольными и измерительными приборами. Схема получившейся таким образом лабораторной установки приведена на рисунке 3.3.

В состав лабораторной установки входит: смеситель концентрированных кормов 1; асинхронный электродвигатель, приводящий шнек 2; коммутационно-защитный аппарат 3, осуществляющий включение и выключение, а также реверс электродвигателя рабочего шнека и защиту от аварийных режимов

работы; частотный регулятор 4 марки ЭПВ-Р, обеспечивающий изменение частоты вращения электродвигателя шнека в требуемых пределах; комплект измерительных приборов 5 марки К-51, предназначенный для измерения мощности, потребляемой основным двигателем лабораторной установки.



- 1 – смеситель; 2 – электродвигатель (асинхронный);  
 3 – коммутационно – защитный аппарат; 4 – частотный регулятор; 5 – прибор К-51; 6 - электродвигатель (шунтового типа); 7 – ЛАТР; 8 – ваттметр; 9 – датчик ФОН1; 10 - осциллограф

Рисунок 3.3 – Схема лабораторной установки

Для обеспечения питания электродвигателя механического активатора 6 шунтового типа установка снабжена лабораторным автотрансформатором 7 марки 1М. Ваттметр 8 марки АРРА 135 позволяет измерять мощность, потребляемую электродвигателем механического активатора.

Контроль частоты колебаний, совершаемых механическим активатором, осуществляется электромагнитным датчиком 9 марки ФОН-1, показания которого

выводили на осциллограф 10 марки С1-35. Расположение приборов во время проведения опытов представлено на рисунке 3.4.

Снабжение лабораторной установкой контрольно-измерительными и вспомогательными приборами позволяет:

- изменять частоту вращения шнека смесителя;



- 1 – смеситель концентрированных кормов; 2 – ЛАТР марки 1М; 3 – емкость для отбора проб приготавливаемой смеси; 4 – прибор К-51; 5 – осциллограф марки С1-35.

Рисунок 3.4 – Лабораторная установка

- измерять мощность, потребляемую электродвигателем шнека смесителя;
- изменять угол наклона шнека относительно вертикали (от 0 до  $\pm 15^\circ$ );
- изменять угол открытия перепускного окна (от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ );
- регулировать частоту колебаний механического активатора в диапазоне от 15 до 50 мин<sup>-1</sup>;
- изменять величину угла раскрытия плоскостей механического активатора в диапазоне от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ ;

- изменять величину угла колебаний активатора в диапазоне от  $0^\circ$  до  $85^\circ$ ;
- измерять мощность, потребляемую электродвигателем механического активатора.

### **3.3 Методика лабораторных исследований смесителя концентрированных кормов**

#### **3.3.1 Методика исследования влияния высоты слоя смешиваемой массы на усилие, необходимое для перемещения частиц**

Известно, что в процессе смешивания концентрированных кормов внутри массы происходит перемещение отдельных зерен по довольно сложным траекториям. Это процесс, который, по нашему мнению, является важным для обоснования режимов работы смесителя концентрированных кормов. Проводимый нами эксперимент был направлен на исследование величины усилия, которое необходимо приложить к зерну для его транспортировки внутри зерновой массы [39].

Необходимо принять во внимание, что на усилие, требуемое для перемещения зерна, будет оказывать влияние целый ряд внешних факторов: сила трения зерна по зерну, сила реакции, возникающая в результате давления на зерно слоя зерновой массы, скорость перемещения и т.д [18]. Для экспериментов использовали озимое зерно пшеницы сорта «Московская 39» влажностью 13-15%, ячмень озимый сорта «Тимофей» влажностью 11-13%. Для проведения экспериментов взяли емкость полезным объемом  $V=0,025 \text{ м}^3$ , внутрь которой засыпали зерно (рисунок 3.5). На расстоянии 50 мм от дна емкости размещалась нить, на которой были закреплены зерна, нить выходила в специальное отверстие в стенке. Сверху засыпали необходимое количество зерна, чтобы обеспечить внутрисловное давление, в частности, опыты проводились при величине слоя зерна 50, 150, 250, 350 и 400 мм.

К свободному концу нити прикрепляли динамометр с ценой деления в 0,1 Н, после чего к динамометру прикладывали силу, в момент начала движения показания динамометра фиксировали. Эксперименты проводили по схеме, представленной в таблице 3.1.

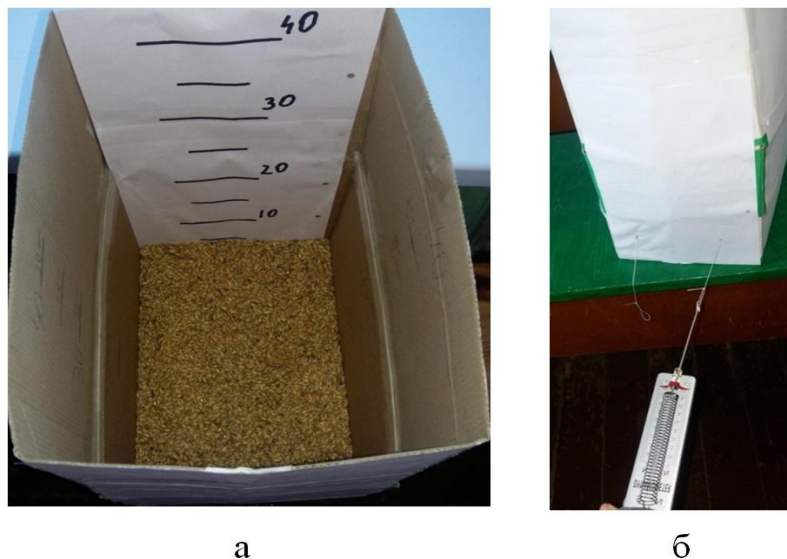


Рисунок 3.5 – Мерная емкость для определения величины усилия, необходимого для транспортировки зерна внутри зерновой массы (а); процесс транспортировки зерна внутри зерновой массы (б)

Таблица 3.1. Схемы исследования движения зерна внутри зерновой массы.

Условия транспортировки зерна	Состав зерновой массы	Состав зерен транспортируемых
Три зерна на расстоянии 50 мм, транспортируемые по длине	Пшеница озимая сорта «Московская 39» влажностью 14%	Пшеница озимая сорта «Московская 39» влажностью 14%
	Ячмень озимый сорта «Тимофей» влажностью 11%	Ячмень озимый сорта «Тимофей» влажностью 11%
Три зерна на расстоянии 50 мм, транспортируемые по ширине	Ячмень озимый сорта «Тимофей» влажностью 11%	Ячмень озимый сорта «Тимофей» влажностью 11%
	Ячмень озимый сорта «Тимофей» влажностью 11%	Пшеница озимая сорта «Московская 39» влажностью 14%
Одно зерно, транспортируемое по длине	Пшеница озимая сорта «Московская 39» влажностью 14%	Ячмень озимый сорта «Тимофей» влажностью 11%
Одно зерно, транспортируемое по ширине	Ячмень озимый сорта «Тимофей» влажностью 11%	Пшеница озимая сорта «Московская 39» влажностью 14%



Каждый опыт проводили с пятикратной повторностью [17].

### **3.3.2 Методика проведения многофакторного исследования параметров смесителя концентрированных кормов**

В соответствии с разработанным планом лабораторного исследования, проводимый на первом этапе эксперимент был направлен на изучение совместного влияния следующих управляемых факторов на критерий оптимизации:

- частота вращения рабочего шнека ( $x_1$ );
- угол наклона рабочего шнека относительно вертикали выгрузной горловины ( $x_2$ );
- степень раскрытия перепускного окна, находящегося в середине кожуха шнека ( $x_3$ ).

Измеряемыми параметрами, а в последующем и критериями оптимизации исследуемого технологического процесса, являлись: производительность ( $Q$ ), мощность ( $N$ ) и энергоёмкость ( $E$ ) процесса. Основным критерием оптимизации является производительность  $Q$ , кг/с. Энергозатраты, в свою очередь, зависят от производительности, так как на них в большей мере влияют объёмы транспортируемого продукта, инерционные показатели рабочих органов, а также силы трения.

Принимая во внимание предварительно приведённые расчёты [119, 125, 126, 133, 139], частоту вращения рабочего шнека ( $x_1$ ) в эксперименте выбирали в диапазоне от 30 до 70 об/мин. При имеющихся габаритных размерах шнека частота его вращения менее чем 30 об/мин, приводит к неустойчивому процессу смешивания в результате просачивания зерна между кожухом шнека и навивкой. Увеличение частоты вращения свыше 70 об/мин будет неоправданно повышать энергоёмкость рабочего процесса, так как возрастут затраты на трение в смешиваемых компонентах о навивку шнека, увеличится количество травмируемого зерна.

Угол наклона рабочего шнека к выгрузному окну ( $x_2$ ) выбирали в интервале от  $0^\circ$  до  $9^\circ$  таким образом, что при  $0^\circ$  шнек смесителя находится в строго вертикальном положении. Наклон верхней точки шнека вперёд более чем на  $9^\circ$  привел бы к значительному ухудшению поступления зерна через нижнее загрузочное окно, а как следствие, нарушил бы весь технологический процесс.

Проведенные предварительные исследования возможного расположения, а также площади перепускного окна, находящегося в средней части шнека, показывают, что площадь окна не должно превышать 30% от длины окружности кожуха шнека [111, 112, 124]. Для опыта были выбраны следующие положения открытия перепускного окна ( $x_3$ ):

- окно полностью открыто;
- окно полностью закрыто;
- среднее положение, при котором заслонка открыта на  $45^\circ$ .

Принимая во внимание, исследуемое факторное пространство, представляется наиболее целесообразным применение трёхфакторного рототабельного плана Бокса-Бенкина второго порядка с переменными, варьирующими на трёх уровнях (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Факторы и уровни их варьирования

Факторы	Обозн.	Ед.изм.	Уровни варьирования			Интервал варьирования
			нижний	нулевой	верхний	
			Кодированное обозначение			
			-1	0	+1	
Частота вращения шнека	$x_1$	об/мин	30	50	70	20
Угол наклона шнека	$x_2$	град.	0	4,5	9	4,5
Раскрытие перепускного окна	$x_3$	град.	0	45	90	45

Анализ многочисленных работ известных ученых, исследовавших процесс шнека [2,46], показывает, что функция, аппроксимирующей опытные данные, с высокой степенью достоверности является степенная модель вида:

$$y(x_1, \dots, x_k) = b_0 + \sum_1^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_i^k b_{ii} x_i^2, \quad (3.1)$$

где  $y(x_1, \dots, x_k)$  – аппроксимирующая функция;

$b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  – регрессионные коэффициенты при переменных, получаемые в результате статистического поиска.

$x_i, x_j$  – факторы.

$k$  – количество факторов.

### **3.3.3 Методика исследования производительности смесителя концентрированных кормов**

Перед началом проведения опытов установку полностью очищали, для этого вынимали шиберную заслонку (смотреть рисунок 3.1, позиция 9) и удаляли остатки корма при работающим шнеке. После чего заслонку устанавливали на штатное место. Подготовленную установку настраивали на требуемый для исследования режим работы в соответствии с планом экспериментов, приведенном в пункте 3.3.2. Устанавливали требуемые угол наклона шнека и степень раскрытия перепускного окна, после чего установку приводили в действие. Посредством частотного регулятора ЭПВ-Р добивались требуемой для опыта частоты вращения рабочего шнека. Частоту вращения шнека измеряли с помощью тахометра часового типа марки ТЧ-10 с точностью до  $\pm 10$  об/мин.

Далее установку заполняли смесью зерна, состоящей из трех компонентов – ржи, овса и пшеницы в соотношении 1:1:1, до требуемого уровня. После этого установку повторно приводили в действие. При установившемся режиме циркуляции под поток зерна, идущий из верхнего выгрузного окна (рисунок 3.2, позиция 18) рабочего шнека, подставляли мерную емкость объемом 5 л, имеющую большую площадь загрузочного отверстия (рисунок 3.4, позиция 3). Загрузка емкости происходила таким образом, что весь зерновой поток, подаваемый рабочим шнеком, устремлялся в мерную емкость.

С момента начала загрузки емкости измеряли время.

При наполнении емкости ее извлекали из-под зернового потока и определяли по секундомеру марки СМ-60 продолжительность ее заполнения.

После этого вес накопленного зерна определяли взвешиванием на весах марки ВЛКТ-500М с точностью до  $\pm 0,01$  гр.

Производительность шнека вычисляли по следующей формуле [65, 110]:

$$Q = \frac{M}{t}, \quad (3.2)$$

где  $M$  – масса зерна, собранного в мерную емкость, кг.

$t$  – время заполнения мерной емкости зерном, с.

Опыты проводили с трехкратной повторностью. После каждой серии опытов установку отключали, доводили уровень зерновой смеси в рабочем бункере до требуемого уровня и перестраивали на новый исследуемый режим в соответствии с планом опытов, приведенном в пункте 3.3.2.

### **3.3.4 Методика исследования мощности и энергоемкости смесителя концентрированных кормов**

Перед проведением опытов корпус смесителя полностью очищали от остатков зерна и загрязнений, после чего смесителю давали поработать в течение 10-15 минут на холостом ходу, так как во время работы происходит нагрев смазки редуктора и деформация некоторых деталей, что сказывается на энергозатратах на привод смесителя в целом.

С помощью частотного регулятора добивались требуемой для проведения опытов частоты вращения рабочего шнека. Частоту вращения шнека измеряли с помощью стрелочного тахометра часового типа марки ТЧ-10, с точностью  $\pm 10$  об/мин.

При требуемом значении частоты вращения шнека установку отключали и подключали прибор К-51, к выходу частотного регулятора, после чего вновь установку приводили в действие с целью измерения мощности, потребляемой электродвигателем на холостом ходу.

Во время проведения опытов в соответствии с пунктом 3.3.2 измеряли ваттметром величину мощности, потребляемую электродвигателем шнека.

Полезную механическую мощность, совершаемую рабочими органами лабораторной установки, определяли по следующей формуле [7]:

$$N_n = N_{no} - N_{x.x}, \quad (3.3)$$

где  $N_{no}$  – полная мощность, потребляемая рабочими органами смесителя, в исследуемом режиме, кВт.

$N_{x.x}$  – мощность, потребляемая рабочими органами смесителя на холостом ходу, кВт.

Известно, что мощность, потребляемая электродвигателем, приводящим шнек лабораторной установки, подвержена влиянию ряда неуправляемых факторов, так как показатели КПД электродвигателя весьма лабильны, в частности:

- изменение  $\cos \varphi$ , зависящее от величины тормозного момента;
- изменение величины трения в узлах лабораторной установки при разных температурах и видах смешиваемых продуктов.

Поэтому весьма важной характеристикой технологического процесса является энергоемкость [109, 126].

Энергоемкость  $E$ , кВт·ч/т, вычисляли по следующей формуле:

$$E = N/Q. \quad (3.4)$$

где  $Q$  – производительность смесителя, т/ч.

$N$  – мощность, потребляемая электродвигателем, приводящим смесительный шнек, кВт.

После определения энергетических показателей смесительного шнека было решено исследовать затраты энергии, необходимые для обеспечения рабочего процесса механического активатора. Привод механического активатора осуществлялся от шунтового электродвигателя, частоту которого изменяли путем изменения величины питающего напряжения. Контроль мощности, потребляемой электродвигателем механического активатора, осуществляли посредством ваттметра марки АРРА-135 в соответствии со структурной схемой (рисунок 3.3, позиция 8).

### 3.3.5 Методика исследования влияния продолжительности смешивания компонентов без использования активатора на коэффициент вариации

Смешивание представляет собой механический процесс, направленный на получение однородной смеси, состоящей из двух и более компонентов, частицы которых распределены равномерно по всему перемешиваемому объему, что достигается путем взаимного их перемещения под воздействием внешних механических сил. Степень коэффициента вариации готовой смеси определяется методом отбора проб по определяющему признаку с последующим статистическим анализом. Определяющими признаками могут служить следующие величины: число частиц компонента в пробе, его массовая доля, размеры частиц и т.п. Завершенность процесса смешивания характеризуется показателем коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , который представляет собой отношение массовой доли контрольного компонента в анализируемой пробе к массовой доле этого же компонента в рецептурной смеси, выраженное в долях единицы (или в процентах).

В таблице 3.3 приведено соответствие характеристики качества смеси количественному значению степени коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , %, принятое в соответствии с ГОСТ для концентрированных кормов [12, 107].

Таблица 3.3 – Характеристика качества смеси

Качество смеси	$\lambda$ , %
Хорошее	>92
Удовлетворительное	85...92
Плохое	<85

В лабораторных условиях степень коэффициента вариации смеси  $\lambda$  можно определить по выражению:

$$\lambda = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{B_0} \cdot \frac{1}{n}, & B_i < B_0 \\ \sum_{i=1}^n \frac{(2 - B_i/B_0)}{n}, & B_i > B_0 \end{cases} \quad (3.5)$$

где  $B_i$  – доля контрольного компонента в  $i$ -й пробе, %.

$B_0$  – доля этого же компонента в рецептурной смеси, %.

$n$  – количество проб.

В качестве контрольного компонента обычно выбирают компонент с меньшей массовой долей в смеси. Пробы берут из разных участков объема готовой смеси, в количестве не менее 5 проб из каждого участка. При анализе сухих смесей с относительной влажностью не более 17% рекомендованная масса пробы составляет 2-5 г [66].

Исследование проводили на приготовлении зерновой смеси из очищенной ржи (40%), пшеницы (45%) и овса (15%). Компонент с меньшей массовой долей в смеси (овес) принят в качестве контрольного и предварительно промаркирован – окрашен в оранжевый цвет. Подготовленное таким образом сырье, общей массой ( $50 \pm 0,1$  кг) загружали в смеситель и включали его в режиме при установленных в пункте 3.3.2 значениях частоты вращения шнека, угла его наклона относительно вертикали выгрузной горловины и степени раскрытия перепускного окна, находящегося в середине кожуха шнека.

Фактором варьирования являлось продолжительность рабочего процесса, установленного на 7 уровнях: 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19 минут.

По окончании процесса перемешивания установку отключали и производили выгрузку кормовой смеси в 3 этапа: сначала выгружали нижнюю часть объема смеси, из которой отбирали 5 проб массой по  $10 \pm 0,01$  г. Точно также отбирали по 5 проб из средней и верхней части объема смеси. Процессом выгрузки управляли при помощи шиберной заслонки. Таким образом, для каждого значения фактора формировали 15 экспериментальных проб с 3-х участков рабочего объема. Каждую пробу взвешивали на весах марки ВЛКТ-500М, затем ручным способом отделяли маркированный контрольный компонент (овес), который также взвешивали и определяли его массовую долю в пробе. Показатель коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , % (критерий оптимизации) определяли по выражению 3.5.

Опыты проводили с 3-х кратной повторностью в каждой точке.

### **3.3.6 Методика исследования механического активатора на коэффициент вариации. Планирование многофакторного эксперимента**

Описанная в пункте 3.2 лабораторная установка смесителя концентрированных кормов содержит в рабочем бункере активатор процесса смешивания, представленный на рисунке 3.6, состоящий из двух лопастей, закрепленных под углом на валу. Кривошипно-шатунный электрифицированный привод вала активатора позволяет совершать ему возвратно-поступательные движения. Работа активатора обеспечивает нарушение струйного истечения компонентов концентрированного корма, подаваемых в бункер посредством шнека, что в значительной мере способствует процессу дезориентации частиц, то есть ускоряет смешивание.

Работа активатора осуществляется следующим образом: шнек подает концентрированный корм сверху на его лопасти. Кормовой поток, разделенный на две части, стекает по лопастям в рабочую камеру, при этом активатор совершает возвратно-поступательные движения относительно рабочего вала. Таким образом, внутри рабочего бункера создается однородная перемешанная многокомпонентная масса.

Теоретическое исследование, приведенное в главе 2, позволяет утверждать, что в предложенной конструкции смесителя концентрированных кормов на процесс смешивания наиболее значимо влияют следующие факторы:

- угол раскрытия лопастей механического активатора ( $x_1$ );
- угол поворота механического активатора относительно оси рабочего вала ( $x_2$ );
- частота колебаний механического активатора ( $x_3$ ).

Для нахождения значений факторов, сочетание которых обеспечивает наилучшее качество получаемой смеси  $\lambda$  %, необходимо провести трехфакторный эксперимент.

С целью обеспечения высокой точности опытных данных наиболее целесообразным представляется проведение трёхуровневого эксперимента.





Рисунок 3.6 – Механический активатор процесса смешивания в сборе

Диапазон варьирования факторами выбирали на основании априорных экспериментальных данных и результатов теоретического исследования [128].

Угол раскрытия лопастей механического активатора ( $x1$ ) находится в диапазоне от  $70^\circ$  до  $130^\circ$ . Уменьшение угла раскрытия лопастей активатора менее  $70^\circ$  не оказывает существенного влияния на изменение струйности истечения зерна, а следовательно, активатор в целом несущественно влияет на процесс смешивания компонентов кормосмеси. Увеличение угла на величину более  $130^\circ$  является существенным препятствием на пути истечения зерна и создает неравномерность распределения зерна в рабочей камере.

Угол поворота (колебаний) активатора ( $x2$ ) не должен превышать  $60^\circ$ , т.к. превышение этой величины в сочетании с высокой скоростью движения приводит к выбросу значительной части зерна из рабочей камеры, а понижение величины менее чем до  $20^\circ$  практически не изменит струйности потока, что сводит на нет эффект от использования активатора.

Частоту колебаний ( $x_3$ ) выбирали в диапазоне от 40 до 90 мин<sup>-1</sup>, поскольку превышение значения 90 мин<sup>-1</sup> не дает желаемого эффекта смешивания, т.к. превосходит производительность смесительного шнека. Понижение частоты меньше значения 40 мин<sup>-1</sup> способствует процессу сегрегации концентрированного корма.

Исследуемые факторы и уровни их варьирования представлены в таблице 3.4. Критерием оптимизации, характеризующим качество получаемой смеси концентрированных кормов, является степень коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , %. Методика определения этого показателя приведена в пункте 3.3.5.

Таблица 3.4 – Факторы и уровни их варьирования

Факторы	Обозначение	Ед.изм.	Уровни варьирования			Интервал варьирования
			нижний	нулевой	верхний	
			Кодированное обозначение			
			-1	0	+1	
Угол раскрытия лопастей механического активатора	$x_1$	град.	70	100	130	30
Угол поворота механического активатора	$x_2$	град.	20	40	60	20
Частота колебаний	$x_3$	раз/мин	40	65	90	25

Эксперимент проводили при фиксированном значении времени рабочего процесса  $t$ , мин. При определении значения  $t$ , мин руководствовались следующими соображениями. Оптимальное время, необходимое для достижения удовлетворительной степени коэффициента вариации (85%) при демонтированном активаторе и значениях технологических показателей, соответствующих максимальной производительности, определено в пункте 3.4.3 и составляет 13 мин. Наличие активатора, как предполагается, должно значительно ускорить процесс смешивания. Поэтому при варьировании факторами, обозначенными в таблице 3.4, для получения более или менее различимых между

собой значений отклика необходимо как минимум вдвое уменьшить продолжительность процесса смешивания.

Таким образом, время рабочего процесса в данном эксперименте было определено на основании однофакторного эксперимента и составляло около 7 минут.

### **3.3.7 Методика исследования влияния продолжительности смешивания при использовании активатора на коэффициент вариации.**

Заключительный этап лабораторных исследований – определение времени рабочего процесса, необходимого для достижения удовлетворительного качества смеси при работе смесителя концентрированных кормов в режиме, соответствующем рациональным значениям основных технологических параметров активатора, определенным в пункте 3.3.4 при обработке результатов проведенных экспериментов.

Варьирование фактором «время рабочего процесса смесителя»  $t$ , мин осуществляли на 7 уровнях при значении верхнего уровня 7 минут (пункт 3.3.6): 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 минут.

Методика отбора проб и определения критерия оптимизации полностью соответствует описанию в пункте 3.3.5. Опыты проводили с 3-х кратной повторностью в каждой точке.

Найденное рациональное значение времени рабочего процесса с установленным активатором будет являться определяющим при вычислении производительности смесителя концентрированных кормов.

## **3.4 Результаты лабораторных исследований смесителя концентрированных кормов**

### **3.4.1 Результаты исследования усилия, необходимого для перемещения зерна внутри зерновой массы**

Опытные данные представлены в приложении А1.

В результате обработки опытных данных по стандартным статистическим алгоритмам удалось установить ряд эмпирических зависимостей, описывающих исследуемый процесс. Статистическую обработку проводили в среде MathCAD.

Поскольку исследуемый процесс движения отдельных частиц внутри массы не достаточно изучен, установление наиболее адекватной математической модели осуществляли в два этапа. На первом этапе определяли вид математической модели, описывающий с наивысшей достоверностью вероятностные показатели требуемого усилия, на втором этапе подбирали коэффициенты регрессии для выбранной модели. Основные этапы обработки проведены в приложении А2.

Зависимость усилия перемещения одного зерна ячменя  $F_1$ , Н и трех зерен этой же культуры  $F_3$ , Н, транспортируемых по длине на расстояние 50 мм друг от друга внутри зерновой массы от толщины слоя зерна  $h$ , см приведены в виде формул 3.6-3.7, а также представлены графически на рисунке 3.7.

Статистическое исследование, направленное на выбор наиболее приемлемого вида аппроксимирующей функции, описывающий исследуемый процесс, позволили установить, что с наивысшей достоверностью процесс описывается уравнением логарифмического вида (приложение А2) [40]. Зависимость усилия перемещения одного зерна от высоты слоя зерновой массы:

$$F_1(h) = -1.61 + 1.57 \cdot \ln(h), \quad (3.6)$$

где  $h$ -высота зернового слоя, (см.).

Коэффициент детерминации данной математической модели  $R^2=0,938$ , что говорит о высокой степени достоверности установленной модели реальному физическому процессу [7].

Уравнение, описывающее аналогичный процесс при транспортировке трех зерен:

$$F_3(h) = -1.543 + 2.087 \cdot \ln(h), \quad (3.7)$$

При этом коэффициент детерминации достигает  $R^2=0,938$ .

В результате следующего этапа исследования удалось установить величину

усилия, требуемую для перемещения зерен ячменя транспортируемых внутри зерновой массы ячменя по толщине.

Усилие перемещения одного зерна  $F_1$ , Н и трех зерен ячменя  $F_3$ , Н, транспортируемых по толщине внутри зерновой ячменной массы от величины слоя  $h$ , см представлены выражениями 3.8-3.9, представлены графически на рисунке 3.8.

$$F_1(h) = -2.496 + 1.907 \cdot \ln(h), \quad (3.8)$$

$$F_3(h) = -3.386 + 2.487 \cdot \ln(h), \quad (3.9)$$

Приведенные уравнения описывают исследуемый процесс с высокой достоверностью, так как коэффициенты детерминации  $R^2$  соответственно равны 0,826 и 0,806.

Провели статистическую обработку данных, проведенных опытов.

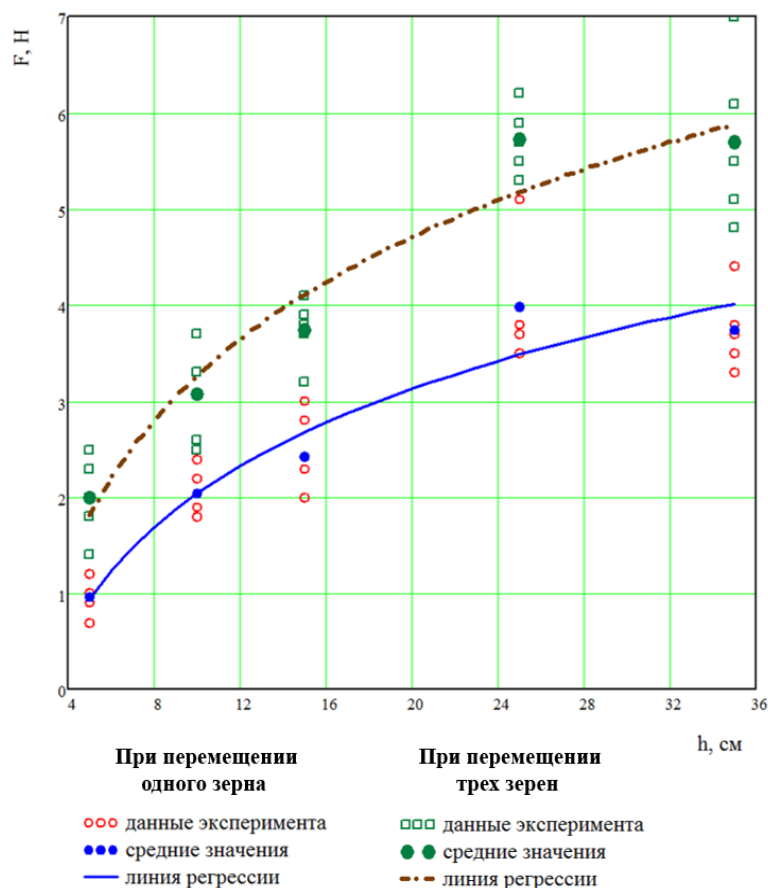


Рисунок 3.7 – Графическая зависимость усилия необходимого для перемещения  $F$ , (Н) зерен ячменя транспортируемого по длине от высоты слоя зерновой массы  $h$ , см

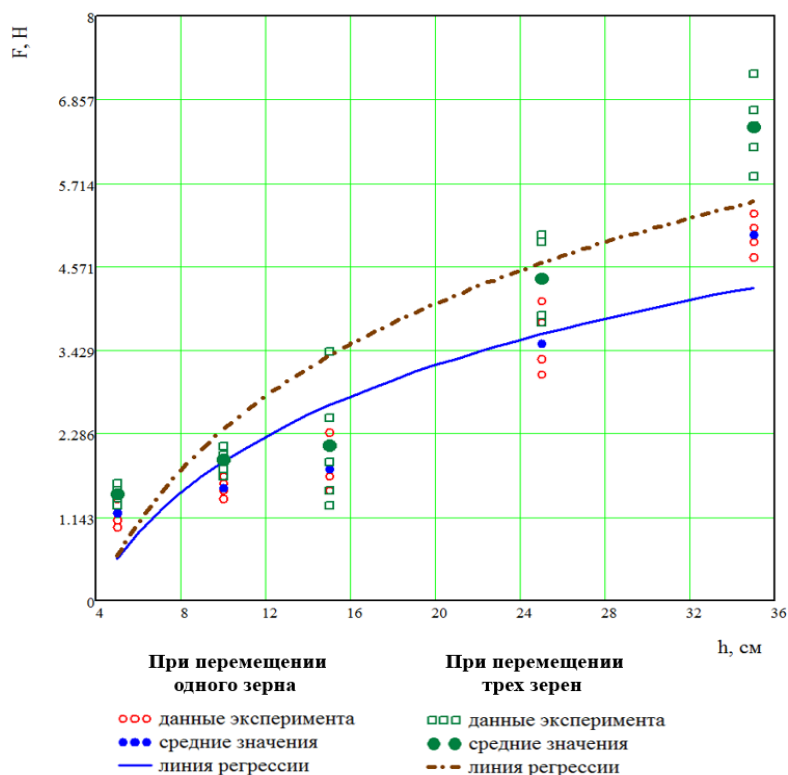


Рисунок 3.8 – Графическая зависимость усилия  $F$ , Н, необходимого для перемещения транспортируемых по толщине зерен ячменя внутри зерновой массы этого вида от высоты слоя  $h$ , см

Вид установленных зависимостей позволяет утверждать, что при транспортировке зерен по ширине в значительной мере начинает проявляться «туннельный» эффект в результате которого образуется канал в зерновой массе, что снижает величину усилия, требуемую для передвижения зерен вдоль прямой находящихся на расстоянии 50 мм друг от друга.

Поскольку и размер и форма и состояние поверхности разных видов зерна отличаются весьма существенно, следующий этап исследования посвящен анализу свойств пшеницы сорта «Московская 39».

В результате статистической обработки данных, полученных при проведении опытов, удалось установить математическую модель 3.10-3.11 зависимости усилия, необходимого для перемещения зерен пшеницы внутри зерновой пшеничной массы при транспортировке по толщине, также представлены графически на рисунке 3.9. и по длине зерна 3.12-3.13 (рисунок 3.10). Коэффициенты детерминации полученных уравнений соответственно

равны  $R^2=0,924$ ;  $R^2=0,987$ ;  $R^2=0,953$ ;  $R^2=0,985$ . Результаты статистической обработки приведены в приложении А2.

$$F_1(h) = -1.755 + 1.77 \cdot \ln(h), \quad (3.10)$$

$$F_3(h) = -1.751 + 2.157 \cdot \ln(h), \quad (3.11)$$

$$F_1(h) = -1.66 + 1.931 \cdot \ln(h), \quad (3.12)$$

$$F_3(h) = -4.185 + 3.817 \cdot \ln(h), \quad (3.13)$$

Зависимости 3.10-3.13 представлены графически на рисунках 3.9-3.10.

Анализ установленных зависимостей показывает, что при транспортировке зерна внутри зерновой массы максимальные значения усилия отмечаются при перемещении трех зерен пшеницы по пшенице. Помимо особенностей, связанных с габаритными размерами зерен, такой эффект может создать и шероховатость оболочки зерна [13]. Поскольку в реально действующих смесителях, как правило, осуществляется смешивание нескольких видов зерна, необходимо получить экспериментальные данные, характеризующие такое взаимодействие. Возможно, предположить, что установленные результаты позволят получить диапазоны данных, необходимые для построения аналитической теории рабочего процесса смесителя. В связи с вышесказанным, заключительный этап, выполняемого нами исследования, был посвящен исследованию процесса перемещения зерна внутри зерновой массы другого состава.

В частности, установлены зависимости усилия, необходимого для транспортировки зерен пшеницы внутри массы ячменя и зерен ячменя внутри массы пшеницы.

Установлены зависимости усилия перемещения по длине зерна  $F_d$ ,  $H$  и по толщине зерна  $F_T$ ,  $H$  при перемещении трех зерен пшеницы по ячменю от толщины слоя  $h$ , мм (результаты статистической обработки представлены в приложении А2, графические зависимости на рисунке 3.11):

$$F_d(h) = -0.936 + 1.914 \cdot \ln(h), \quad (3.14)$$

$$F_T(h) = -1.52 + 1.861 \cdot \ln(h), \quad (3.15)$$

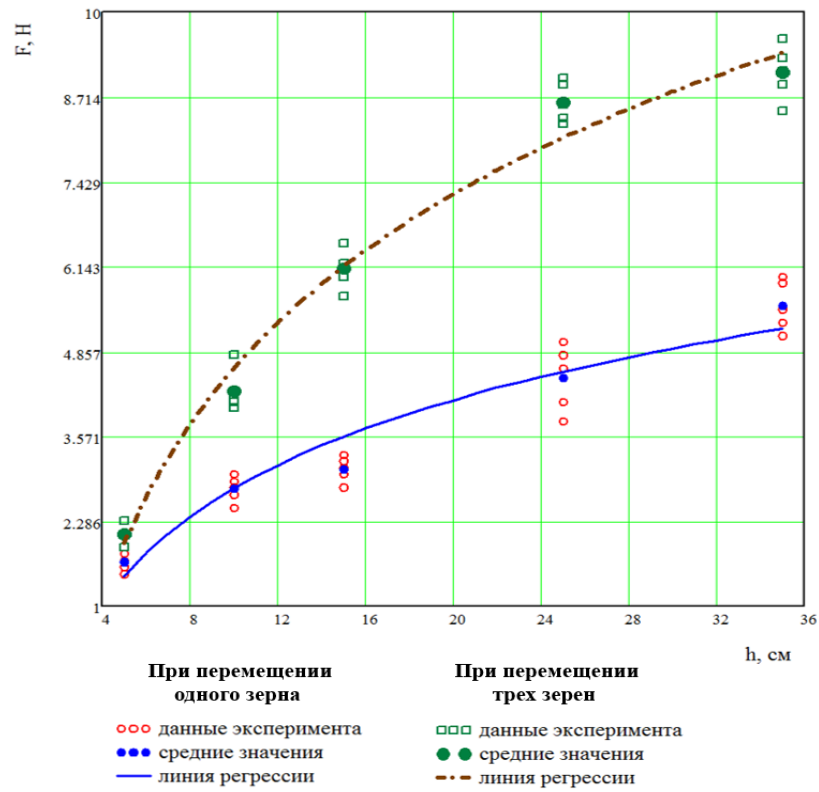


Рисунок 3.9 – Графическая зависимость усилия необходимого для перемещения одного зерна  $F_1$ , Н и трех зерен  $F_3$ , Н по длине зерна пшеница по пшенице от высоты слоя  $h$ , см

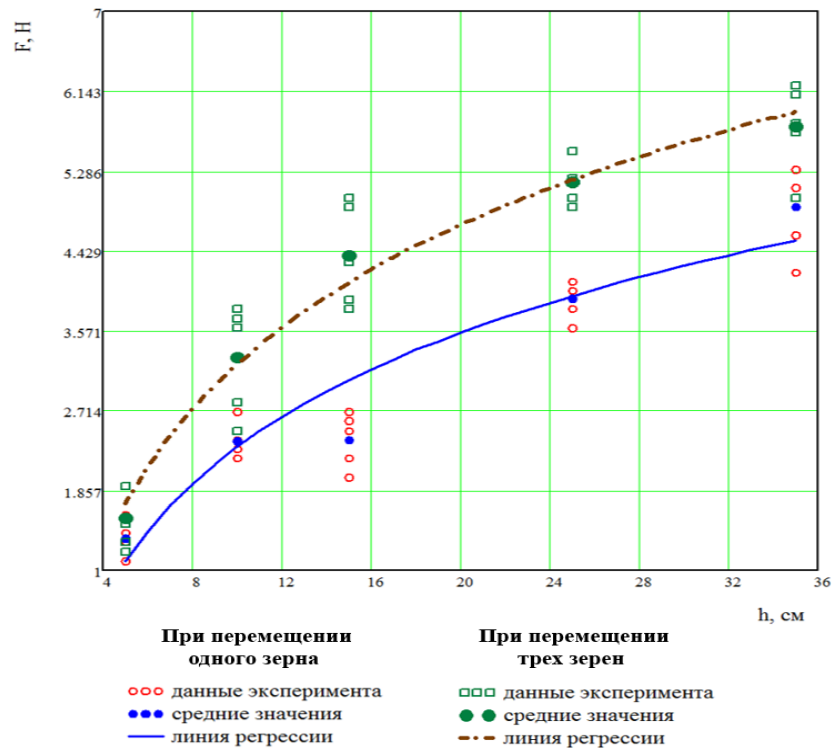


Рисунок 3.10 – Графическая зависимость усилия перемещения одного зерна  $F_1$ , Н и трех зерен  $F_3$ , Н в толщине зерна пшеница по пшенице от высоты слоя  $h$ , см



Коэффициент детерминации для уравнений 3.14, 3.15 соответственно равны  $R^2=0,936$ ;  $R^2=0,956$ .

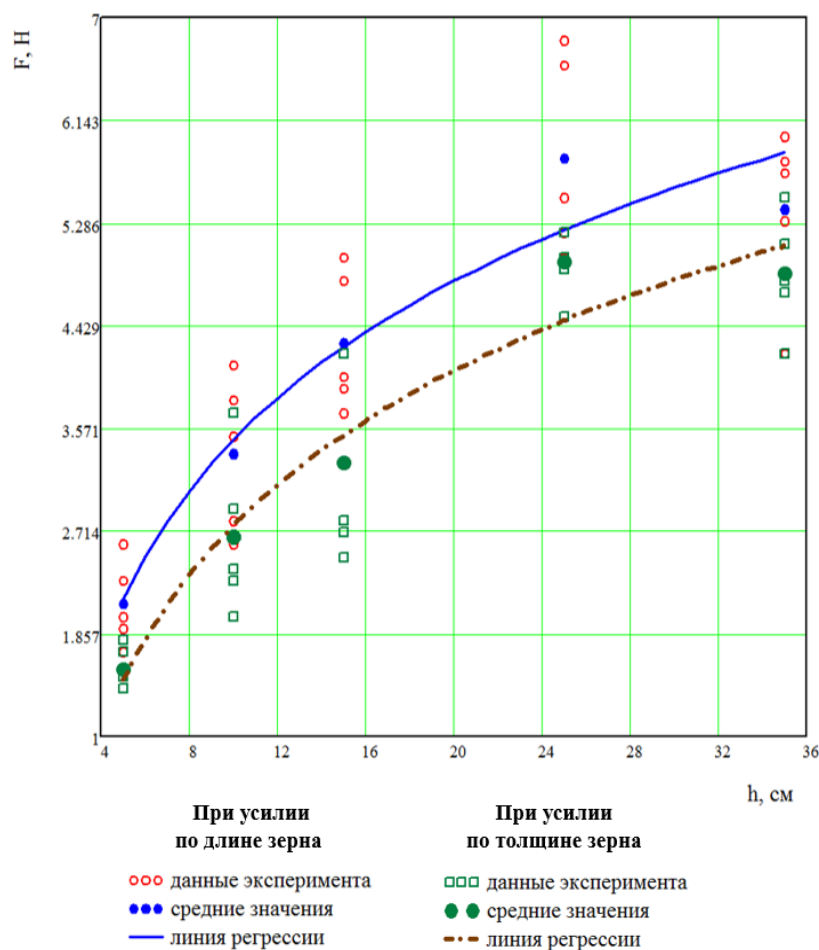


Рисунок 3.11 – Графические зависимости усилия перемещения  $F$ , (Н) трех зерен пшеница по ячменю от высоты слоя  $h$ , см

Также установлены зависимости перемещения по длине зерна  $F_d$ , Н и по толщине зерна  $F_T$ , Н, при перемещении трех зерен ячменя по пшенице от толщины слоя  $h$ , см (результат статистической обработки представлены в приложении А2, графические зависимости на рисунке 3.12):

$$F_d(h) = -5.143 + 4.513 \cdot \ln(h), \quad (3.16)$$

$$F_T(h) = -0.978 + 2.163 \cdot \ln(h), \quad (3.17)$$

Коэффициенты детерминации соответственно равны  $R^2=0,966$ ;  $R^2=0,88$ .

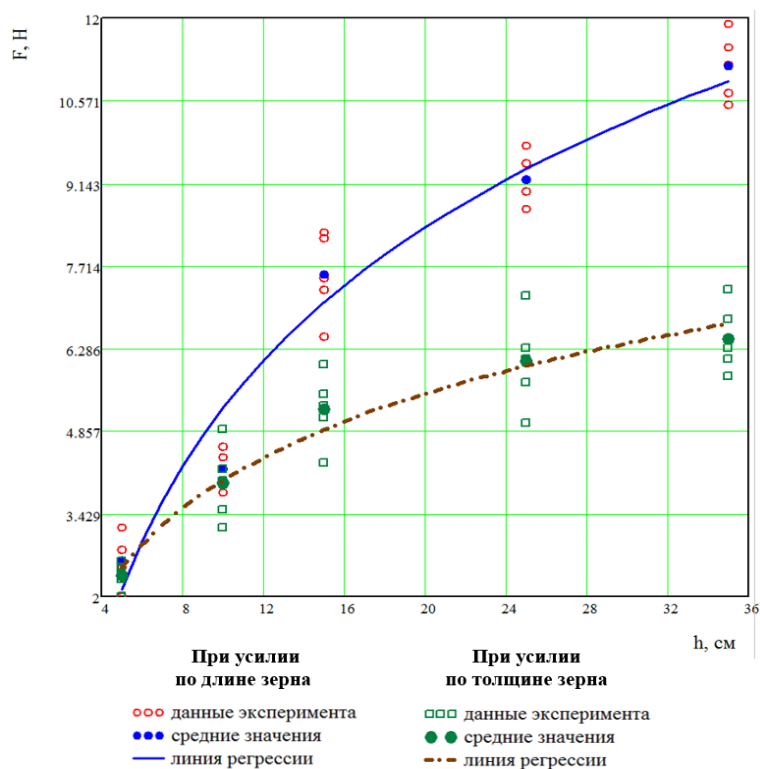


Рисунок 3.12 – Графическая зависимость усилия перемещения  $F$ , (Н) трех зерен ячмень по пшенице от высоты слоя  $h$ , см

### 3.4.2 Результаты исследования производительности лабораторной установки и энергоемкости смешивания при демонтированном активаторе на коэффициент вариации

Результаты проведенного исследования по определению влияния частоты вращения рабочего шнека ( $x_1$ ), угла его наклона относительно вертикали выгрузной горловины ( $x_2$ ) и степени раскрытия перепускного окна ( $x_3$ ), находящегося в середине кожуха шнека, на производительность  $Q$ , кг/с и энергоемкость  $E$ , кВт·ч процесса перемешивания при демонтированном активаторе представлены в приложении Б1. Полученные данные проходили проверку на величину коэффициента вариации дисперсий (воспроизводимости опытов) по критерию Кохрена на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . После получения удовлетворительного результата их использовали для проведения регрессионного анализа и построения математической модели вида 3.1, которые представлены в приложении Б2. Результат статистической обработки экспериментальных данных,

производимой с использованием математического пакета MathCAD 14.0, представлен в виде эмпирических выражений 3.18 и 3.19:

$$Q(x_1, x_2, x_3) = 0.131 - 0.00467 \cdot x_1 - 0.0094 \cdot x_2 + 0,00054 \cdot x_3 + \\ + 0,00056 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,000052 \cdot x_1^2 - 0,000007 \cdot x_3^2 \quad (3.18)$$

$$E(x_1, x_2, x_3) = 2,724 - 0,0412 \cdot x_1 - 0,3204 \cdot x_2 + 0,0026 \cdot x_3 + \\ + 0,0018 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,0004 \cdot x_2 \cdot x_3 + \\ + 0,0002 \cdot x_1^2 + 0,0153 \cdot x_2^2 \quad (3.19)$$

Обе модели прошли проверку на адекватность по критерию Фишера на уровне значимости  $\alpha = 0,01$ .

Анализ эмпирического уравнения 3.18 показывает, что все факторы значимо влияют на производительность шнека (уровень статистической значимости  $\alpha = 0,1$ ). Наиболее значимо влияет фактор  $x_2$  – величина угла наклона шнека, о чём можно судить по линейному коэффициенту данного фактора. Значимое влияние оказывает так же и частота вращения рабочего шнека ( $x_1$ ). В минимальной степени, но статистически значимо, на производительность так же оказывает фактор  $x_3$  – степень раскрытия перепускного окна.

Проведена оптимизация исследуемого факторного пространства с целью установления значений совокупности факторов, при которых величина критерия оптимизации (производительность) достигает максимума:

$$Q_{\max}(x_1, x_2, x_3) = Q(70, 9, 41) = 0,339.$$

Таким образом, установлено, что при  $x_1 = 70$  об/мин,  $x_2 = 9^\circ$ ,  $x_3 = 41^\circ$  производительность достигает максимума, равного 0,339 кг/сек. Критерий оптимизации достигает максимального значения на границах факторного пространства.

С целью наглядного представления полученной эмпирической зависимости 3.18 построены трехмерные поверхности (рисунки 3.13, 3.14, 3.15) путем фиксирования одного из трех факторов на оптимальном уровне.

Анализируя представленные графики можно утверждать, что фактор «угол наклона шнека от вертикального положения» в сочетании с фактором «угол раскрытия перепускного окна» влияют на процесс почти линейно.

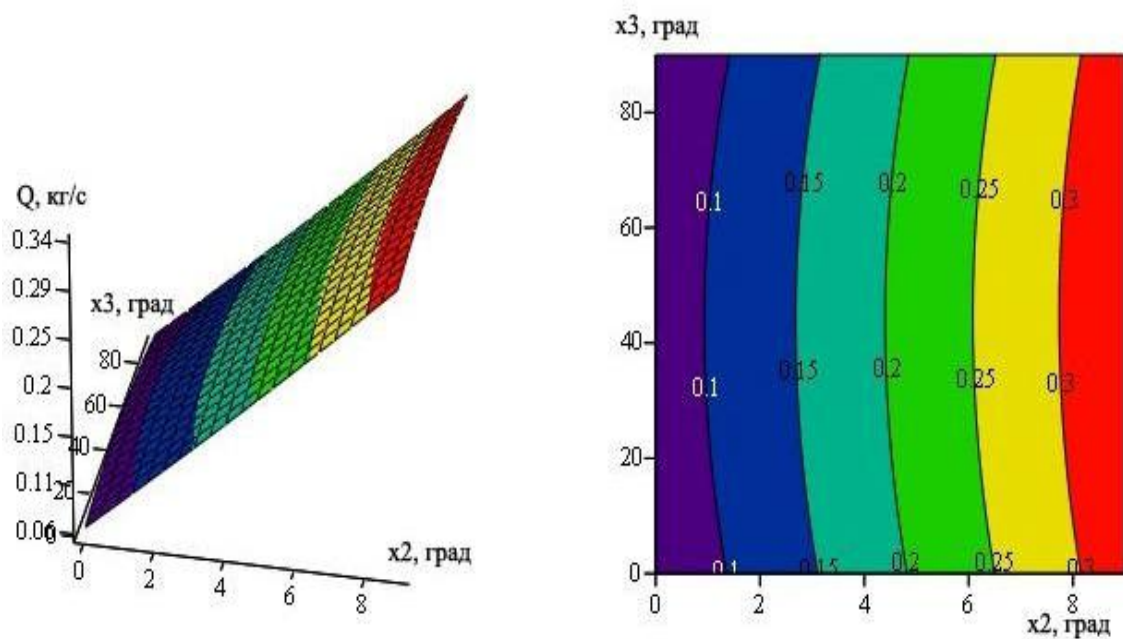


Рисунок 3.13– Зависимость производительности процесса  $Q$  (кг/с) от угла наклона шнека относительно вертикального положения  $x_2$  (град.) и угла раскрытия заслонки  $x_3$  (град.) при фиксированном значении частоты вращения шнека  $x_1$  (об/мин) на оптимальном уровне

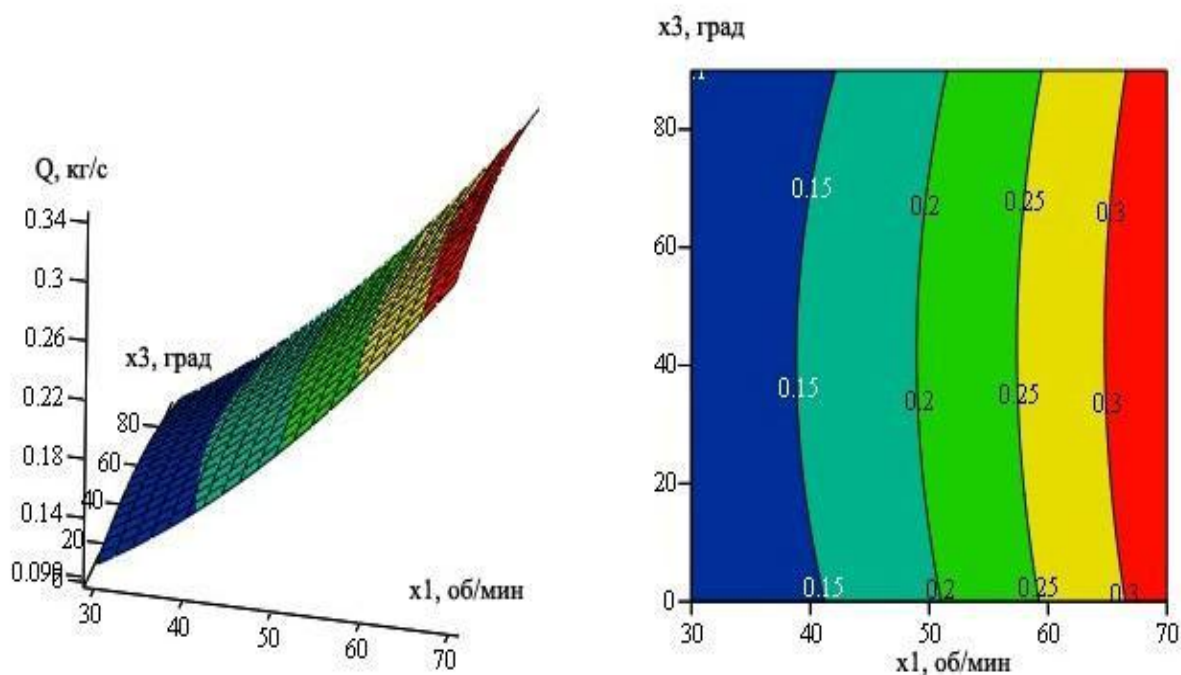


Рисунок 3.14 – Зависимость производительности процесса  $Q$  (кг/с) от частоты вращения шнека  $x_1$  (об/мин) и угла раскрытия заслонки  $x_3$  (град.) при фиксированном значении угла наклона шнека относительно вертикального положения  $x_2$  (град.) на оптимальном уровне

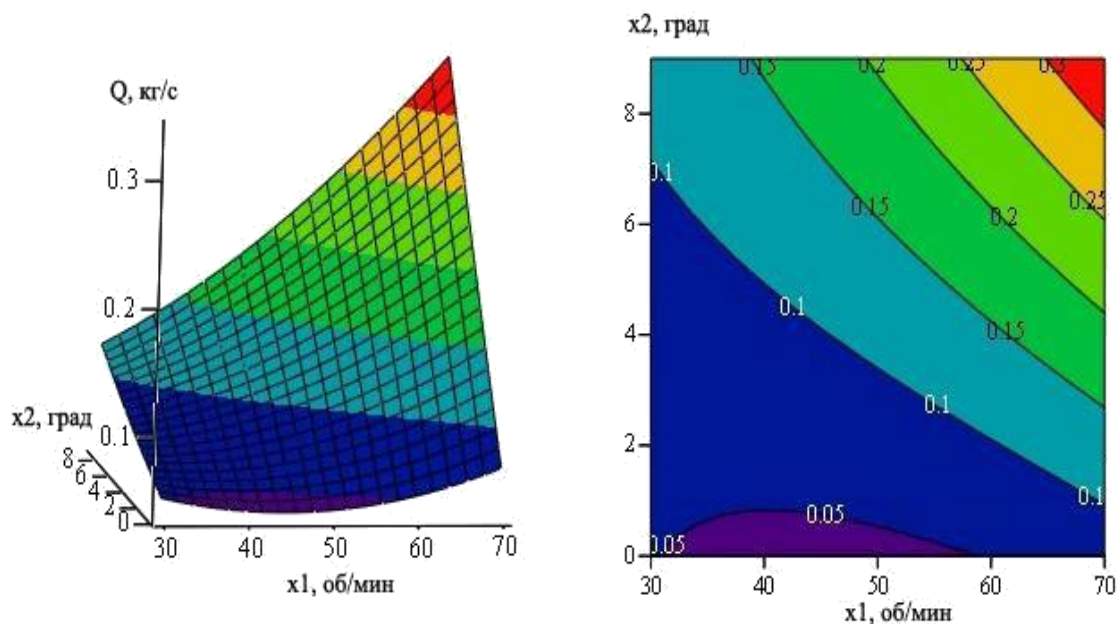


Рисунок 3.15 – Зависимость производительности процесса  $Q$  (кг/с) от частоты вращения шнека  $x_1$  (об/мин) и угла наклона шнека относительно вертикального положения  $x_2$  (град.) при фиксированном значении угла раскрытия заслонки  $x_3$  (град.) на оптимальном уровне

Некоторая степенная зависимость обнаруживается при совместном влиянии на производительность  $Q$ , кг/с частоты вращения шнека и угла раскрытия перепускного окна.

Проявление квадратичных эффектов обнаруживается при совместном влиянии частоты вращения шнека и угла его наклона.

При изучении влияния исследуемых факторов на энергоемкость  $E$ , кВт·ч/т перед проведением опытов проводились измерения потребляемой мощности установки на требуемых для эксперимента частотах вращения. Данные заносились в таблицу экспериментов, представленную в приложении Б1. Туда же заносились результаты опытов при работе установки с зерном.

Анализ эмпирического уравнения 3.19 показывает, что наиболее существенное влияние на энергоемкость  $E$ , кВт·ч/т рабочего процесса шнека оказывает угол отклонения его от вертикального положения. Все факторы

значимо влияют на критерий оптимизации, при этом сочетание  $x1 \cdot x3$  оказалось статистически не значимым и было исключено из модели (Приложение Б3).

Оптимизация модели 3.19 устанавливает значения факторов, при которых величина энергоемкости  $E$  достигает минимума (Приложение Б3):

$$E_{\min}(x1, x2, x3) = E(70, 7,54, 90) = 0,178.$$

Таким образом, минимальное значение  $E = 0,178$  кВт·ч/т достигается при значениях факторов  $x1 = 70$  об/мин,  $x2 = 7,54^\circ$ ,  $x3 = 90^\circ$ .

С целью наглядного представления полученной эмпирической зависимости (3.19) построены трехмерные поверхности (рисунки 3.16, 3.17, 3.18) путем фиксирования одного из трех факторов на оптимальном уровне.

Анализ и сравнение зависимостей, представленных на рисунках 3.13-3.15 и рисунках 3.16-3.18, и результатов их оптимизации показывает, что производительность  $Q$ , кг/с и энергоемкость  $E$ , кВт·ч/т достигают соответственно максимального и минимального значений при частоте рабочего шнека  $n$  равной 70 Об/мин.

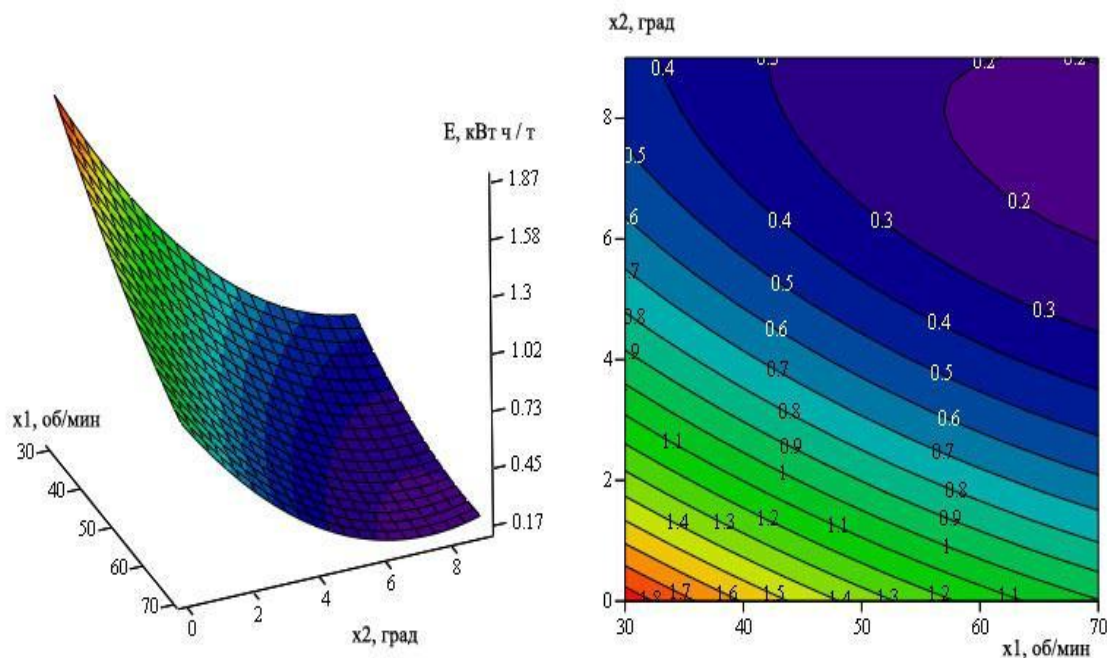


Рисунок 3.16 – Зависимость энергоемкости процесса  $E$  (кВт·ч/т) от частоты вращения шнека  $x1$  (об/мин) и угла наклона шнека относительно вертикального положения  $x2$  (град.) при фиксированном значении угла раскрытия заслонки  $x3$  (град.) на оптимальном уровне

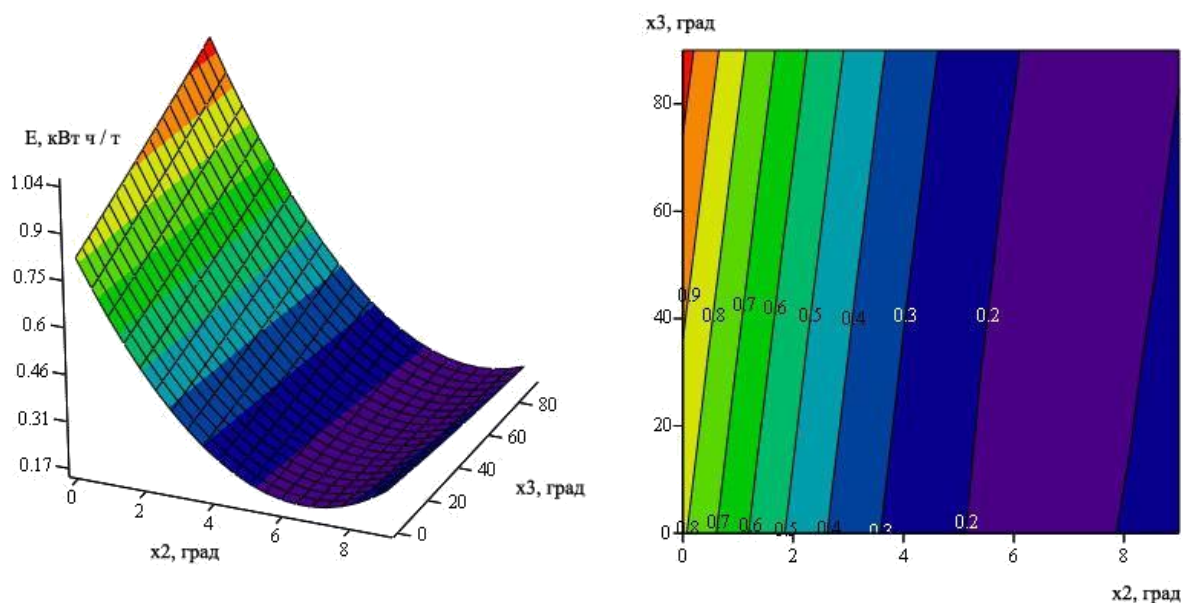


Рисунок 3.17– Зависимость энергоемкости процесса  $E$  (кВт·ч/т) от угла наклона шнека относительно вертикального положения  $x_2$  (град.) и угла раскрытия заслонки  $x_3$  (град.) при фиксированном значении частоты вращения шнека  $x_1$  (об/мин) на оптимальном уровне

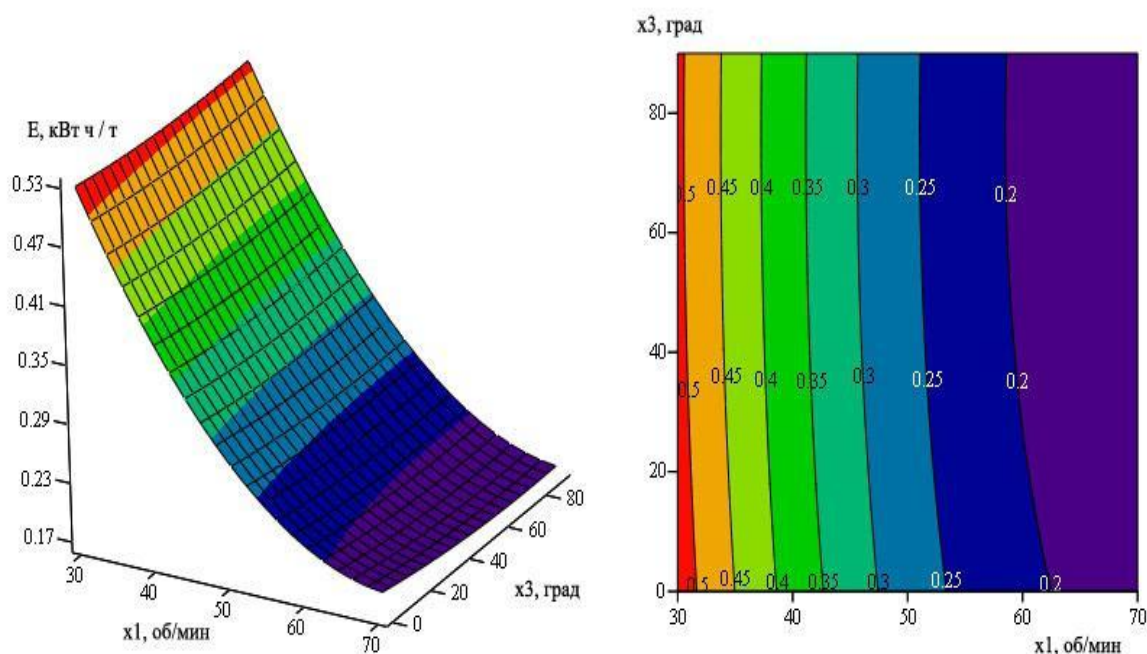


Рисунок 3.18 – Зависимость энергоемкости процесса  $E$  (кВт·ч/т) от частоты вращения шнека  $x_1$  (об/мин) и угла раскрытия заслонки  $x_3$  (град.) при фиксированном значении угла наклона шнека относительно вертикального положения  $x_2$  (град.) на оптимальном уровне

При этом величина угла отклонения шнека от вертикального положения для обеспечения минимума энергоемкости  $E$  меньше на  $1,5^\circ$ , чем для обеспечения максимума производительности  $Q$ , а угол раскрытия перепускного окна соответственно на  $49^\circ$  больше [126,130].

### **3.4.3 Результаты исследования влияния времени смешивания без использования активатора на коэффициент вариации**

Исследование влияния времени рабочего процесса на качество смешивания без использования активатора проводили при значениях частоты вращения шнека, угла его наклона относительно вертикали выгрузной горловины и степени раскрытия перепускного окна, соответствующих максимальной производительности  $Q = 0,339$  кг/сек (Приложение Б 4). Данное рациональное сочетание факторов установлено в п. 3.3.2. и соответствует значениям частоты вращения шнека 70 об/мин, угла его наклона относительно вертикали  $9^\circ$  и величины раскрытия перепускного окна  $41^\circ$  [127,161,162].

В данном режиме значение энергоемкости процесса  $E$ , кВт·ч/т, найденное по установленной эмпирической зависимости (3.19), будет отличным от минимального в сторону увеличения.

В результате статистической обработки данных эксперимента, представленных в приложении Б5, получена следующая регрессионная зависимость качества смешивания, выраженного показателем коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , %, от продолжительности процесса смешивания  $t$ , мин. при демонтированном активаторе:

$$\lambda(t) = 26,38 + 7,48 \cdot t - 0,23 \cdot t^2, \quad R^2 = 0,933. \quad (3.20)$$

Установленная регрессионная зависимость 3.20 представлена графически на рисунке 3.19. Из графика следует, что в установленном режиме работы смесителя, соответствующем оптимальным значениям частоты вращения шнека, угла его наклона относительно вертикали выгрузной горловины и степени раскрытия перепускного окна, при демонтированном активаторе смесь достигает



удовлетворительной степени коэффициента вариации (85%) по истечении 13 минут после включения установки. Далее процесс стабилизируется, и происходит незначительный рост критерия оптимизации в течение следующих 6 минут.

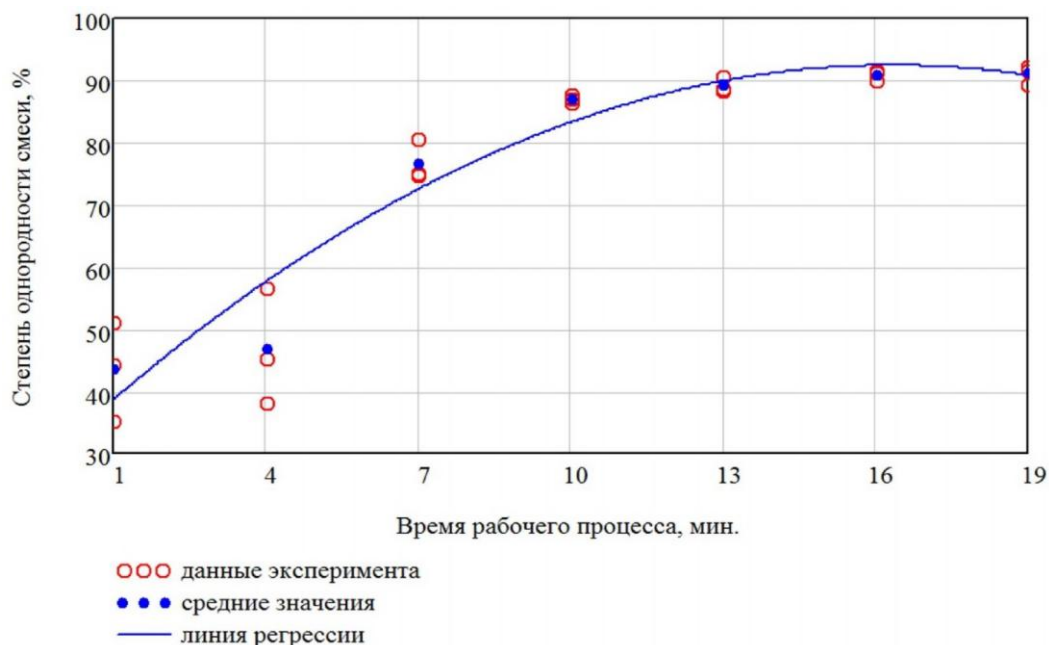


Рисунок 3.19 – Зависимость показателя коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , %, от продолжительности процесса смешивания  $t$ , мин. при сочетании факторов обеспечивающих максимальную производительность режиме рабочего шнека и демонтированном активаторе.

Можно заметить также, что в первые 4 минуты наблюдался более значительный разброс опытных данных, о чем свидетельствует большая величина дисперсий в первых двух экспериментальных точках. Флуктуация убывает по мере стабилизации критерия.

#### 3.4.4 Результаты исследования параметров механического активатора на коэффициент вариации

Экспериментальные данные по определению влияния параметров работы механического активатора на качество смеси и их дисперсионный анализ представлены в приложении Б6. Подтвержден коэффициент вариации дисперсий

по критерию Кохрена на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . Регрессионный анализ с оценкой адекватности по критерию Фишера на уровне  $\alpha = 0,01$  проводился в математическом пакете MathCAD 14.0 (Приложение Б7). Результаты представлены в виде эмпирического уравнения, выражающего зависимость критерия оптимизации (степень коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , %) от угла раскрытия лопастей механического активатора  $x_1$ , град., угла поворота механического активатора относительно оси рабочего вала  $x_2$ , град. и частоты колебаний механического активатора  $x_3$ , мин<sup>-1</sup>:

$$\begin{aligned} \lambda(x_1, x_2, x_3) = & 38,18 + 0,1 \cdot x_1 + 0,43 \cdot x_2 + 0,633 \cdot x_3 + \\ & + 0,001222 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,004667 \cdot x_2 \cdot x_3 - \\ & - 0,001 \cdot x_2^2 - 0,003846 \cdot x_3^2 \end{aligned} \quad (3.21)$$

Фактором, минимально влияющим на исследуемый процесс, что видно из величины линейного коэффициента, равного 0,142, является угол раскрытия лопастей механического активатора. Существенно большее влияние оказывает угол поворота механического активатора (линейный коэффициент при факторе  $x_2$  равен 0,45).

Максимальное влияние на исследуемый процесс оказывает частота колебаний механического активатора, так как линейный коэффициент при  $x_3$  составляет 0,636.

Оптимизация модели 3.21 проведена в среде MathCAD 14.0 и позволила получить следующие результаты:

$$\lambda_{\max}(x_1, x_2, x_3) = \lambda(130, 20, 90) = 91,1.$$

Таким образом, максимальное значение показателя коэффициента вариации смеси  $\lambda = 91,1$  % достигается при значениях факторов  $x_1 = 130^\circ$ ,  $x_2 = 20^\circ$ ,  $x_3 = 90$  мин<sup>-1</sup>.

Для наглядного представления физической сущности процесса представлены зависимости (рисунок 3.20, 3.21, 3.22).

Зависимости критерия оптимизации от двух исследуемых факторов при оптимальной величине третьего.

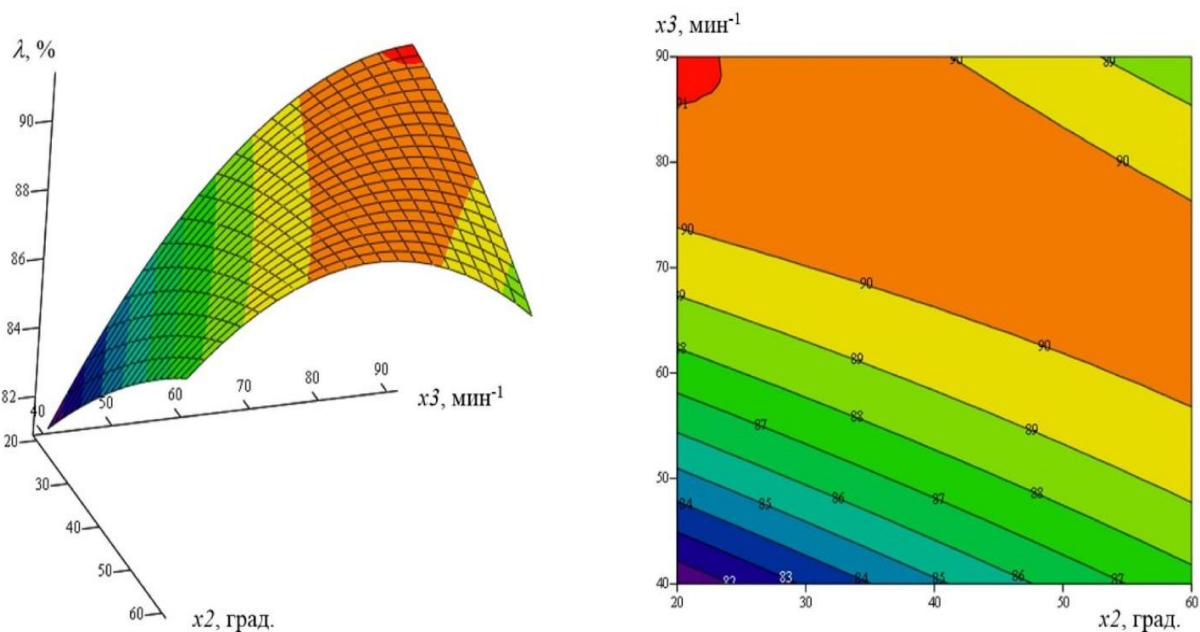


Рисунок 3.20 – Зависимость показателя коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , % от факторов  $x_2$ , град. и  $x_3$ ,  $\text{мин}^{-1}$  при фиксированном на рациональном уровне значении фактора  $x_1$ , град.

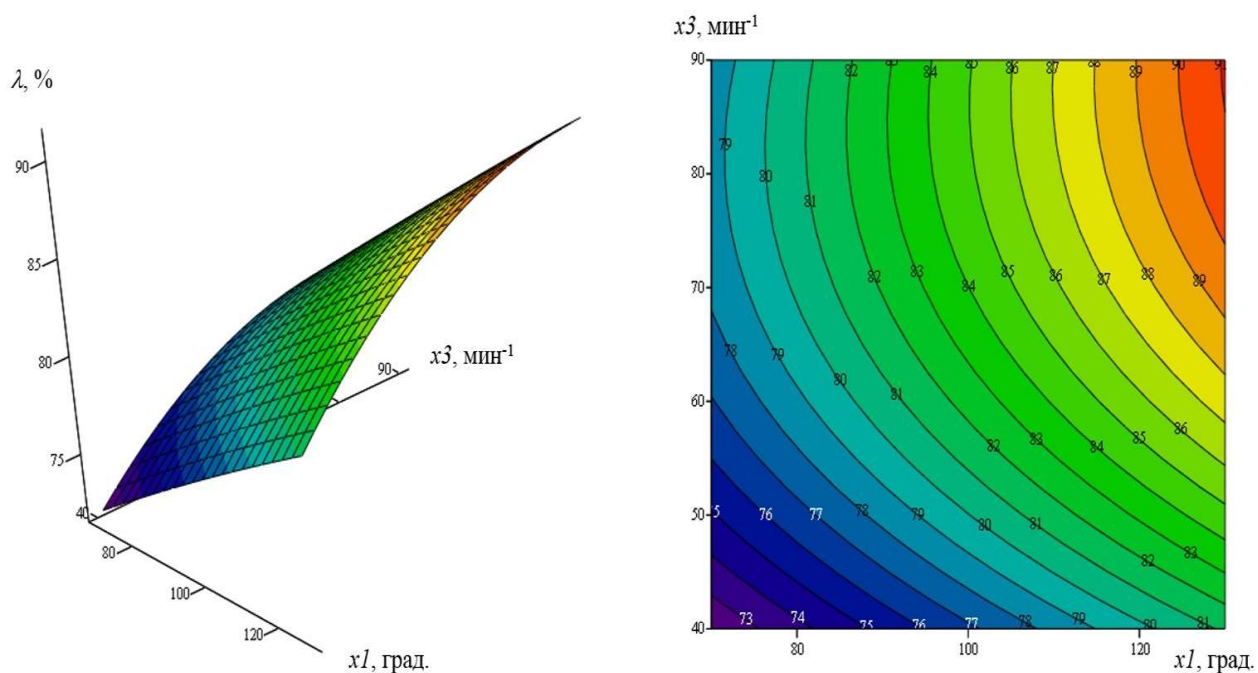


Рисунок 3.21 – Зависимость показателя коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , % от факторов  $x_1$ , град. и  $x_3$ ,  $\text{мин}^{-1}$  при фиксированном на рациональном уровне значении фактора  $x_2$ , град.

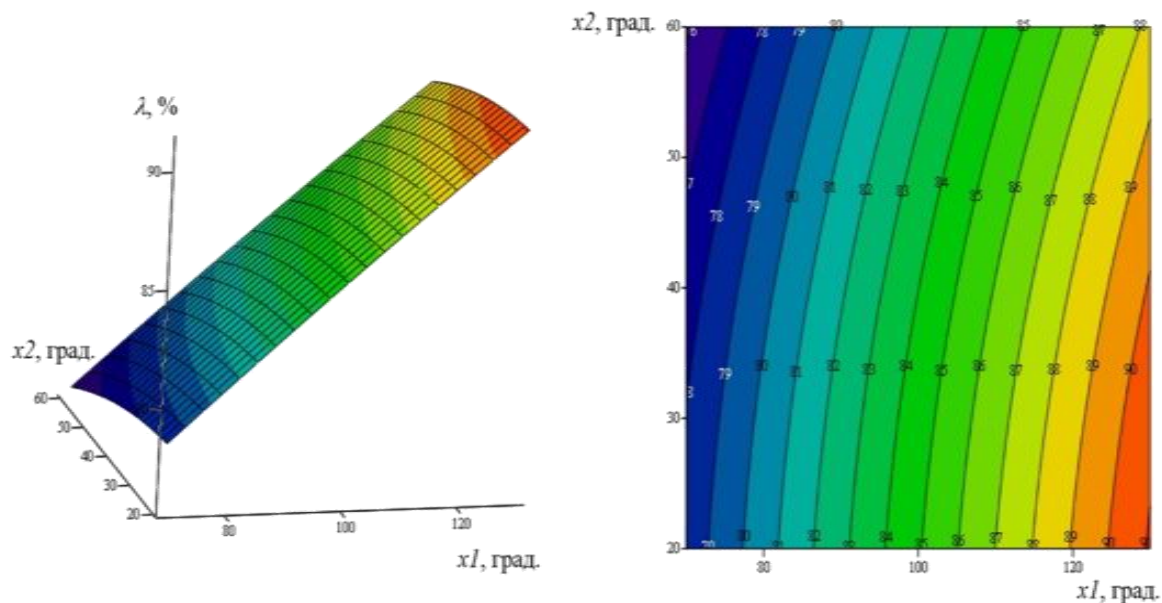


Рисунок 3.22 – Зависимость показателя коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , % от факторов  $x1$ , град. и  $x2$ , град. при фиксированном на рациональном уровне значении фактора  $x3$ , мин<sup>-1</sup>

Анализируя установленные зависимости можно сделать вывод, что рациональное сочетание факторов находится на краях факторного пространства, в зоне интерполяции.

### 3.4.5 Результаты исследования влияния продолжительности смешивания при использовании активатора на коэффициент вариации

Исследование влияния времени рабочего процесса на качество смешивания с установленным активатором проводили при оптимальных значениях угла раскрытия лопастей активатора, угла его поворота относительно оси рабочего вала и частоты колебаний активатора, определенных в пункте 3.4.4.

В результате статистической обработки данных эксперимента, представленных в приложении Б8, получена регрессионная зависимость качества смешивания, выраженного показателем коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , %, от продолжительности процесса смешивания при установленном активаторе:

$$\lambda(t) = 40,99 + 17,06 \cdot t - 1,36 \cdot t^2, \quad R^2 = 0,96. \quad (3.22)$$

Данная регрессионная зависимость представлена графически на рисунке 3.23 (кривая 1) в сравнении с результатом аналогичного исследования при демонтированном активаторе (кривая 2), выраженного зависимостью 3.20.

Из графика следует, что при установленном активаторе, в режиме работы смесителя, соответствующем оптимальным значениям угла раскрытия лопастей активатора, угла его поворота относительно оси рабочего вала и частоты колебаний активатора, смесь достигает удовлетворительной степени коэффициента вариации (85%) по истечении 4 минут после включения установки. Далее процесс стабилизируется, и происходит незначительный рост критерия оптимизации в течение следующих 3 минут. Можно также заметить, что при установленном активаторе, по сравнению с режимом работы без активатора, результат увеличивается в 1,5 раза уже на 1-й минуте рабочего процесса.

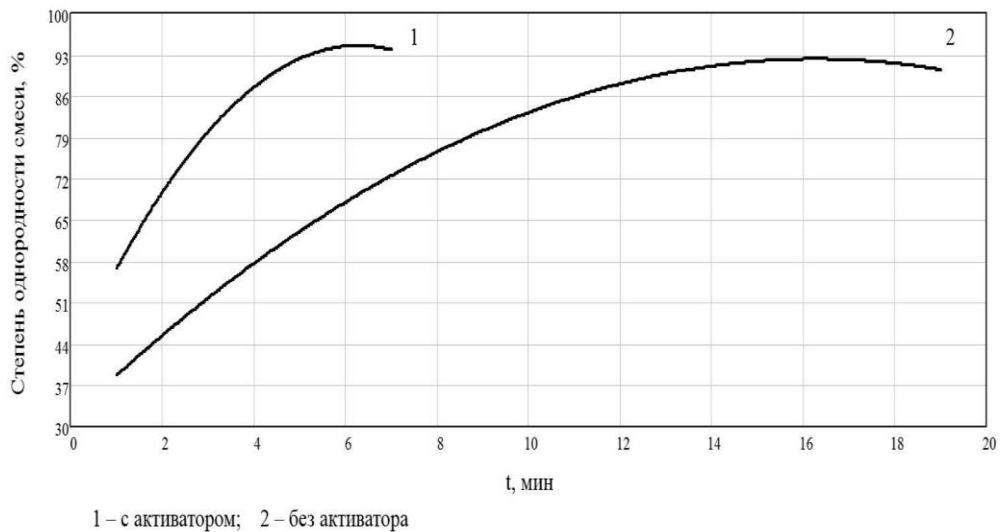


Рисунок 3.23 – Зависимости показателя коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , % от продолжительности процесса смешивания  $t$ , мин. при установленном активаторе и без активатора

## Выводы

В результате проведенных лабораторных исследований смесителя концентрированных кормов можно сделать следующие выводы:

1. Определено, что при изменении толщины слоя зерновой массы ячменя от 50 до 350 мм усилие, необходимое для транспортирования зерен ячменя по длине при трех зернах, расположенных в ряд на расстоянии 50 мм друг от друга, изменяется от 1,8 до 5,9 Н, а при одном зерне – от 0,9 до 4 Н. При транспортировании трех зерен по толщине усилие изменяется от 0,6 до 5,5 Н, а одного зерна – от 0,6 до 4,2 Н.

2. Установлено, что при увеличении слоя пшеницы от 50 до 350 мм усилие, необходимое для транспортировки внутри зерновой массы трех зерен пшеницы по толщине варьирует от 1,9 Н до 9,3 Н, а при транспортировании одного зерна пшеницы – от 1,7 до 5,15 Н. В аналогичных условиях при транспортировке зерен по толщине усилие изменяется от 1,7 до 5,9 Н и от 1,2 до 4,5 Н соответственно.

3. При изменении слоя ячменя от 50 до 350 мм и транспортировании внутри него трех зерен пшеницы по ширине усилие изменяется от 1,2 до 5,8 Н, а одного зерна – от 1,4 до 5,1 Н. При прочих равных условиях по транспортировке зерен ячменя внутри зерен пшеницы усилие варьируется от 2,1 до 11,9 Н, а при одном зерне – от 2,6 до 6,8 Н.

4. Получены эмпирические модели, устанавливающие влияние частоты вращения рабочего шнека ( $x_1$ ), угла его наклона относительно вертикали выгрузной горловины ( $x_2$ ) и степени раскрытия перепускного окна ( $x_3$ ), находящегося в середине кожуха шнека, на производительность  $Q$ , кг/с и энергоемкость  $E$ , кВт·ч/т. Установлено, что при  $x_1 = 70$  Об/мин,  $x_2 = 9^\circ$ ,  $x_3 = 41^\circ$  производительность достигает максимума, равного 0,339 кг/сек, а минимальное значение энергоемкости  $E = 0,178$  кВт·ч/т достигается при значениях факторов  $x_1 = 70$  Об/мин,  $x_2 = 7,54^\circ$ ,  $x_3 = 90^\circ$ .

5. При определенных параметрах шнека, обеспечивающих максимальную его производительность, получена регрессионная модель, выражающая зависимость показателя коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , % в рабочей камере смесителя при демонтированном механическом активаторе от продолжительности рабочего процесса  $t$ , мин. Смесь достигает удовлетворительной степени коэффициента

вариации (85%) по истечении 13 минут с момента начала рабочего процесса в установленном режиме.

6. Исследовано влияние параметров механического активатора на показатель коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , % при рекомендуемых параметрах работы шнека, с учетом установленного значения продолжительности рабочего процесса. Получена регрессионная модель, выражающая зависимость степени коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , % от угла раскрытия лопастей механического активатора  $x_1$  (град.), угла поворота механического активатора относительно оси рабочего вала  $x_2$  (град.) и частоты колебаний механического активатора  $x_3$ , мин<sup>-1</sup>. Установлено, что максимальное значение показателя коэффициента вариации смеси  $\lambda = 91,1$  % достигается при значениях факторов  $x_1 = 130^\circ$ ,  $x_2 = 20^\circ$ ,  $x_3 = 90$  мин<sup>-1</sup>.

7. При установленных параметрах шнека, обеспечивающих максимальную его производительность, и параметрах механического активатора установлена эмпирическая зависимость показателя коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , % от продолжительности рабочего процесса  $t$ , мин. Смесь достигает удовлетворительной степени коэффициента вариации (85%) по истечении 4 минут с момента начала рабочего процесса в установленном режиме.

## ГЛАВА 4. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СМЕСИТЕЛЯ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ КОРМОВ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ЕГО ВНЕДРЕНИЯ

### 4.1 Программа и методика производственных испытаний

Полученные в главе 2 и 3 результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили уточнить ряд показателей смесителя концентрированных кормов.

Поэтому основные параметры изготовленного производственного образца смесителя имеют характеристики.

Как отмечалось в главе 1, к современному кормоприготовительному оборудованию предъявляется ряд требований, относящихся как к качеству приготавливаемых кормов, так и к эффективности их использования в условиях производства

В связи с этим цель производственных испытаний заключалась в определении работоспособности опытного образца смесителя в реальных условиях производства, а так же оценке экономической эффективности его внедрения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- оценить качество сухих кормовых смесей, приготавливаемых в соответствии с различными рецептурами;
- определить производительность и энергоемкость процесса приготовления кормовой смеси;
- определить целевые показатели экономического эффекта внедрения в производство предлагаемого смесителя в сравнении с существующим аналогом: годовой экономический эффект и срок окупаемости капитальных вложений.

При проведении производственных испытаний наиболее целесообразным представляется оценка показателя коэффициента вариации, определяемая отношением массовых долей контрольного компонента в анализируемой пробе и



в идеальной (рецептурной) смеси, выраженное в процентах или долях единицы [103, 105, 106, 117, 138].

Ранее отмечалось (п. 3.3.5), что по требованиям стандарта смесь считается хорошей при  $\lambda > 92\%$ , удовлетворительной при  $\lambda = 85...92\%$ , плохой при  $\lambda < 85\%$  [132, 163, 164, 165, 166].

В производственных условиях степень коэффициента вариации кормовой смеси  $\lambda$ , % целесообразно оценивать по коэффициенту вариации [50]. Коэффициент вариации смеси выражается формулой:

$$\lambda = 100 - \nu \quad (4.1)$$

где  $\nu$  – коэффициент вариации, %.

Коэффициент вариации  $\nu$ , % определяется следующим выражением [7]:

$$\nu = \frac{100 \cdot \sigma}{B_{\text{cp}}} \quad (4.2)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение содержания контрольного компонента в смеси.

$B_{\text{cp}}$  – среднее арифметическое содержание контрольного компонента, найденное экспериментально, %.

Значение среднее квадратическое отклонения находится из выражения [56]:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(B_i - \bar{B})^2}{n-1}}, \quad (4.3)$$

где  $B_i$  – содержание контрольного компонента в  $i$ -й пробе, %.

В качестве контрольного компонента обычно выбирается компонент с меньшей массовой долей в смеси.

Поскольку применяемый в промышленности смеситель концентрированных кормов должен обладать универсальностью и обеспечивать приготовление кормов по разным рецептурам из составляющих, отличающихся по плотности, адгезии и гранулометрическому составу и т.д., производственный эксперимент был направлен на исследование трех рецептов кормов, используемых

соответственно для кормления КРС, свиней и птицы [48, 76, 79, 80, 81, 82, 100, 101, 102].

Состав рациона для КРС (смесь №1) включает дробленную зерновую смесь, приготовленную из овса (92%) и ячменя (7%), с добавлением поваренной соли, жмыха подсолнечника, трикальция и премикса. Зерновые компоненты, заранее подготовленные путем измельчения на молотковой дробилке целого зерна до гранулометрического состава с размером частиц от 15 до 3,5 мм, дозировали в заданном соотношении на электронных весах марки МП-200 с точностью  $\pm 0,1$  кг, при этом компонент с меньшей массовой долей (ячмень) маркировали путем окрашивания.

Кормовая смесь №2 предназначена для свиней на откорме и состоит из дробленых зерновых компонентов и добавок: пшеница (23%); овес (10%); жмых подсолнечника (4%); отруби (60%); мел молотый (1,4%); соль (0,4%); премикс откормочный (1,2%). Маркированный контрольный компонент – овес.

Кормовая смесь №3 предназначена для кур-несушек и состоит из недробленых зерновых компонентов и добавок: пшеница (25%); овес (15%); просо (10%); жмых подсолнечника (16%); отруби пшеничные (32%); мел молотый (1,6%); костная мука (0,4%). Контрольный компонент – просо.

Производственные испытания проводили в помещении цеха ООО "Ока-Молоко" ОП-4. Находящийся в цеху смеситель концентрированных кормов подключали к счетчику электрической энергии марки СО-505 (ГОСТ 6570-96), после чего в соответствии с приведенными выше рецептами в бункер смесителя поочередно загружали смешиваемые компоненты.

Перед засыпанием в смеситель, зерно взвешивали на весах МП-200, с точностью до  $\pm 0,1$  кг. Общий вес загруженного корма составлял 50 кг.

После загрузки смеситель приводили в действие, предварительно зафиксировав показания счетчика электрической энергии.

Время перемешивания составляло 3 минуты, в течение которых проводили измерение потребляемой установкой электроэнергии (рисунок 4.1).

По окончании процесса перемешивания установку отключали

и производили выгрузку кормовой смеси в 3 этапа: сначала выгружали нижнюю часть объема смеси, из которой отбирали 5 проб массой по  $10 \pm 0,01$  гр.



Рисунок 4.1 – Промышленный образец смесителя концентрированных кормов во время производственных испытаний

Точно также отбирали по 5 проб из средней и верхней части объема смеси. Процессом выгрузки управляли при помощи шиберной заслонки. Таким образом, во время каждого опыта формировали 15 экспериментальных проб с 3-х участков рабочего объема. Каждую пробу взвешивали на весах марки ВЛКТ-500М, затем ручным способом отделяли маркированный контрольный компонент (ячмень), который также взвешивали и определяли его массовую долю в пробе.

По всем пробам находили среднеквадратическое отклонение по формуле 4.3, определяли коэффициент вариации по формуле 4.2 и степень коэффициента вариации всей приготовленной смеси по формуле 4.1.

Одновременно производили хронометраж времени процесса: времени рабочего цикла смесителя и времени выгрузки кормовой смеси.

Результаты эксперимента и расчет коэффициента вариации смеси представлены в приложении В1.

#### **4.2. Результаты производственных испытаний смесителя концентрированных кормов.**

На основе результатов испытаний смесителя при приготовлении различных видов кормовых смесей, приведенных в приложении В1, построена сравнительная диаграмма (рисунок 4.2).

Из приведенной диаграммы следует, что результат при приготовлении смеси по рецепту №2 (для свиней на откорме) превосходит результат по рецепту №1 (для КРС), содержащему премикса на 0,6% меньше. Наименьший результат  $\lambda = 85,9\%$  был достигнут при приготовлении смеси для кур-несушек, в рецептуре которой не содержатся премиксы [72, 73, 74, 83].

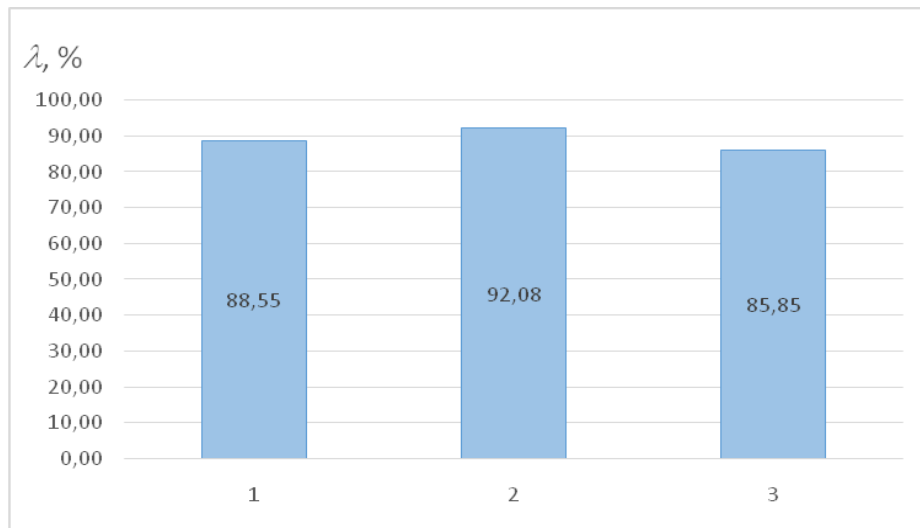
Анализ полученных результатов показывает, что кормовая смесь, приготовленная по любому из трех рецептов, соответствует требованиям ГОСТ 32855-2014 и может быть использована для кормления сельскохозяйственных животных [11].

При этом качество смешивания компонентов, приготавливаемых из целого зерна, несколько хуже смеси, получаемой из измельченных компонентов. Данный факт можно объяснить изменением текучести зерновой массы при добавлении премиксов.

В целом по всем трем рецептам кормовых смесей был достигнут удовлетворительный результат ( $\lambda > 85\%$ ).

Испытания проводили в производственном цехе зернохранилища на базе ООО "Ока-Молоко" ОП-4 Шацкого района Рязанской области.

В соответствии с операциями описанного выше технологического процесса приготовления сухой кормовой смеси было переработано зернового сырья и, соответственно, получено 9850 кг комбикорма. Потери сырья не превышали 0,1%.



1 – комбикормовая смесь для КРС (рецепт №1); 2 – комбикормовая смесь для свиней на откорме (рецепт №2); 3 – недробленая зерновая смесь для кур-несушек (рецепт №3)

Рисунок 4.2 – Сравнение результатов испытаний смесителя концентрированных кормов по показателю коэффициента вариации смеси на приготовлении различных кормовых смесей

Для наглядного анализа эффективности производственного применения смесителя концентрированных кормов основные результаты испытания сведены в таблицу 4.1. В таблице представлены результаты производственных испытаний предлагаемого смесителя в сравнении с эксплуатационно-технологическими параметрами смесителя СВ-1,1, серийно выпускаемого компанией ООО "Аграрные Технологии и Машины".

Все показатели качества выполнения технологического процесса соответствуют нормативным требованиям. Нарушений технологического процесса в период испытаний не выявлено.

Анализ параметров, приведенных в таблице 4.1, показывает, что предложенная конструкция смесителя имеет свои явные преимущества перед аналогом. В частности, снижена продолжительность цикла смешивания, что позволяет уменьшить затраты рабочего времени у обслуживающего персонала, а так же уменьшена энергоёмкость технологического процесса, что увеличивает

рентабельность производства при приготовлении больших объемов кормовых смесей.

Таблица 4.1 – Результаты сравнительных испытаний

Показатели	Предлагаемый смеситель концентрированных кормов	Сравниваемый смеситель СВ-1,1*
Средняя продолжительность технологического цикла, мин.	3	10-15
Средняя продолжительность выгрузки готового продукта, мин.	1,5	10
Установленная мощность эл. двигателя привода шнека, кВт	0,3	1,5
Установленная мощность эл. двигателя привода активатора, кВт	0,05	-
Часовая производительность, т/ч	0,6	0,28-0,5
Удельный расход энергии, кВт·ч/т	0,5	3-5
Качество смешивания (степень коэффициента вариации), %	88,6	н/д
Потери корма, %	< 0,1	н/д

\* Данные взяты с <https://agrotm.tiu.ru/p257882125-smesitel-dlya-kormov.html>

### 4.3. Определение стоимости предлагаемого оборудования

Для оценки рыночной стоимости предлагаемого смесителя концентрированных кормов использовали затратный и сравнительный подход к оценке стоимости оборудования.

В рамках затратного подхода использован метод поэлементного расчета, который заключается в составлении перечня комплектующих узлов, агрегатов, а также материалов, стандартных и заказных изделий, определении удельных затрат на оплату труда рабочим и стоимости электроэнергии, израсходованной при изготовлении установки.

На основе полученных данных определяется полная себестоимость

изготовления единицы оборудования, которая складывается из следующих элементов:

$$S = S_M + S_{СИ} + S_{ЗИ} + S_{ОТ} + S_{Э} \quad (4.4)$$

где:  $S_M$  – стоимость материалов, руб.

$S_{СИ}$  – стоимость стандартных изделий, руб.

$S_{ЗИ}$  – стоимость заказных изделий, руб.

$S_{ОТ}$  – расходы на оплату труда, руб.

$S_{Э}$  – стоимость израсходованной электроэнергии, руб.

Для того, чтобы определить рыночную стоимость установки, нужно найденное значение себестоимости единицы оборудования умножить на норму доходности, за которую принимается банковская кредитная ставка (15%):

$$S_y = S \cdot (1 + 0,15) \quad (4.5)$$

Оценка стоимости по затратному подходу составила округленно 27 000 руб.

В рамках сравнительного подхода применили метод сравнения с рыночными ценами на существующие аналоги с учетом поправочных коэффициентов. В качестве аналогов были выбраны три шнековых смесителя вертикального типа от разных производителей: смеситель КУ-100, применяемый в комбикормовой установке КУ-2-2 производства ОАО «Слободской машиностроительный завод»; смеситель СВ-1,1 производства ООО «Аграрные Технологии и Машины»; смеситель СКВ-2,0, используемый в линиях по приготовлению комбикормов совместно с молотковыми пневмодробилками, производство Беларусь.

Цены на указанные аналоги корректируются с учетом поправочных коэффициентов, в качестве которых приняты:

1)  $k_1 = Q/Q_i$  – соотношение часовой производительности предлагаемого смесителя и смесителя-аналога;

2)  $k_2 = 0,75$  – наличие у аналога дополнительного шнека принудительной подачи добавок;

3)  $k_3 = 0,65$  – наличие у аналога прочих дополнительных приспособлений

(электронные весы, смотровое окно и т.п.)

4)  $k_4 = 1,1$  – наличие активатора с автономным электроприводом у предлагаемого смесителя концентрированных кормов.

Характеристики аналогов и расчет стоимости предлагаемой установки в соответствии со сравнительным подходом на основе скорректированных цен на смесители-аналоги представлен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Оценка стоимости установки по сравнительному подходу

Характеристики и цены		Аналоги		
		КУ-100	СКВ-2,0	СВ-1,1
Установленная мощность $N$ , кВт		3.55	3	1.5
Часовая производительность $Q$ , т/ч		1.7	3	0.5
Цена, руб.		196 000	253 000	79 000
Поправочные коэффициенты	$k_1$	0.41	0.23	1.40
	$k_2$	-	0.75	-
	$k_3$	0.85	0.85	-
	$k_4$	1.1	1.1	1.1
Оценка с учетом поправочных коэффициентов, руб.		75 460	41 397	121 660
Средняя цена (оценка), руб.		79 506		

Наиболее близкой к рыночным ценам оказалась оценка по сравнительному подходу, поэтому эта оценка является приоритетной: распределение весов по сравнительному и затратному подходам составляет 80% и 20% соответственно:

$$S_y = 27000 \cdot 0,2 + 80000 \cdot 0,8 = 69400 \text{ руб.}$$

Далее определяется балансовая стоимость оборудования:

$$S_B = S_y \cdot K, \quad (4.6)$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий расходы на транспортировку, монтаж, наладку оборудования (принимается равным 1,2).

Таким образом, балансовая стоимость предлагаемого смесителя составит:

$$S_B = 69400 \cdot 1,2 = 83300 \text{ руб.}$$



#### 4.4 Расчет показателей экономического эффекта

Для определения экономической эффективности от внедрения в производство предлагаемого смесителя концентрированных кормов необходимо определить целевые экономические показатели, к которым относится годовой экономический эффект (годовая экономия) в абсолютном и относительном выражении и срок окупаемости капитальных вложений. Методикой расчета является сравнительный анализ существующего (сравниваемого) и предлагаемого оборудования [60, 77, 78, 98, 99, 134]. Для сравнения был выбран смеситель СВ-1,1 производства ООО "Аграрные Технологии и Машины" (таблица 4.1).

Для расчета обозначенных выше целевых экономических показателей определяются следующие величины.

Годовой объем перерабатываемого продукта для животноводческого предприятия рассчитывается на основе суточной потребности в корме и поголовья стада. В среднем одно животное потребляет в день 6 кг зерновой смеси. Тогда годовой объем производства  $V$ , т составит:

$$V = n \cdot 0,006 \cdot 365, \quad (4.7)$$

где  $n$  – поголовье стада, шт.

Годовая нормативная нагрузка  $T$ , ч:

$$T = V/Q \quad (4.8)$$

где  $V$  – годовой объем перерабатываемого воскового сырья, т.

$Q$  – часовая производительность установки, т/ч.

Энергоемкость процесса смешивания концентрированного корма  $E$ , кВт·ч/т составит:

$$E = \frac{N}{Q}, \quad (4.9)$$

где  $N$  – установленная мощность оборудования, кВт.

Затраты труда на годовой объем работы  $t$ , чел·ч определяются по выражению:

$$t = T \cdot z, \quad (4.10)$$

где  $z$  – численность обслуживающего персонала, чел.

Расходы на оплату труда определяются как сумма основной и дополнительной заработной платы плюс социальные отчисления. Дополнительная заработная плата принимается в размере 30% от основной. Отчисления на социальные нужды принимаются в размере 28% от суммы основной и дополнительной заработной платы. Общие годовые затраты на оплату труда составят:

$$Z_{OT} = h_{ч} \cdot t \cdot 1,3 \cdot 1,28, \quad (4.11)$$

где  $h_{ч}$  – часовая ставка работника, руб/ч.

$t$  – количество часов работы в смену, ч.

Затраты на электрическую энергию в год определяются по формуле:

$$\mathcal{E} = V \cdot E \cdot C_{\mathcal{E}}, \quad (4.12)$$

где  $E$  – энергоемкость процесса приготовления кормовой смеси, кВт·ч/т.

$C_{\mathcal{E}}$  – тариф на электрическую энергию, руб/кВт·ч.

Сумма амортизационных отчислений  $A$ , руб. рассчитывается по методу списания стоимости оборудования пропорционально объему продукции (ПБУ 6/01 «Учет основных средств»):

$$A = h_{ч} \cdot \frac{V}{Q} = h_{ч} \cdot T, \quad (4.13)$$

где  $h_{ч}$  – часовая амортизация, руб/ч.

Величина часовой амортизации  $h_{ч}$ , руб/ч рассчитывается при сроке полезного использования оборудования 8 лет, числе рабочих дней в году 273 и 8- часовом рабочем дне:

$$h_{ч} = \frac{S_B}{N \cdot n_T \cdot n} \quad (4.14)$$

где  $S_B$  – балансовая стоимость установки, руб.

$N$  – срок полезного использования оборудования;

$n_T$  – число рабочих дней в году;

$n$  – количество часов в рабочем дне.

$$h_{ч} = \frac{S_B}{8 \cdot 273 \cdot 8},$$

Затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт по нормативам от балансовой стоимости оборудования:

$$Z_{ТО/ТР} = S_B \cdot k_{ТО}, \quad (4.15)$$

где  $S_B$  – балансовая стоимость оборудования, руб.

$k_{ТО}$  – коэффициент отчислений на техническое обслуживание и ремонт (8%).

Далее вычисляются целевые показатели.

Прямые затраты в год определяются по формуле:

$$Z_{П} = Z_{Э} + S_B \cdot e_H, \quad (4.16)$$

где  $Z_{П}$  – прямые годовые затраты, руб.

$Z_{Э}$  – эксплуатационные годовые затраты, руб.

$S_B$  – балансовая стоимость оборудования, руб.

$e_H$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений (принимается равным 0,1).

Годовые эксплуатационные затраты выражаются следующим образом:

$$Z_{Э} = Z_{ОТ} + Э + Z_{ТО/ТР} + А, \quad (4.17)$$

где  $Z_{ОТ}$  – годовые затраты на оплату труда, руб.

$Э$  – годовые затраты на электрическую энергию, руб.

$Z_{ТО/ТР}$  – годовые затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт, руб.

$А$  – амортизационные отчисления, руб.

Годовой экономический эффект (годовая экономия) в абсолютном выражении определяется как разница прямых годовых затрат по сравниваемому и предлагаемому оборудованию:

$$Э_{Г} = Z_{П}^C - Z_{П}^П, \quad (4.18)$$

где  $Z_{П}^C$  – прямые годовые затраты по сравниваемому оборудованию, руб.

$Z_{П}^П$  – прямые годовые затраты по предлагаемому оборудованию, руб.

Годовой экономический эффект относительно прямых затрат по сравниваемому оборудованию, %:

$$\mathcal{E}_Г^{\%} = \frac{\mathcal{E}_Г}{\mathcal{Z}_П^С} \cdot 100\% \quad (4.19)$$

Срок окупаемости рассчитывается по формуле:

$$C_О = \frac{S_Б}{\mathcal{E}_Г} \quad (4.20)$$

Расчет показателей экономического эффекта производили в табличном процессоре MSExcel (приложение В2).

При размере поголовья КРС 379 голов годовой экономический от использования смесителя концентрированных кормов в сравнении с существующим смесителем марки СВ-1,1 производства ООО «АТМ» составил 56821 руб. в абсолютном выражении или 18,28% относительно прямых годовых затрат по сравниваемому оборудованию.

Срок окупаемости капитальных вложений зависит от размера хозяйства. При величине поголовья 379 голов срок окупаемости составляет 1,5 года.

По известной часовой производительности смесителя  $Q$ , т/ч, средней суточной потребности в сухой смеси 6 кг на одно животное, при работе в одну смену продолжительностью 8 часов можно вычислить максимальный размер поголовья, обслуживаемого одной установкой:

$$n = \frac{8 \cdot Q}{0,006} = \frac{8 \cdot 0,7}{0,006} = 800 \text{ голов}$$

Таким образом, одна установка рассчитана на обслуживание поголовья размером до 800 голов.

С целью наглядного представления зависимости показателей экономического эффекта от размера хозяйства, а так же выработки рекомендаций для целевой группы потребителей предлагаемого оборудования, аналогичный расчет произведен при различных значениях величины поголовья КРС.

Результат сведен в таблицу 4.3

Таблица 4.3 – Зависимость показателей экономического эффекта от размера хозяйства

Размер хозяйства, голов КРС	Показатели	Ед. изм.	Значение	
50	Годовая экономия абсолютная	$\mathcal{E}_Г$	руб.	6 824
	Годовая экономия относительная	$\mathcal{E}^%_Г$	%	12.79
	Срок окупаемости	$C_0$	лет	12.21
100	Годовая экономия абсолютная	$\mathcal{E}_Г$	руб.	14 422
	Годовая экономия относительная	$\mathcal{E}^%_Г$	%	15.59
	Срок окупаемости	$C_0$	лет	5.78
200	Годовая экономия абсолютная	$\mathcal{E}_Г$	руб.	29 619
	Годовая экономия относительная	$\mathcal{E}^%_Г$	%	17.34
	Срок окупаемости	$C_0$	лет	2.81
400	Годовая экономия абсолютная	$\mathcal{E}_Г$	руб.	60 012
	Годовая экономия относительная	$\mathcal{E}^%_Г$	%	18.33
	Срок окупаемости	$C_0$	лет	1.39
600	Годовая экономия абсолютная	$\mathcal{E}_Г$	руб.	90 405
	Годовая экономия относительная	$\mathcal{E}^%_Г$	%	18.68
	Срок окупаемости	$C_0$	лет	0.92
900	Годовая экономия абсолютная	$\mathcal{E}_Г$	руб.	135 994
	Годовая экономия относительная	$\mathcal{E}^%_Г$	%	18.92
	Срок окупаемости	$C_0$	лет	0.61

На рисунке 4.3 представлена зависимость срока окупаемости от величины поголовья КРС.

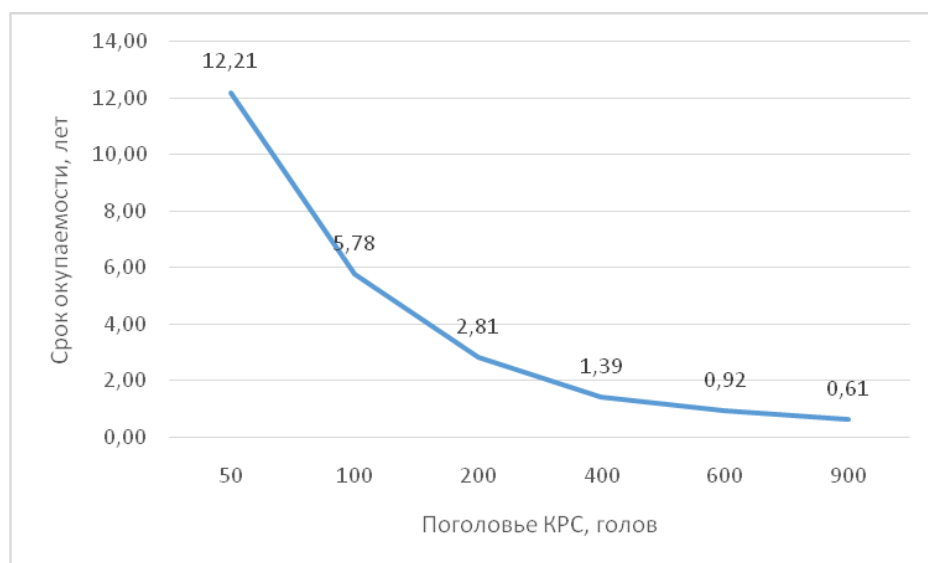


Рисунок 4.3 – Зависимость срока окупаемости от величины поголовья КРС

Из представленных результатов исследования экономического эффекта следует, что внедрение предлагаемого смесителя концентрированных кормов в производство может быть рекомендовано фермерским хозяйствам величиной от 100 голов КРС до 930 (при использовании одного устройства).

### **Выводы**

В результате производственных испытаний шнекового смесителя концентрированных кормов можно сделать следующие выводы.

1. Смеситель достаточно качественно выполняет процесс смешивания компонентов комбикорма, при этом степень коэффициента вариации смеси достигает 88,5%, что является удовлетворительным результатом. Нарушений технологического процесса в период испытаний не выявлено.

2. Часовая производительность смесителя с учетом времени, необходимого на загрузку бункера и выгрузку приготовленной смеси, составляет 0,6 т/час. Удельный расход электроэнергии составляет 0,5 кВт·ч/т.

3. Предлагаемый смеситель концентрированных кормов в количестве 1 шт. рассчитан на обслуживание поголовья КРС размером до 800 голов при среднем потреблении сухого комбикорма 6 кг в день на одно животное и работе в 1 смену продолжительностью 8 часов.

4. Годовой экономический эффект (годовая экономия) от использования смесителя концентрированных кормов в сравнении с существующим смесителем марки СВ-1,1 производства ООО «АТМ» составляет 56821 руб. в абсолютном выражении или 18,28% относительно прямых годовых затрат по сравниваемому оборудованию. Срок окупаемости капитальных вложений зависит от размера хозяйства. При величине поголовья 379 голов срок окупаемости составляет 1,5 года.

5. Предлагаемый смеситель концентрированных кормов можно рекомендовать мелким и средним фермерским хозяйствам с размером поголовья КРС от 100 до 800 голов при использовании одного устройства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Из анализа существующих смесителей концентрированных кормов установлено, что при повышении производительности шнековых смесителей снижаются качественные показатели приготавливаемых кормов.

2. Теоретически определено, что состав смеси концентрированных кормов зависит от параметров пятна заброса корма активатором в смесительный бункер. Так, при длине пятна от 0,5 до 0,15 м коэффициент вариации равен 0,819. Наименьшая продолжительность смешивания компонентов смеси наблюдается при скорости их поступления на поверхность активатора 0,05 м/с. Угол расположения лопастей его при длине 0,19 м варьируется от 10° до 36°. Частота колебаний не превышает 1,5 Гц.

3. Экспериментально выявлено, что производительность шнека смесителя зависит от угла наклона к выгрузной горловине, частоты вращения и величины раскрытия перепускного окна. Определены параметры шнека смесителя: угол наклона шнека к выгрузной горловине 9°; частота его вращения 70 мин<sup>-1</sup>; величина раскрытия перепускного окна 41°. При этом производительность шнека составляет 0,339 кг/с.

4. Экспериментально уточнены значения параметров механического активатора смесителя: угол установки двух лопастей друг к другу 130° при частоте их возвратно-поступательных движений 90 мин<sup>-1</sup>, угол относительно оси вала 20°, при этом коэффициент вариации кормовой смеси из зерновых компонентов составляет 91,1%. Продолжительность приготовления концентрированного корма массой 50 кг при совместной работе шнека, обеспечивающего циркуляционный поток компонентов на активатор, составляет 4 минуты при коэффициенте вариации смеси 85%.

5. Испытания смесителя концентрированных кормов в производственных условиях показали, что при загрузке в смеситель порции компонентов общей массой 50±0,01 кг и смешивании величина коэффициента вариации кормовой смеси из измельчённого зернового материала для крупного рогатого скота

составляет 88,55%, для свиней 92,08%. Годовой экономический эффект для 100 голов крупного рогатого скота составит 6824 руб.

### **Предложения производству**

1. Для повышения производительности смесителя концентрированных кормов целесообразно использовать механический активатор.

2. Рекомендуемые параметры механического активатора при использовании его на смесителе концентрированных кормов: производительность 0,339 кг/с, угол установки лопастей друг к другу  $130^{\circ}$ , частота возвратно-поступательных движений  $90 \text{ мин}^{-1}$  при вращении на угол относительно оси вала  $20^{\circ}$ .

### **Перспективы дальнейшей разработки темы:**

В дальнейшей перспективе научных исследований необходимо продолжить работу в направлении совершенствовании конструкции механического активатора, приготавливать концентрированные корма из компонентов существенно отличающихся гранулометрическим составом.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонюк, В.С. Основы животноводства: Учебное пособие [Текст] / В.С. Антонюк.- Минск: Изд-во Дизайн Про,1997. - С. 497.
2. Артемьев, В.Г. Результаты производственных исследований смесителя минеральных удобрений [Текст]/ В.Г.Артемьев, А.О. Барышов // Сборник научных трудов, посвященный 75 –летию доктора технических наук, профессора Артемьева Владимира Григорьевича «Механика жидких и сыпучих материалов в спирально-винтовых устройствах». Ульяновск, 2013.- С. 13-17.
3. Арютов, Б.А. Методы повышения эффективности механизированных производственных процессов по условиям их функционирования в растениеводстве: Учебное пособие [Текст] / Б.А. Арютов, А.Н. Важенин, А.В. Пасин.- М.: Изд-во Академия Естествознания, 2010. – С. 365.
4. Байдов, А.В. Технология и агрегат для приготовления комбикорма из плющеного фуражного зерна: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Байдов Антон Владимирович. - Рязань, 2005.- С. 156.
5. Белянчиков, Н. Н. Механизация технологических процессов [Текст]/ Белянчиков Н. Н., Белехов И. П., Кожевников Г. Н.-М.: Изд-во Агропромиздат , 1989. - С. 400.
6. Брагинец Н.В. Курсовое и дипломное проектирование по механизации животноводства [Текст] / Н.В. Брагинец, Д.В. Полишкин. - 3-е изд. перераб. М.: Агропромиздат, 1991. – С. 190.
7. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике [Текст] / М. Я. Выгодский. – М., 2000. – С. 867.
8. Гриб, В.К. Механизация животноводства: Учеб.для с.-х. вузов [Текст] / В.К. Гриб. - Мн.: Ураджай,1997. - С. 640.
9. Григорьев, А. М. Винтовые конвейеры [Текст] / А. М. Григорьев. – М. : Машиностроение, 1972. – 184 с.
10. Гуляев, В.П. Сельскохозяйственные машины: Учебное пособие [Текст]/ В.П. Гуляев. - Санкт-Петербург: Изд-во Лань, 2017. – С.240.

11. ГОСТ 25809-83 (СТ СЭВ 203-75) Смесители водоразборные. Типы и основные размеры. – М.: Издательство стандартов, 1983. – 37с.

12. ГОСТ 23153-78 Кормопроизводство. Термины и определения 30.06.1979  
Область применения: Настоящий стандарт устанавливает применяемые в науке, технике и производстве термины и определения понятий, относящихся к кормопроизводству. – М.: Издательство стандартов, 1995. – 18с.

13. ГОСТ 12.2.007.0—75 Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности. – М.: Издательство стандартов, 2003. – 13с.

14. ГОСТ 12.1.005—88 Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. - М.: Стандартинформ, 2008. – 50с.

15. ГОСТ Р 53055-2008 Машины сельскохозяйственные и лесохозяйственные с электроприводом. Общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2009. – 12с.

16. ГОСТ Р 53056-2008 — Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. – М.: Стандартинформ, 2009. – 27с.

17. ГОСТ 13496.4—93 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина.- М.: Стандартинформ, 2011. – 17с.

18. ГОСТ 13496.8—72 Комбикорма. Методы определения крупности размола и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений. - М.: Стандартинформ, 2011. – 4с.

19. ГОСТ 13496.0—80 Комбикорма, комбикормовое сырье. Методы отбора проб. – М.: Стандартинформ, 2012. – 15с.

20. ГОСТ 31653—2012 Корма. Метод иммуноферментного определения микотоксинов. - М.: Стандартинформ, 2012. – 15с.

21. ГОСТ 32855—2014 Требования при выращивании и откорме молодняка крупного рогатого скота на мясо для выработки продуктов детского питания.- М.: Стандартинформ, 2015. – 21с.

22. ГОСТ 13496.3—92 (ИСО 6496—83) Комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения влаги. – М.: Стандартинформ, 2016. – 13с.

23. ГОСТ Р13586.5-2015Зерно. Метод определения влажности. – М.: Стандартинформ, 2016. – 23с.

24. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации на период до 2020 года. [Электронный ресурс] / Режим доступа:[http:// rg.ru/2010/02/03/prod-dok.html](http://rg.ru/2010/02/03/prod-dok.html)

25. Епифанов А.П. Электропривод в сельском хозяйстве: Учебное пособие. Гриф УМО вузов России [Текст] / А.П. Епифанов. - Санкт-Петербург: Изд-во Лань, 2016. – С. 224.

26. Завражнов А.И. Влияние конструктивных параметров мобильного смесителя-раздатчика кормов на однородность смешивания [Текст] / А.И. Завражнов, С.Ю. Астапов//Достижения науки и техники АПК, 2007. - № 6. - С. 25-27.

27. Завражнов, А.И. Снижение энергоемкости процесса смешивания кормов в шнековом смесителе-раздатчике [Текст] /А.И. Завражнов, С.Ю. Астапов // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2007. - № 3. - С. 205-209.

28. Завражнов, А.И. Влияние конструктивных параметров мобильного смесителя-раздатчика кормов на однородность смешивания [Текст] / А.И. Завражнов, С.Ю. Астапов//Достижения науки и техники АПК, 2007. - № 6. - С. 25-27.

29. Завражнов, А.И. Модернизация технологии подработки зерна путем применения авторегулируемых делителей потока сыпучих материалов [Текст] / А.И. Завражнов, К.Н. Тишанинов //Российская сельскохозяйственная наука, 2008. - № 3. - С. 56-58.

30. Завражнов, А.А. Современенные вопросы науки и производства в агроинженерии [Текст] / А.А.Завражнов. - Санкт-Петербург: Изд-во «Лань», 2013. – С. 496.

31. Завражнов, А.И. Интеллектуальная следящая система для управления машинами и агрегатами в маточниках и питомниках [Текст] / А.И. Завражнов, А.С. Гордеев, А.А. Завражнов, В.Ю. Ланцев // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета, 2014. - № 5. - С. 42-46

32. Завражнов, А.И. Интеллектуальные машинные технологии и техника в промышленном садоводстве в России [Текст] / А.И. Завражнов, А.Ю. Измайлов, А.А. Завражнов, В.Ф. Федоренко, И.Г. Смирнов, В.Ю. Ланцев, Д.О. Хорт // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК «Материалы VIII Международной научно-практической конференции "ИнформАгро-2016"». ФГБНУ "Росинформагротех", 2016. - С. 238-244.

33. Земсков, В.И. Проектирование ресурсосберегающих технологий и технических систем в животноводстве: Учебное пособие. Гриф УМО вузов России [Текст] / В.И. Земсков. - Санкт-Петербург: Изд-во «Лань», 2016. – С. 384.

34. Зенков, Р.Л. Машины непрерывного транспорта: Учебное пособие для вузов по специальности «Подъемно – транспортные машины и оборудования» [Текст] / Р.Л. Зенков, И.И. Ивашков, Л.Н. Колобов. – М: Машиностроение, 1980. – 304 с.

35. Исаев, Ю.М. Дозирование в смесителе спирального протравливателя [Текст] / Ю.М. Исаев, Х.Х. Губейдуллин, А.В. Шуреков. – Пенза: Современные наукоемкие технологии, 2008. - № 4.- 58-59с.

36. Исаев, Ю.М. Равномерность дозирования в смесителе спирально-винтового протравливателя [Текст] / Ю.М. Исаев, М.В. Воронина, А.В. Шуреков. – Пенза: Современные наукоемкие технологии, 2008. - № 3.- С. 69.

37. Карташов, С.Г. Эффективность технологий и технических средств заготовки зерносенажа для фермерских хозяйств [Текст] / С.Г. Карташов, Е.И. Резник, Л.З. Бестаев // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве. Материалы Международной научно-технической конференции: В 3-х томах. - 2014. - С. 31-38.

38. Карташов, С.Г. Приготовление высокопитательных и обеззараженных комбикормов в фермерских хозяйствах с использованием

многофункциональных смесителей [Текст] / С.Г. Карташов, В.С. Ромалийский, Р.П. Сапронова // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. - 2014. - № 1 (13).- С. 86-89.

39. Карташов, С.Г. Разработка структурных технологических систем в блочно-модульном исполнении для приготовления высокобелковых кормосмесей [Текст] / С.Г. Карташов, Е.И. Резник // Инновации в сельском хозяйстве. - 2015. - № 3 (13).- С. 185-189.

40. Карташов, С.Г. Экономичное мобильное энергетическое транспортное средство для заготовки высокобелковых кормов для фермерских хозяйств [Текст] / С.Г. Карташов, Е.И. Резник, В.И. Еремченко // Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции. Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства. - 2015. - С. 332-336.

41. Карташов, С.Г. Методические рекомендации по технологическому проектированию предприятий по производству комбикормов РД-АПК 1.10.17.01-15 [Текст] / С.Г. Карташов, В.Ф. Федоренко, Н.П. Мишуров, В.Я. Гольтяпин, А.Д. Федоров, Ю.И. Чавыкин, В.И. Сыроватка, Е.М. Клычев, В.С. Ромалийский, А.В. Смоленский, П.А. Чапский, В.А. Сысуев, П.А. Савиных, Ю.В. Сыгучев// Министерство сельского хозяйства РФ. Москва. - 2015.

42. Карташов, С.Г. Оборудование в блочно-модульном исполнении для приготовления обогащенных комбикормов [Текст] / С.Г. Карташов, Е.И. Резник// Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. - 2016. - № 4 (24).- С. 92-95.

43. Карташов, С.Г. Инновационная технология для приготовления высокобелковых кормовых смесей [Текст] / С.Г. Карташов, Е.И. Резник, Н.В. Перепелкин // Материалы конференции, посвященной 120-летию М.Ф. Томмэ. - 2016.- С. 234-238.

44. Карташов, С.Г. Технические средства по приготовлению гомогенизированных смесей из фуражного зерна для корма животным [Текст] / С.Г. Карташов // Вестник ВИЭСХ. - 2018. - № 1 (30).- С. 67-71.

45. Карташов, С.Г. Способ приготовления кормолекарственных смесей с антигельминтиками [Текст] / С.Г. Карташов, Е.М. Клычев // Российский паразитологический журнал. - 2018.Т.12 - № 1.- С. 70-75.

46. Коба, В. Г. Исследование физико-механических свойств кормов для свиней [Текст] / В. Г. Коба // Механизация работ в животноводстве : сб. науч. работ. - Саратов, 1973. - С. 65-69.

47. Колпаков, Ю.М. Математическая модель вариаций питательных веществ в суточных рационах животных и птицы [Текст] / И.Г. Панин, Ю.М. Колпаков, Е.С. Шенцова, В.В. Гречишников //Аграрная наука, 2008. - № 8. - С. 25-26

48. Колпаков, Ю.М. Технологические возможности повышения однородности комбикормовых рационов по содержанию бав [Текст] / А.А. Шевцов, Ю.М. Колпаков, Е.С. Шенцова, А.С. Лесных // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология, 2010. - № 2-3. - С. 62-64

49. Колпаков, Ю.М. Теоретическая оценка допустимых пределов погрешностей содержания бав в премиксах [Текст] / Е.С. Шенцова, Ю.М. Колпаков, Н.В. Тонких, О.А. Апалихина // Аграрная наука, 2014. - № 12. - С. 25-27..

50. Коновалов, В.В. Аналитическое определение производительности винтового смесителя-конвейера [Текст] / В.В. Коновалов, А.В. Чупшев, В.П. Терюшков, А.С. Фомин // Нива Поволжья, 2014. - № 1 (30). - С. 63-70.

51. Коновалов, В.В. Оптимизация конструктивно-технологических параметров спирального смесителя-конвейера [Текст] / В.В. Коновалов, А.С. Фомин, В.П. Терюшков, А.В. Чупшев // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии, 2014. - № 3. - С. 87-91.

52. Коновалов, В.В. Оптимизация технологических параметров смесителя с комбинированным рабочим органом [Текст] / В.В. Коновалов, В.П. Терюшков, А.В. Чупшев // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии, 2014. - № 3. - С. 83-87.

53. Коновалов, В.В. Аналитическое обоснование длительности цикла работы смесителя периодического действия [Текст] / В.В. Коновалов, М.В. Фомина, В.П. Терюшков, А.В. Чупшев //Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии, 2015. - № 3. - С. 10-15.

54. Коновалов, В.В. Результаты исследований смесителя сухих кормов [Текст] / В.В. Коновалов, М.В. Фомина, А.В. Чупшев //Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства , 2016. - № 4 (24). - С. 103-106.

55. Коновалов, В.В. К расчету конструкции смесителя [Текст] / В.В. Коновалов, А.С. Фомин// Научно-методический электронный журнал Концепт, 2016. Т. 11- С. 3721-3725.

56. Коновалов, В.В. Расчет мощности привода шнеколопастного органа смесителя [Текст] / В.В. Коновалов, В.П. Терюшков, И.А. Боровиков// Инновационная техника и технология, 2016. - № 4 (09).– С. 20-25.

57. Коновалов, В.В. Обоснование длины лопаток лопастного смесителя [Текст] / В.В. Коновалов, М.В. Фомина, В.П. Терюшков, А.В. Чупшев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс, 2016. - № 5 (33). - С. 47-52.

58. Курдюмов, В.И. Обоснование геометрических параметров разрушающих элементов измельчителя-смесителя кормов [Текст] / В.И. Курдюмов, К.В. Шленкин // Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 40-летию Института механики и энергетики. - Саранск ,2002. - С. 69-72.

59. Курдюмов, В.И. Результаты исследования процесса смешивания в измельчителе-смесителе вертикального типа [Текст] / В.И. Курдюмов, В.Ф. Некрашевич // Материалы Всероссийской научно-производственной конференции "Инновационные технологии в аграрном образовании, науке и АПК России".- Ульяновск : Ульян. гос. с.-х. акад., 2003. - С. 224-227.

60. Курдюмов, В.И. Обоснование параметров лопастной мешалки [Текст] / В.В. Новиков, С.П. Симченкова, В.И. Курдюмов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. - 2011. - № 2. - С. 104-108.

61. Курдюмов, В.И. Разработка универсального смесителя периодического действия [Текст] / В.И. Курдюмов, Д.В. Нестерова // Инновации в сельском хозяйстве. – Москва, 2014. - № 5 (10). - С. 43-45.

62. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн.- Изд-во Наука, 1973. – С. 804.

63. Кукта, Г. М. Оценка процесса смешивания кормов [Текст] / Г. М. Кукта, А. И. Голосов, А. Ш. Финкельштейн // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. - 1969. - № 2. - С. 48-51.

64. Кукта, Г. М. Оптимальная продолжительность смешивания компонентов комбикормов [Текст] / Г. М. Кукта, А. И. Голосов // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. - 1971. - № 11. - С. 12-14.

65. Кукта, Г. М. Методика определения неравномерности смешивания кормов [Текст] / Г. М. Кукта // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1985. - № 1. - С. 44 - 46.

66. Кукта, Г. М. Приготовление кормов в смесителях непрерывного действия [Текст] / Г. М. Кукта, И. Губко, И. Фурса // Техника в сельском хозяйстве. – 1985. - № 3. - С. 29- 31.

67. Кукта, Г. М. Применение кормораздатчиков-смесителей [Текст] / Г. М. Кукта, В. И. Дешко // Техника в сельском хозяйстве. - 1985. - № 8. - С. 25-26.

68. Кукта, Г. М. Машины и оборудование для приготовления кормов [Текст] / Г. М. Кукта. – М. :Агропромиздат, 1987. – 303 с.

69. Мельников, С.В. Опыт комплексной механизации возделывания кукурузы в совхозе «Большевик» (Ломоносовский район Ленинградской области) [Текст] / С.В. Мельников, С.П Рыхтиков. – М.; Л.: Сельхозгиз, 1960. – С. 60.

70. Мельников, С.В. Механизация возделывания высокопродуктивных кормовых культур [Текст] / С.В. Мельников // науч. ред. С. А. Иофинов. – Л., 1962. – С. 79.



71. Мельников, С.В. Экспериментальные основы теории процесса измельчения кормов на фермах молотковыми дробилками: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 410 /Мельников Сергей Всеволодович. - Л., 1969. – С. 59.

72. Мельников, С.В. Опыт механизации приготовления кормов на молочных фермах [Текст] / С.В. Мельников, Д.И. Николаев. – Л.: Ленингр. дом науч.-технич. Пропаганды, 1974. – С. 29.

73. Михайлов, Н.А. Современные производственные технологии содержания сельскохозяйственных животных: Учебное пособие. Гриф Министерства сельского хозяйства [Текст] / Н.А. Михайлов - Санкт-Петербург: Изд-во Лань, 2013. – С. 464.

74. Мотовилов, К.Я. Экспертиза кормов и кормовых добавок [Текст] / К. Я. Мотовилов, А.П. Булатов, В.М. Позняковский, Ю.А. Кармацких. - Санкт-Петербург: Изд-во Лань, 2013. – С. 560.

75. Назаренко, Ю.В. Шнековый многокомпонентный дозатор [Текст] / Н.В. Коняев, И.Ф. Сараев, Б.С. Блинков, Ю.В. Назаренко // Сборник научных статей по материалам Международной научно-практической конференции.- ЯГСХА, 2016. - С. 28-32.

76. Нечаев, В.И. Проблемы инновационного развития животноводства: Монография [Текст] / В.И. Нечаев, Е.И. Артемова.– Краснодар: Изд-во Атри, 2009. – С. 368.

77. Новиков, М.А. Сельскохозяйственные машины. Технологические расчеты в примерах и задачах: Учебное пособие. Гриф УМО вузов России [Текст] / М.А. Новиков. - Санкт-Петербург: Изд-во Проспект Науки, 2011. – С. 208.

78. Омельченко, А.А. Кормораздающие устройства [Текст] / А.А. Омельченко, Т.М. Куцын. – М: Машиностроение, 1971, - С 206.

79. Панин, И.Г. Оценка погрешностей содержания питательных и биологически активных веществ в комбикормовой продукции [Текст] / И.Г. Панин, Е.С. Шенцова, В.В. Гречишников, А.И. Панин //Аграрная наука, 2004. - № 8. - С. 21-22.

80. Панин, И.Г. Вероятностная методика расчета рецептов комбикормов [Текст] / И.Г. Панин //Аграрная наука, 2004. - № 10. - С. 13-15.

81. Панин, И.Г. Компоненты комбикормов [Текст] / Н. И. Чернышев, И. Г. Панин. - Воронеж: Изд-во Проспект, 2005. – С. 135.

82. Панин, И.Г. Эффективность применения программ оптимизации рецептов комбикормов [Текст] / И.Г. Панин, В.В. Гречишников // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. - 2007. - № 2. - С. 60-65.

83. Панин, И.Г. Оценка погрешностей содержания питательных и биологически активных веществ в комбикормовой продукции [Текст] / А.И Панин, Е.С. Шенцова, И.Г. Панин, В.В. Гречишников //Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. - 2015. - № 4 (66). - С. 109-115.

84. Пат. № 2215580 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 02 С 4/06. Вальцовый станок / Некрашевич В.Ф., Чельшев С.В., Капитонов Е.А., Слабиков А.Ф., Кипарисов Н.Г., Кочетков А.С., Байдов А.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рязанская государственная сельскохозяйственная академия им. проф. П.А. Костычева». - № 2001123526/13; заявл. 22.08.2001; опубл. 10.11.2003, Бюл. № 31. – 5с.:ил.

85. Пат. № 2219758 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01 F 29/02. Рабочий орган измельчителя-смесителя грубых кормов/Курдюмов В.И., Корабельщиков А.С.; заявитель и патентообладатель Учебно-опытное хозяйство «Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии». - № 2001123634/13;заявл. 28.03.2006; опубл. 27.05.2008, Бюл. № 36.- 6с.:ил.

86. Пат. № 2325097 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 23 N 17/00. Смеситель кормов/Курдюмов В.И., Васильев А.А., Шафеев Р.К.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия". - № 2006109957/13;заявл. 10.10.2007; опубл. 27.05.2008 ,Бюл. № 15.- 6с.:ил.

87. Пат. № 2425597 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 23 N 17/00; В 02 С 18/00. Комбикормовый агрегат/Сараев И.Ф., Коняев Н.В., Назаренко Ю.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Курская государственная сельскохозяйственная академия имени профессора И.И. Иванова Министерства сельского хозяйства Российской Федерации». - № 2010108292/13; заявл. 05.03.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22. - 6с.:ил.

88. Пат. № 2117326 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> G 06 F 15/16. Вычислительная система на базе матрицы процессорных элементов/ Мельников С.В., Алешин Б.С., Бондаренко А.В., Новиков В.М., Юшин А.П.; заявитель и патентообладатель Алешин Борис Сергеевич, Бондаренко Александр Викторович, Новиков Валерий Михайлович. - № 98100973/09; заявл. 29.01.1998; опубл. 10.08.1998, Бюл. № 31. – 10с.:ил.

89. Пат. № 123941 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 F 11/00. Дозатор-смеситель сыпучих материалов/Курдюмов В.И., Артемьев В.Г., Барышов А.О.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия". - № 2012106033/28; заявл. 23.10.2009; опубл. 27.03.2011, Бюл. № 18. – 4с.:ил.

90. Пат. № 108924 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 23 N 17/00. Смеситель кормов/Курдюмов В.И., Хохлова Е.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия". - № 2006109957/13; заявл. 28.03.2008; опубл. 27.05.2008, Бюл. № 15. – 5с.:ил.

91. Пат. № 2486479 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 F 13/00. Дозатор-смеситель сыпучих материалов/Курдюмов В.И., Артемьев В.Г., Барышов А.О.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

"Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия". – № 2012106033/28; заявл. 20.02.2012; опубл. 27.06.2013, Бюл. № 18. – 5.:ил.

92. Пат. № 2275005 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01 F 29/00; А 01 К 5/00. Измельчитель – смеситель – раздатчик стебельчатых кормов в рулонах и концентрированных кормов / Тищенко М.А., Клименко В.И., Титович В.М., Макаренко А.П., Тищенко И.И.; заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский и проектно-технологический институт механизации и электрификации сельского хозяйства" (ВНИПТИМЭСХ). – № 2004124107/12; заявл. 06.08.2004; опубл. 27.04.2006, Бюл. № 12. – 8с.:ил.

93. Пат. №2070377 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01 F 29/00. Измельчитель – смеситель кормов/Воронцов И.И.; заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский и проектно-технологический институт механизации и электрификации сельского хозяйства" (ВНИПТИМЭСХ). – № 2005101728/12; заявл. 24.05.1994; опубл. 20.12.1996, Бюл. № 26. – 7с.:ил.

94. Пат. № 2033038 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> А 01 К 5/02. Смеситель кормов/Гаджиев Ф.Г.О., Чалый П.В.; заявитель и патентообладатель Гаджиев Фикрат Гасаноглы, Чалый Петр Васильевич. – № 93037167/15; заявл. 29.07.1993; опубл. 20.04.1995, Бюл. № 25. – 4с.:ил.

95. Пат. № 2040165 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01К 5/00. Раздатчик-смеситель кормов/Терпиловский К.Ф., Барри И.С., Сыманович В.С.; заявитель и патентообладатель «Белорусский аграрный технический университет». – № 4910190/15; заявл. 12.02.1991; опубл. 25.07.1995, Бюл. № 10. – 4с.:ил.

96. Пат. № 2047291 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01К 5/02. Раздатчик-смеситель кормов/Воронцов И.И., Фостюков А.В., Кириченко Н.Н., Леонидов Н.В.; заявитель и патентообладатель «Белгородский сельскохозяйственный институт (учебно-научный центр по сельскому хозяйству)». – № 93038616/15; заявл. 27.07.1992; опубл. 10.11.1995, Бюл. № 24. – 3с.:ил.

97. Пат. № 2219758 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01 F 29/02. Рабочий орган измельчителя-смесителя грубых кормов/Курдюмов В.И., Корабельщиков А.С.; заявитель и патентообладатель Учебно-опытное хозяйство «Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии». – № 2001123634/13; заявл. 24.08.2001; опубл. 27.12.2003, Бюл. № 36. – 5с.:ил.

98. Пат. № 2214708 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01 К 5/00; А 01 F 29/00; А 23 N 17/00. Измельчитель-смеситель-раздатчик кормов/Сысуев В.А., Савиных П.А., Чернятьев Н.А., Алешкин А.В., Немчанинов В.В.; заявитель и патентообладатель Государственное учреждение «Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого». – № 2002109135/13; заявл. 08.04.2002; опубл. 27.10.2003, Бюл. № 30. – 7с.:ил.

99. Пат. № 2231960 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 23 К 1/20; А 23 N 17/00. Способ подготовки к прессованию многокомпонентных кормосмесей на основе сечки грубых кормов и смеситель для его осуществления/Шевцов В.В., Резник Е.И., Шевцов В.В.; заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства». – № 2003102100/12; заявл. 28.01.2003; опубл. 10.07.2004, Бюл. № 19. – 9с.:ил.

100. Пат. № 2289906 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01 F 29/00. Стационарный измельчитель-смеситель кормов комбинированного действия/Тищенко М.А., Клименко В.И., Тищенко И.И.; заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-технологический институт механизации и электрификации сельского хозяйства» (ВНИПТИМЭСХ). – № 2005120885/12; заявл. 04.07.2005; опубл. 27.12.2006, Бюл. № 36. – 7с.:ил.

101. Пат. № 2490879 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01 К 29/00; В 01 F 9/04. Мобильный раздатчик-смеситель кормов/Скоркин В.К., Повалихин Н.В., Карпов В.П., Кустова В.Н.; заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт

механизации животноводства Российской академии сельскохозяйственных наук» (ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии).– №2011146848/13; заявл. 17.11.2011; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 24. – 8с.:ил.

102. Пат. № 2381725 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 23 N 17/00. Смеситель кормов/Ведищев С.М., Свиридов М.М., Прохоров А.В., Усатюк Н.В., Самойлов Е.А., Хольшев Н.В.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ГОУ ВПО "ТГТУ"). – № 2008127080/13; заявл. 03.07.2008; опубл. 20.02.2010, Бюл. № 5. – 5с.:ил.

103. Пат. № 2410989 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01 F 29/00; В 02 С 18/08. Вертикальный шнековый измельчитель-смеситель кормов/Горюнов С.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный заочный университет».– №2010146030/05; заявл. 12.11.2010; опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14. – 4с.:ил.

104. Пат. № 2410989 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 23 N 17/00. Вибрационный смеситель сыпучих кормов/Мамедов Ф.А., Хромов Е.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный заочный университет». – № 2009131495/13; заявл. 20.08.2009; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 4. – 6с.:ил.

105. Пат. № 2373809 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 23 N 17/00. Барабанный смеситель кормов/Марченко А.Ю., Серга Г.В., Цыбулевский В.В., Серга М.Г.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет».– №2008121050/13; заявл. 26.05.2008; опубл. 27.11.2009, Бюл. № 33. – 7с.:ил.

106. Пат. № 2327338 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01 F 29/00. Универсальный измельчитель-смеситель кормов/Мирзоянц Ю.А., Фириченков

В.Е., Зудин С.Ю., Скоркин В.К., Рыбаков И.Ю.; заявитель и патентообладатель «Костромская Государственная Сельскохозяйственная Академия». – № 2005102946/12; заявл. 07.02.2005; опубл. 27.06.2008, Бюл. № 18. – 4с.:ил.

107. Пат. № 2311753 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01 F 29/02; А 23 N 17/00. Способ приготовления кормосмеси в бункерном смесителе и смеситель кормов/Стяжкин В.И., Сосновский Е.Л., Забелин Г.Л.; заявитель и патентообладатель Стяжкин Владимир Иванович Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр «ФЕРММАШ» (ООО «НТЦ ФЕРММАШ»). – № 2005135322/12; заявл. 15.11.2005; опубл. 10.12.2007, Бюл. № 34. – 15с.:ил.

108. Пат. № 103745 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 01 F 3/18; В 01 F 13/02. Аэродинамический смеситель сыпучих кормов/Николаев В.Н., Сергеев Н.С., Шатруков В.И., Зязев Е.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ). - № 2014146195/05; заявл. 97.11.2010; опубл. 22.10.2010, Бюл. № 8. – 10с.:ил.

109. Пат. № 117777 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 23 N 17/00. Смеситель сыпучих кормов/Зыкин Е.С.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный заочный университет». – № 2009131495/13; заявл. 27.01.2012; опубл. 27.01.2012, Бюл. № 4. – 7с.:ил.

110. Пат. № 2601598 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01 F 29/00; В 02 С 18/08. Шнековый измельчитель-смеситель кормов/Горюнов С.В., Ферябков А.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный заочный университет». – №2010146030/05; заявл. 23.03.2015; опубл. 10.11.2012, Бюл. № 31. – 4с.:ил.

111. Патент № 140313 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 23 N 17/00 Смеситель-запарник кормов/ / Асадуллин Л.Н., Асадуллин Н.М.; заявитель и

патентообладатель Головное специализированное конструкторское бюро по машинам для свиноводческих ферм и «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-технологический институт механизации животноводства». - № 2721678/30-15; заявл. 18.11.2013; опубл. 10.05.2014, Бюл. № 13.- 3с.:ил.

112. Пат. № 2474109 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> А 01 К 5/00. Смеситель - раздатчик кормов/Воронцов И.И., Воронцов С.И.; заявитель и патентообладатель Воронцов Иван Иванович, Воронцов Сергей Иванович.- № 2011119056/13; заявл. 12.05.2011; опубл. 10.02.2013, Бюл. № 4. – 6с.:ил.

113. Пат. № 2275005 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01 F 29/00; А 01 К 5/00. Измельчитель-смеситель-раздатчик стебельчатых кормов в рулонах и концентрированных кормов/Тищенко М.А., Клименко В.И., Титович В.М., Макаренко А.П., Тищенко И.И.; заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-технологический институт механизации и электрификации сельского хозяйства» (ВНИПТИМЭСХ). – № 2004124107/12; заявл. 06.08.2004; опубл. 27.04.2006, Бюл. № 12. – 10с.:ил.

114. Пат. № 2549287 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01 К 29/00. Измельчитель-смеситель-раздатчик рулонированного корма/Повалихин Н.В.; заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт механизации животноводства Российской академии сельскохозяйственных наук» (ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии). – № 2012107556/13; заявл. 17.12.2013; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 24. – 5с.: ил.

115. Пат. № 1055448 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> А 01 К 5/02. Кормораздатчик-смеситель/Тищенко М.А., Филатов С.К., Анспакс Я.В., Бенсон Р.К.; заявитель и патентообладатель Всероссийский ордена трудового красного знамени «Научно-исследовательский и проектно-технологический институт механизации и электрификации сельского хозяйства». – № 3483747; заявл. 17.08.1982; опубл. 23.11.1983, Бюл. № 43. – 7с.:ил.



116. Пат. № 166266 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 01 F 7/24. Смеситель-обоганитель концентрированных кормов/Каширин Д.Е., Полякова А.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева". – № 2016116473/05; заявл. 26.04.2016; опубл. 20.11.2016, Бюл. № 32. – 7с.:ил.

117. Полякова, А.А. Результаты исследования синхронизации 4-х приводных технологических систем на основе цифрового моделирования [Текст] / А.А. Полякова, Н.Г. Кипарисов, И.Е. Куцев // Сборник научных трудов преподавателей и аспирантов рязанского государственного агротехнологического университета.- Рязань: Изд-во РГАТУ, 2011. - С. 46 - 51.

118. Полякова, А.А. Экспериментальное исследование электродвигателей привода кормораздатчика [Текст] / Н.В. Бышов, А.А. Полякова, Н.Г. Кипарисов// Международная научно - практическая конференция, посвященная 75-летию Владимира Федоровича Некрашевича «Инновационные технологии и средства механизации в растениеводстве и животноводстве».- Рязань: Изд-во РГАТУ, 2011.- С. 114-116.

119. Полякова, А.А. Синхронизация и управление скоростью вращения электропривода постоянного тока [Текст] / Н.В. Бышов, А.А. Полякова, Н.Г. Кипарисов // Сборник научных трудов «Актуальные проблемы и их инновационные решения в АПК. Посвящается 60-летию инженерного факультета. Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева». - Рязань: Изд-во РГАТУ, 2011. - С. 21-26.120.

120. Полякова, А.А. Проведение настроечных экспериментов на лабораторной установке вертикального миксера [Текст] / Н.Г. Кипарисов, А.А. Полякова // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева, 2013.-№ 2 (18). - С. 55-58.

121. Полякова, А.А. Результаты лабораторных исследований смешивания дробленых компонентов кормосмесей в миксере с электроприводом [Текст]/А.А. Полякова, И.Е. Куцев // Материалы 65-й Международной научно-практической

конференции «Научное сопровождение инновационного развития агропромышленного комплекса: теория, практика, перспективы». ФГБОУ ВО РГАТУ. - Рязань, 2014.- С. 50-52.

122. Полякова, А.А. Конструктивно-технологические параметры спирального смесителя [Текст] / А.А. Полякова, В.В. Утолин, Е.Е. Гришков, А.Н. Топильский // Сельский механизатор, 2015.- №7.- С.28-29.

123. Полякова, А.А. Использование акселерометров для определения технологических параметров миксера кормораздатчика [Текст] / А.А. Полякова // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева, 2015.- № 2 (26). - С. 112-115.

124. Полякова, А.А. Исследование рабочего процесса шнековых миксеров для приготовления кормовых смесей [Текст] / А.А. Полякова, Д.Е. Каширин, М.А. Милютин // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева, 2015.-№ 2 (26). - С. 52-56.

125. Полякова, А.А. Исследование производительности смесителя концентрированных кормов [Текст] / А.А. Полякова // Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию кафедры сельскохозяйственных машин агроинженерного факультета Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I «Инновационные направления развития технологий и технических средств механизации сельского хозяйства». Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2015.- С. 277-280.

126. Полякова, А.А. Исследование производительности шнекового смесителя [Текст] / А.А. Полякова, М.А. Милютин, Д.Е. Каширин, А. И. Трыханкин, В. В. Никитов // Вестник Совета молодых ученых Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева, 2015.-№ 1.- С. 158-160.

127. Полякова, А.А. Проведение теоретических исследований синхронизации движителя кормораздатчиков [Текст] / А.А. Полякова, Д.Е.

Каширин // Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, 2015.-№ 4 (8). - С. 66-71.

128. Полякова, А.А. Экспериментальное определение энергоемкости шнекового смесителя [Текст] / А.А. Полякова, Д.Е. Каширин // Сборник статей студентов, магистрантов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей «Развитие современной науки: теоретические и прикладные аспекты. Под общ ред. Т.М. Сигитова. Пермь, 2016. - С. 189-191.

129. Полякова, А.А. К вопросу снижения энергоемкости при использовании шнекового смесителя [Текст] / А.А. Полякова // Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки». ФГБОУ ВО "Южно-Уральский государственный аграрный университет", 2016. - С. 231-233.

130. Полякова, А.А. К вопросу определения производительности шнекового смесителя обогатителя концентрированных кормов [Текст] / А.А. Полякова // Сборник научных статей «Проблемы развития современной науки» по материалам I Международной научно-практической конференции. Екатеринбург, 2016. - С. 57-58.

131. Полякова, А.А. Использование уравнения Фоккера-Планка для аналитического обоснования процесса смешивания в шнековом смесителе [Текст] / А.А. Полякова, Д.Е. Каширин, М.Ю. Костенко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2017.-№ 128.- С. 1061-1070.

132. Полякова, А.А. Обоснование параметров механического активатора смесителя [Текст] / А.А. Полякова, Д.Е. Каширин // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева, 2017. - № 1 (33). - С. 75-79.

133. Полякова, А.А. Снижение энергоемкости технологического процесса смесителя - обогатителя [Текст]/ Д.Е. Каширин, А.А. Полякова // Сельский механизатор. - 2018. - № 2. - С. 20-21.

134. Рошин П. М. Механизация в животноводстве [Текст] / Рошин П. М. - М.: Изд-во Агропромиздат, 1988.- С.- 284.

135. Сараев, И.Ф. К вопросу о разработке многокомпонентного дозатора [Текст] / И.Ф. Сараев, Н.В. Коняев // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2010. - Т. 3. (№ 3). - С. 77-79.

136. Сараев, И.Ф. Тарельчатый многокомпонентный дозатор [Текст] / И.Ф. Сараев, Н.В. Коняев // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2012. - Т. 1. (№ 1). - С. 119-122.

137. Сысоев, Д.П. Совершенствование технологий и технических средств кормоприготовления для животноводческих предприятий малых форм хозяйствования [Текст] / Д.П. Сысоев // Научное обеспечение агропромышленного комплекса сборник статей по материалам 72-й научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2016 г.. 2017. - С. 327-328.

138. Стукалин, Ф. Г. Исследование кормосмесителей непрерывного действия и методика их расчета [Текст] :автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Ф. Г. Стукалин. – Ленинград-Пушкин, 1965. – 21с.

139. Утолин, В.В. Результаты испытаний спирального смесителя [Текст] / В.В. Утолин, Е.Е. Гришков, Р.А. Воронков// Проблемы и перспективы инновационного развития агротехнологий Материалы XIX Международной научно-производственной конференции. ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2015. - С. 82-83.

140. Филатов, С.К. Исследование энергетики смешивания кормов в четырехшнековом раздатчике-смесителе [Текст] / С.К. Филатов // Совершенствование средств механизации и методов их использования в полеводстве: сборник научных трудов. - зерноград, 1982. - С. 120-126.

141. Филатов, С.К. К выбору схемы движения кормов в четырехшнековом раздатчике-смесителе [Текст] / С.К. Филатов // Проблемы комплексной механизации животноводства: сборник научных трудов. - зерноград, 1983. - С. 31-39.

142. Филатов, С.К. О применении смешивающе-выгрузного устройства на раздатчике смесителе кормов [Текст] / М.А. Тищенко, С.К. Филатов Проблемы комплексной механизации животноводства: сборник научных трудов. - зерноград, 1983. - С. 39-46.

142. Филатов, С.К. Математическое моделирование процесса смешивания кормов в четырехшнековом раздатчике-смесителе [Текст] / С.К. Филатов // Проблемы комплексной механизации производства, приготовления и раздачи кормов: сборник научных трудов. - зерноград, 1984. - С. 12-22.

144. Филатов, С.К. Результаты исследований раздатчика-смесителя с принудительно-гравитационным смешиванием кормов [Текст] / М.А. Тищенко, С.К. Филатов// Проблемы комплексной механизации производства, приготовления и раздачи кормов: сборник научных трудов. - зерноград, 1984. - С. 130-136.

145. Фролов, В.Ю. К анализу технологических и технических средств процесса приготовления высококачественных кормов [Текст] / В.Ю. Фролов, А.С. Сергунцев, Д.П. Сысоев// Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2014. №101. - С. 2108-2120.

146. Фролов, В.Ю. Совершенствование технологии раздачи кормовых смесей на малых фермах [Текст] / В.Ю. Фролов, Д.П. Сысоев // Международный научный журнал, 2015. №4. - С. 54-61.

147. Фролов, В.Ю. Очиститель корнеплодов шнекового типа [Текст] / В.Ю. Фролов, С.М. Сидоренко А.В. Бычков // Сельский механизатор, 2015. №2. - С. 28-29.

148. Фролов, В.Ю. Классификация технических средств для приготовления и раздачи кормовых смесей на малых фермах КРС [Текст] / В.Ю. Фролов, И.Е. Припоров, Д.П. Сысоев// Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2015. №114. - С. 510-522.

149. Фролов, В.Ю. К вопросу совершенствования работы кормораздатчиков с вертикальным шнековым рабочим органом [Текст] / В.Ю. Фролов, А.Х. Журтов, Д.П. Сысоев// Техника и оборудование для села, 2015. №4. - С. 40-42.

150. Фролов, В.Ю. К вопросу эффективности приготовления и раздачи кормов на предприятиях малых форм хозяйствования [Текст] / В.Ю. Фролов, И.Е. Припорнов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2016. №122. - С. 380-403.

151. Фролов, В.Ю. Машины и технологии в молочном животноводстве: Учебное пособие. Гриф УМО вузов РФ [Текст] / В.Ю. Фролов. - Санкт-Петербург: Изд-во Лань, 2017. – С. 316.

152. Франк Ф., Мизес Р. Дифференциальные и интегральные уравнения математической физики. Глава X-XI. Перевод с немецкого под общей редакцией Гуревича Л.Э. ОНТИ Главная редакция общетехнической литературы[Текст] / Л.Э. Гуревича. Л.: Изд-во Ленинград, Москва, 1937. - С998.

153. Хмыров, В.Д. Теоретическое обоснование конструкции игольчатого диска ворошителя - погрузчика подстилочного навоза[Текст] /В.Д. Хмыров, Б.С. Труфанов, В.Б. Куденко, А.А. Горелов// Вестник Мичуринского государственного аграрного университета,2015. №4. - С. 156-163.

154. Хмыров, В.Д. Пресс по изготовлению брикетов из подстилочного навоза для выращивания рассады [Текст] / В.Д. Хмыров, Т.В. Гребенникова // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства, 2015. №4 (20). - С. 153-155.

155. Хмыров, В.Д. Пресс – гранулятора подстилочного навоза[Текст] / В.Д. Хмыров, Б.С. Трифанов, Т.В.Гребенникова, А.В. Аксеновский// Вестник Мичуринского государственного аграрного университета,2015. №2. - С. 140-144.

156. Хмыров, В.Д. Исследование коэффициентов внутреннего и внешнего трения гранулированных органических удобрений из подстилочного овечьего навоза [Текст] / В.Д. Хмыров, Д.В. Гурьянов, Т.В. Гребенникова, П.Ю. Хатунцев// Вестник Мичуринского государственного аграрного университета,2017. №2. - С. 114-121.

157. Хмыров, В.Д. Результаты определения зависимости угла трения пчелиного сота по нержавеющей стали от температуры [Текст] / В.Д. Хмыров, Е.И. Буренина, В.В. Миронов, А.М. Афанасьев// Инновационная техника и технология, 2017. №1 (10). - С. 5-8.

158. Хмыров, В.Д. Исследование физико-механических свойств гранулированного органического удобрения из подстилочного овечьего навоза [Текст] / В.Д. Хмыров, Д.В. Гурьянов, Т.В. Гребенникова, П.Ю. Хатунцев// Вестник Мичуринского государственного аграрного университета, 2017. №1. - С. 145-149.

159. Хмыров, В.Д. Ворошитель - погрузчик обеззараживатель подстилочного навоза [Текст] / В.Д. Хмыров, Б.С. Трифанов, А.В. Щегольков, В.Б. Куденко// Инновации в АПК: Стимулы и барьеры: сборник статей, 2017. - С. 352-354.

160. Boxer R., Thaler A. A simplified method of solving linear and non-linear systems // Proc.IRE.-V.44.-№ 1.-P. 89-94.-Jan. 1956.

161. Oxley T.A. The effect of restricted air supply on some insects which infest grain Текст. / T.A. Oxley, G. Wickenden // Ann.Appl. Biol. 51, 313-324.- 1963.

162. Peterson A. Grain storage studies XXII. The influens of oxygen and carbon dioxide concentration on mould growth and grain deterioration Текст. / Peterson A., Schlegel V., Hummel B., Cyendel L., Cristynsen C.M., Geddes W.F. // Cereak Chem. 1,53. - 1956.

163. Celulolutive enzumu v krmnuch dovkach felat (Mjtucka J., holib K., Rutlon V., Podsednicer V., Stole L., Kejmar I. Sb.vss.Prase.-1986.-V.45.-p.199-208.

164. Lohnisky Y, Pinkas F. Moznosti pouziti konzerbobaneho vlhkeho obili pro vuro smesivy Текст. // Y. Lohnisky, F. Pinkas // Krmivarstvi. 1974. -r.10. - с 8-9. - s. 169-173.

165. Moglichkuten des Einsatres von Ensympraparaten zuz Verbesserecm des far wachsendes Qeflugel und Ferker/ Muller A., Jeroch N., Renisch F., Fbound M., Teirlucht.-1988.-43. № 2.- p.69-70.

166. Helbaek Hans. How farming began in the old world / Hans Helbaek // *Archaeology* 12, 1959.



ПРИЛОЖЕНИЯ

Результаты однофакторного эксперимента по определению влияния толщины слоя X (см) на усилие перемещения одного зерна Y<sub>1</sub> (Н) и трех зерен Y<sub>2</sub> (Н) ячмень по ячменю

Таблица -1 Данные эксперимента при усиллии по длине зерна

Фактор X (см)	Отклик Y <sub>1</sub> (Н)							Отклик Y <sub>2</sub> (Н)						
	повторности					Y <sub>1cp</sub>	σ <sup>2</sup>	повторности					Y <sub>2cp</sub>	σ <sup>2</sup>
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5		
5	1	1,2	0,9	1	0,7	0,96	0,033	1,4	1,8	2,3	2	2,5	2	0,185
10	2,2	1,9	1,9	2,4	1,8	2,04	0,063	2,5	2,6	3,3	3,3	3,7	3,08	0,262
15	2,3	2,8	3	2	2	2,42	0,212	3,7	3,9	3,8	4,1	3,2	3,74	0,113
25	5,1	3,8	3,8	3,5	3,7	3,98	0,407	6,2	5,7	5,3	5,5	5,9	5,72	0,122
35	4,4	3,8	3,7	3,5	3,3	3,74	0,173	6,1	7	5,5	4,8	5,1	5,7	0,765

Сумма построчных дисперсий = **0,888**

Сумма построчных дисперсий = **1,447**

G-критерий Кохрена (для Y<sub>1</sub>): G<sub>1</sub> = 0,4583 < 0,5441 = G<sub>0,95</sub>(4, 5). Условие выполняется. Дисперсии однородны.

G-критерий Кохрена (для Y<sub>2</sub>): G<sub>2</sub> = 0,5287 < 0,5441 = G<sub>0,95</sub>(4, 5). Условие выполняется. Дисперсии однородны.

Таблица -2 Данные эксперимента при усиллии по толщине зерна

Фактор X (см)	Отклик Y <sub>1</sub> (Н)							Отклик Y <sub>2</sub> (Н)						
	повторности					Y <sub>1cp</sub>	σ <sup>2</sup>	повторности					Y <sub>2cp</sub>	σ <sup>2</sup>
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5		
5	1,1	1,4	1,4	1	1,1	1,2	0,035	1,4	1,5	1,6	1,5	1,3	1,46	0,013
10	1,7	1,5	1,5	1,6	1,4	1,54	0,013	2	2,1	2	1,7	1,8	1,92	0,027
15	1,8	2,3	1,7	1,5	1,7	1,8	0,09	3,4	2,5	1,9	1,5	1,3	2,12	0,722
25	3,8	3,3	4,1	3,1	3,3	3,52	0,172	4,4	4,9	5	3,8	3,9	4,4	0,305
35	5,3	4,9	4,7	5,1	5	5	0,05	6,7	7,2	6,2	5,8	6,5	6,48	0,277

Сумма построчных дисперсий = **0,36**

Сумма построчных дисперсий = **1,344**

G-критерий Кохрена (для Y<sub>1</sub>): G<sub>1</sub> = 0,4778 < 0,5441 = G<sub>0,95</sub>(4, 5). Условие выполняется. Дисперсии однородны.

G-критерий Кохрена (для Y<sub>2</sub>): G<sub>2</sub> = 0,5372 < 0,5441 = G<sub>0,95</sub>(4, 5). Условие выполняется. Дисперсии однородны.

Результаты однофакторного эксперимента по определению влияния толщины слоя X (см) на усилие перемещения одного зерна  $Y_1$  (Н) и трех зерен  $Y_2$  (Н) пшеница по пшенице

Таблица -1 Данные эксперимента при усиллии по длине зерна

Фактор X (см)	Отклик $Y_1$ (Н)							Отклик $Y_2$ (Н)						
	повторности					$Y_{1cp}$	$\sigma^2$	повторности					$Y_{2cp}$	$\sigma^2$
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5		
5	1,7	1,8	1,8	1,6	1,5	1,68	0,017	2,3	2,1	2,1	1,9	2,1	2,1	0,02
10	3	2,8	2,9	2,5	2,7	2,78	0,037	4,8	4,1	4	4,2	4,2	4,26	0,098
15	3,3	3	3,2	2,8	3,1	3,08	0,037	5,7	6,2	6	6,2	6,5	6,12	0,087
25	4,6	5	4,8	3,8	4,1	4,46	0,248	8,4	9	8,9	8,3	8,6	8,64	0,093
35	5,9	5,5	6	5,1	5,3	5,56	0,148	9,3	8,9	9,6	9,1	8,5	9,08	0,172

Сумма построчных дисперсий = **0,487**Сумма построчных дисперсий = **0,47**G-критерий Кохрена (для  $Y_1$ ):  $G_1 = 0,5092 < 0,5441 = G_{0,95}(4, 5)$ . Условие выполняется. Дисперсии однородны.G-критерий Кохрена (для  $Y_2$ ):  $G_2 = 0,3660 < 0,5441 = G_{0,95}(4, 5)$ . Условие выполняется. Дисперсии однородны.

Таблица -2 Данные эксперимента при усиллии по толщине зерна

Фактор X (см)	Отклик $Y_1$ (Н)							Отклик $Y_2$ (Н)						
	повторности					$Y_{1cp}$	$\sigma^2$	повторности					$Y_{2cp}$	$\sigma^2$
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5		
5	1,4	1,3	1,6	1,1	1,3	1,34	0,033	1,9	1,9	1,5	1,3	1,2	1,56	0,108
10	2,4	2,2	2,7	2,3	2,3	2,38	0,037	3,7	3,8	3,6	2,8	2,5	3,28	0,347
15	2,6	2,7	2,5	2	2,2	2,4	0,085	5	4,9	4,3	3,9	3,8	4,38	0,307
25	4,1	3,8	3,6	4	4,1	3,92	0,047	5,2	5,2	5,5	4,9	5	5,16	0,053
35	5,3	4,2	4,6	5,1	5,3	4,9	0,235	6,2	5,8	5	6,1	5,7	5,76	0,223

Сумма построчных дисперсий = **0,437**Сумма построчных дисперсий = **1,038**G-критерий Кохрена (для  $Y_1$ ):  $G_1 = 0,5378 < 0,5441 = G_{0,95}(4, 5)$ . Условие выполняется. Дисперсии однородны.G-критерий Кохрена (для  $Y_2$ ):  $G_2 = 0,3343 < 0,5441 = G_{0,95}(4, 5)$ . Условие выполняется. Дисперсии однородны.

Результаты однофакторного эксперимента по определению влияния толщины слоя X (см) на усилие по длине зерна  $Y_1$  (Н) и по толщине зерна  $Y_2$  (Н) при перемещении трех зерен

Таблица -1 Данные эксперимента при перемещении пшеницы по ячменю

Фактор X (см)	Отклик $Y_1$ (Н)							Отклик $Y_2$ (Н)						
	повторности					$Y_{1cp}$	$\sigma^2$	повторности					$Y_{2cp}$	$\sigma^2$
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5		
5	2,3	2,6	2	1,9	1,7	2,1	0,125	1,8	1,7	1,4	1,4	1,5	1,56	0,033
10	4,1	3,8	3,5	2,6	2,8	3,36	0,413	2,9	3,7	2,3	2	2,4	2,66	0,443
15	4,8	5	3,9	3,7	4	4,28	0,337	4,2	4,2	2,7	2,5	2,8	3,28	0,717
25	6,6	6,8	5,2	5,5	5	5,82	0,682	5	5,2	5,2	4,5	4,9	4,96	0,083
35	5,3	4,2	5,7	6	5,8	5,4	0,515	4,8	4,2	5,5	5,1	4,7	4,86	0,233

Сумма построчных дисперсий = **2,072**

Сумма построчных дисперсий = **1,509**

G-критерий Кохрена (для  $Y_1$ ):  $G_1 = 0,3292 < 0,5441 = G_{0,95}(4, 5)$ . Условие выполняется. Дисперсии однородны.

G-критерий Кохрена (для  $Y_2$ ):  $G_2 = 0,4751 < 0,5441 = G_{0,95}(4, 5)$ . Условие выполняется. Дисперсии однородны.

Таблица -2 Данные эксперимента при перемещении ячменя по пшенице

Фактор X (см)	Отклик $Y_1$ (Н)							Отклик $Y_2$ (Н)						
	повторности					$Y_{1cp}$	$\sigma^2$	повторности					$Y_{2cp}$	$\sigma^2$
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5		
5	3,2	2,8	2,6	2,5	2	2,62	0,192	2,6	2,4	2,3	2,5	2	2,36	0,053
10	4,6	4,2	4,4	4	3,8	4,2	0,1	4,2	4,9	3,5	3,2	4	3,96	0,433
15	8,3	8,2	7,3	6,5	7,5	7,56	0,538	6	5,1	4,3	5,5	5,3	5,24	0,388
25	9,5	9,8	9	8,7	9	9,2	0,195	7,2	6,3	5	5,7	6,1	6,06	0,653
35	11,9	11,2	11,5	10,7	10,5	11,16	0,328	7,3	6,8	6,1	6,3	5,8	6,46	0,353

Сумма построчных дисперсий = **1,353**

Сумма построчных дисперсий = **1,88**

G-критерий Кохрена (для  $Y_1$ ):  $G_1 = 0,3976 < 0,5441 = G_{0,95}(4, 5)$ . Условие выполняется. Дисперсии однородны.

G-критерий Кохрена (для  $Y_2$ ):  $G_2 = 0,3473 < 0,5441 = G_{0,95}(4, 5)$ . Условие выполняется. Дисперсии однородны.

Регрессионный анализ результатов однофакторного эксперимента по определению влияния толщины слоя X (см) на усилие перемещения Y (Н) одного зерна ячмень по ячменю при усиллии по длине зерна (MathCAD 14.0, листинг -1)

Исходные данные

ORIGIN := 1

$$X := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 15 \\ 25 \\ 35 \end{pmatrix} \quad Y0 := \begin{pmatrix} 1 & 1.2 & 0.9 & 1 & 0.7 \\ 2.2 & 1.9 & 1.9 & 2.4 & 1.8 \\ 2.3 & 2.8 & 3 & 2 & 2 \\ 5.1 & 3.8 & 3.8 & 3.5 & 3.7 \\ 4.4 & 3.8 & 3.7 & 3.5 & 3.3 \end{pmatrix}$$

Число опытов:      Число повторностей:

$$N := \text{rows}(Y0) \quad m := \text{cols}(Y0)$$

$$N = 5 \quad m = 5$$

$$i := 1..N \quad j := 1..m$$

Средние значения отклика

$$Y_i := \text{mean}(\text{submatrix}(Y0, i, i, 1, m))$$

$$Y = \begin{pmatrix} 0.96 \\ 2.04 \\ 2.42 \\ 3.98 \\ 3.74 \end{pmatrix}$$

Приближение по логарифмической функции  $F(x) = a + b \ln(x)$

Коэффициенты регрессии

$$a := \text{intercept}(\ln(X), Y) = -1.601$$

$$b := \text{slope}(\ln(X), Y) = 1.579$$

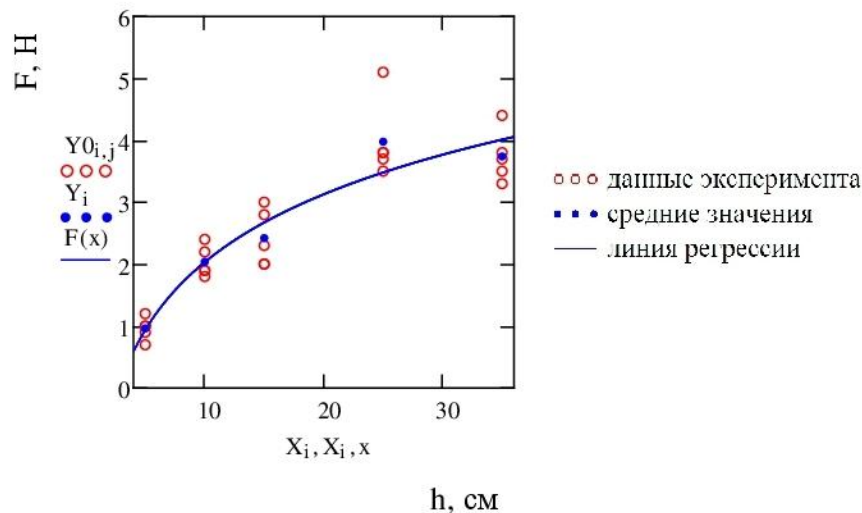
Уравнение регрессии

$$F(x) := a + b \cdot \ln(x)$$

Коэффициент детерминации

$$R2 := 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - F(X_i))^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \text{mean}(Y))^2} = 0.938$$

Построение графика функции  $F(x) \rightarrow 1.5787783876340527 \cdot \ln(x) - 1.6013253535602297$



Регрессионный анализ результатов однофакторного эксперимента по определению влияния толщины слоя X (см) на усилие перемещения Y (Н) трех зерен ячмень по ячменю при усиллии по длине зерна (MathCAD 14.0, листинг -2)

Исходные данные

ORIGIN := 1

$$X := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 15 \\ 25 \\ 35 \end{pmatrix} \quad Y0 := \begin{pmatrix} 1.4 & 1.8 & 2.3 & 2 & 2.5 \\ 2.5 & 2.6 & 3.3 & 3.3 & 3.7 \\ 3.7 & 3.9 & 3.8 & 4.1 & 3.2 \\ 6.2 & 5.7 & 5.3 & 5.5 & 5.9 \\ 6.1 & 7 & 5.5 & 4.8 & 5.1 \end{pmatrix}$$

Число опытов:

Число повторностей:

$N := \text{rows}(Y0)$

$m := \text{cols}(Y0)$

$N = 5$

$m = 5$

$i := 1..N$

$j := 1..m$

Средние значения отклика

$$Y_i := \text{mean}(\text{submatrix}(Y0, i, i, 1, m))$$

$$Y = \begin{pmatrix} 2 \\ 3.08 \\ 3.74 \\ 5.72 \\ 5.7 \end{pmatrix}$$

Приближение по логарифмической функции  $F(x) = a + b \ln(x)$

Коэффициенты регрессии

$$a := \text{intercept}(\ln(X), Y) = -1.543$$

$$b := \text{slope}(\ln(X), Y) = 2.087$$

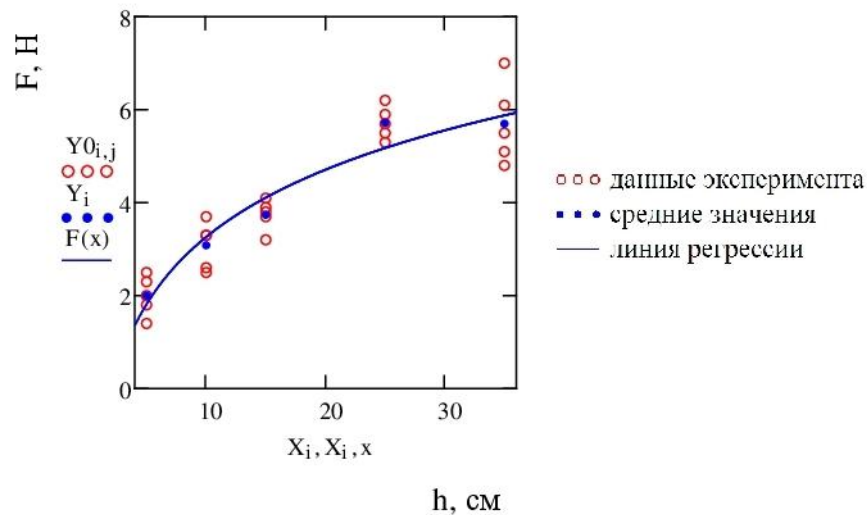
Уравнение регрессии

$$F(x) := a + b \cdot \ln(x)$$

Коэффициент детерминации

$$R2 := 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - F(X_i))^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \text{mean}(Y))^2} = 0.951$$

Построение графика функции  $F(x) \rightarrow 2.0871251286203978 \cdot \ln(x) - 1.5431148085547246$



Регрессионный анализ результатов однофакторного эксперимента по определению влияния толщины слоя  $X$  (см) на усилие перемещения  $Y$  (Н) одного зерна ячмень по ячменю при усиллии по толщине зерна (MathCAD 14.0, листинг -3)

Исходные данные

ORIGIN := 1

$$X := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 15 \\ 25 \\ 35 \end{pmatrix} \quad Y0 := \begin{pmatrix} 1.1 & 1.4 & 1.4 & 1 & 1.1 \\ 1.7 & 1.5 & 1.5 & 1.6 & 1.4 \\ 1.8 & 2.3 & 1.7 & 1.5 & 1.7 \\ 3.8 & 3.3 & 4.1 & 3.1 & 3.3 \\ 5.3 & 4.9 & 4.7 & 5.1 & 5 \end{pmatrix}$$

Число опытов:

Число повторностей:

$N := \text{rows}(Y0)$

$m := \text{cols}(Y0)$

$N = 5$

$m = 5$

$i := 1..N$

$j := 1..m$

Средние значения отклика

$$Y_i := \text{mean}(\text{submatrix}(Y0, i, i, 1, m))$$

$$Y = \begin{pmatrix} 1.2 \\ 1.54 \\ 1.8 \\ 3.52 \\ 5 \end{pmatrix}$$

Приближение по логарифмической функции  $F(x) = a + b \ln(x)$

Коэффициенты регрессии

$$a := \text{intercept}(\ln(X), Y) = -2.496$$

$$b := \text{slope}(\ln(X), Y) = 1.907$$

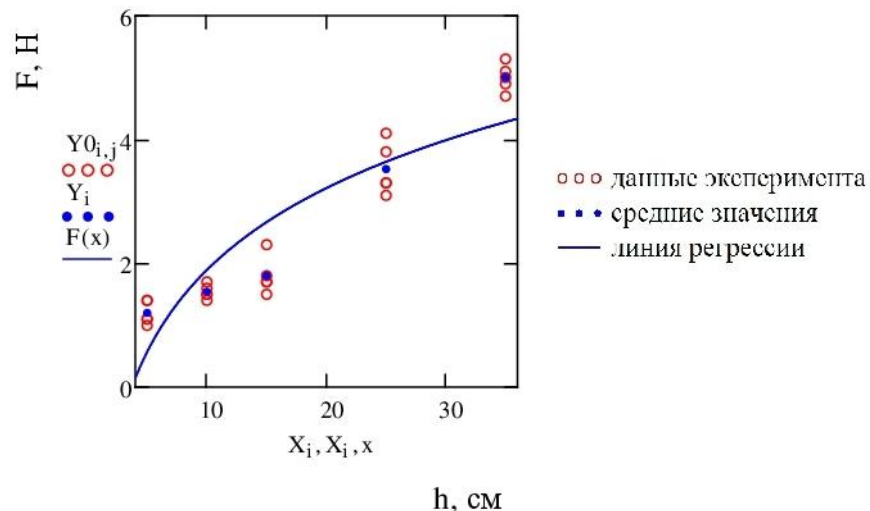
Уравнение регрессии

$$F(x) := a + b \cdot \ln(x)$$

Коэффициент детерминации

$$R2 := 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - F(X_i))^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \text{mean}(Y))^2} = 0.826$$

Построение графика функции  $F(x) \rightarrow 1.9067252236415626 \cdot \ln(x) - 2.4958488239916696$



Регрессионный анализ результатов однофакторного эксперимента по определению влияния толщины слоя X (см) на усилие перемещения Y (Н) трех зерен ячмень по ячменю при усиллии по толщине зерна (MathCAD 14.0, листинг -4)

Исходные данные

ORIGIN := 1

$$X := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 15 \\ 25 \\ 35 \end{pmatrix} \quad Y0 := \begin{pmatrix} 1.4 & 1.5 & 1.6 & 1.5 & 1.3 \\ 2 & 2.1 & 2 & 1.7 & 1.8 \\ 3.4 & 2.5 & 1.9 & 1.5 & 1.3 \\ 4.4 & 4.9 & 5 & 3.8 & 3.9 \\ 6.7 & 7.2 & 6.2 & 5.8 & 6.5 \end{pmatrix}$$

Число опытов:

Число повторностей:

$$N := \text{rows}(Y0)$$

$$m := \text{cols}(Y0)$$

$$N = 5$$

$$m = 5$$

$$i := 1..N$$

$$j := 1..m$$

Средние значения отклика

$$Y_i := \text{mean}(\text{submatrix}(Y0, i, i, 1, m))$$

$$Y = \begin{pmatrix} 1.46 \\ 1.92 \\ 2.12 \\ 4.4 \\ 6.48 \end{pmatrix}$$

Приближение по логарифмической функции  $F(x) = a + b \ln(x)$

Коэффициенты регрессии

$$a := \text{intercept}(\ln(X), Y) = -3.386$$

$$b := \text{slope}(\ln(X), Y) = 2.487$$

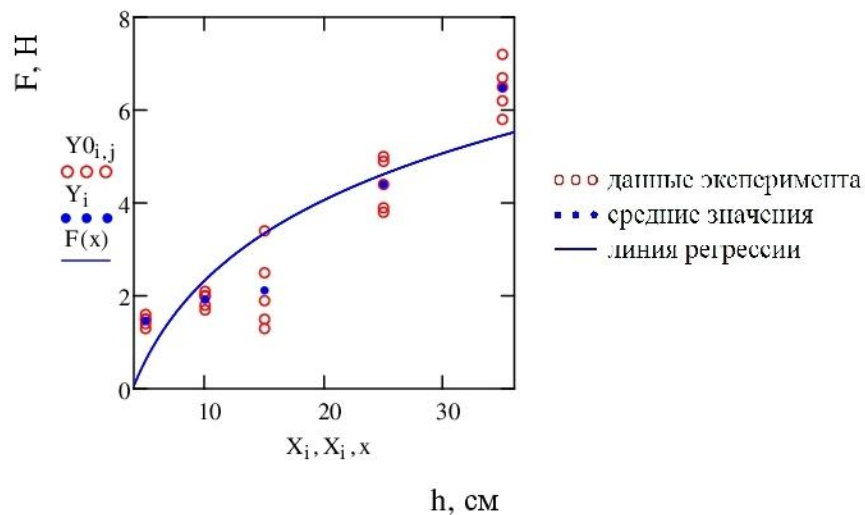
Уравнение регрессии

$$F(x) := a + b \cdot \ln(x)$$

Коэффициент детерминации

$$R2 := 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - F(X_i))^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \text{mean}(Y))^2} = 0.806$$

Построение графика функции  $F(x) \rightarrow 2.4867574703878668 \cdot \ln(x) - 3.3856736712667281$





Регрессионный анализ результатов однофакторного эксперимента по определению влияния толщины слоя X (см) на усилие перемещения Y (Н) одного зерна пшеницы по пшенице при усилии по длине зерна (MathCAD 14.0, листинг -5)

Исходные данные

ORIGIN := 1

$$X := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 15 \\ 25 \\ 35 \end{pmatrix} \quad Y0 := \begin{pmatrix} 1.7 & 1.8 & 1.8 & 1.6 & 1.5 \\ 3 & 2.8 & 2.9 & 2.5 & 2.7 \\ 3.3 & 3 & 3.2 & 2.8 & 3.1 \\ 4.6 & 5 & 4.8 & 3.8 & 4.1 \\ 5.9 & 5.5 & 6 & 5.1 & 5.3 \end{pmatrix}$$

Число опытов:      Число повторностей:

N := rows(Y0)      m := cols(Y0)

N = 5      m = 5

i := 1..N      j := 1..m

Средние значения отклика

$$Y_i := \text{mean}(\text{submatrix}(Y0, i, i, 1, m))$$

$$Y = \begin{pmatrix} 1.68 \\ 2.78 \\ 3.08 \\ 4.46 \\ 5.56 \end{pmatrix}$$

Приближение по логарифмической функции  $F(x) = a + b \ln(x)$

Коэффициенты регрессии

$$a := \text{intercept}(\ln(X), Y) = -1.66$$

$$b := \text{slope}(\ln(X), Y) = 1.931$$

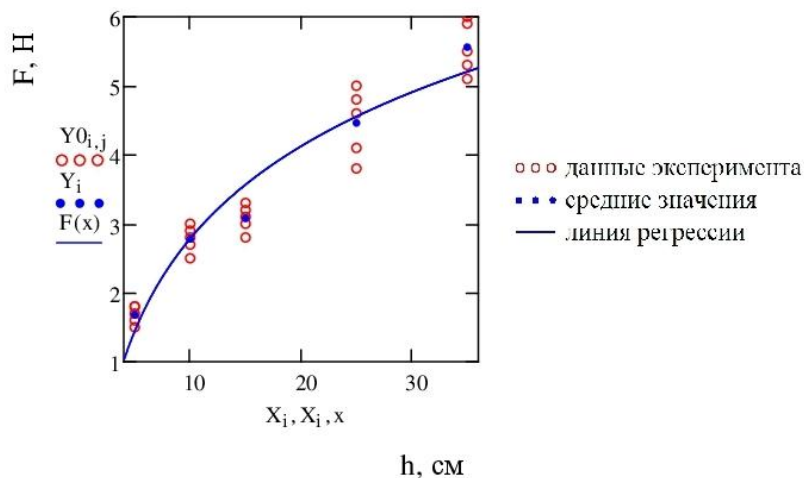
Уравнение регрессии

$$F(x) := a + b \cdot \ln(x)$$

Коэффициент детерминации

$$R2 := 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - F(X_i))^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \text{mean}(Y))^2} = 0.953$$

Построение графика функции  $F(x) \rightarrow 1.9305581489269923 \cdot \ln(x) - 1.6596938803647987$



Регрессионный анализ результатов однофакторного эксперимента по определению влияния толщины слоя  $X$  (см) на усилие перемещения  $Y$  (Н) трех зерен пшеница по пшенице при усиллии по длине зерна (MathCAD 14.0, листинг -6)

Исходные данные

ORIGIN := 1

$$X := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 15 \\ 25 \\ 35 \end{pmatrix} \quad Y0 := \begin{pmatrix} 2.3 & 2.1 & 2.1 & 1.9 & 2.1 \\ 4.8 & 4.1 & 4 & 4.2 & 4.2 \\ 5.7 & 6.2 & 6 & 6.2 & 6.5 \\ 8.4 & 9 & 8.9 & 8.3 & 8.6 \\ 9.3 & 8.9 & 9.6 & 9.1 & 8.5 \end{pmatrix}$$

Число опытов:

Число повторностей:

$N := \text{rows}(Y0)$

$m := \text{cols}(Y0)$

$N = 5$

$m = 5$

$i := 1..N$

$j := 1..m$

Средние значения отклика

$$Y_i := \text{mean}(\text{submatrix}(Y0, i, i, 1, m))$$

$$Y = \begin{pmatrix} 2.1 \\ 4.26 \\ 6.12 \\ 8.64 \\ 9.08 \end{pmatrix}$$

Приближение по логарифмической функции  $F(x) = a + b \ln(x)$

Коэффициенты регрессии

$$a := \text{intercept}(\ln(X), Y) = -4.185$$

$$b := \text{slope}(\ln(X), Y) = 3.817$$

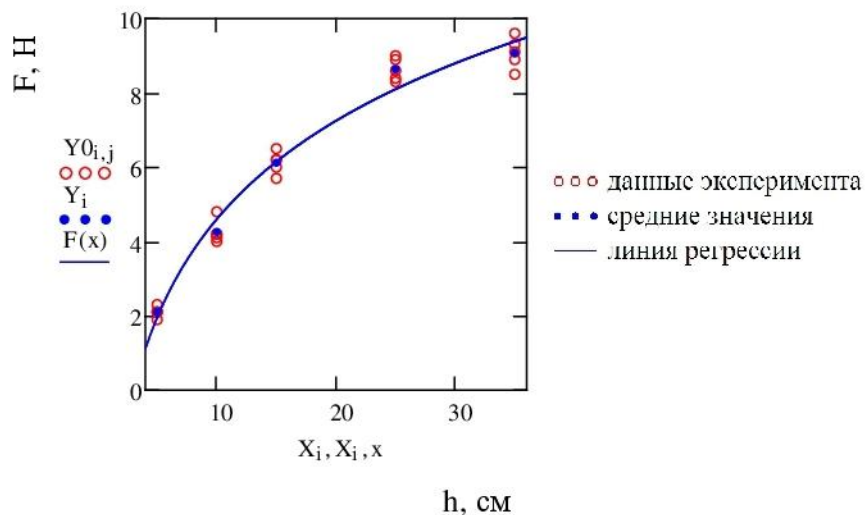
Уравнение регрессии

$$F(x) := a + b \cdot \ln(x)$$

Коэффициент детерминации

$$R2 := 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - F(X_i))^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \text{mean}(Y))^2} = 0.985$$

Построение графика функции  $F(x) \rightarrow 3.8168777278597115 \cdot \ln(x) - 4.1848788508360348$



Регрессионный анализ результатов однофакторного эксперимента по определению влияния толщины слоя X (см) на усилие перемещения Y (Н) одного зерна пшеницы по пшенице при усиллии по толщине зерна (MathCAD 14.0, листинг -7)

Исходные данные

ORIGIN := 1

$$X := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 15 \\ 25 \\ 35 \end{pmatrix} \quad Y0 := \begin{pmatrix} 1.4 & 1.3 & 1.6 & 1.1 & 1.3 \\ 2.4 & 2.2 & 2.7 & 2.3 & 2.3 \\ 2.6 & 2.7 & 2.5 & 2 & 2.2 \\ 4.1 & 3.8 & 3.6 & 4 & 4.1 \\ 5.3 & 4.2 & 4.6 & 5.1 & 5.3 \end{pmatrix}$$

Число опытов:

Число повторностей:

$N := \text{rows}(Y0)$

$m := \text{cols}(Y0)$

$N = 5$

$m = 5$

$i := 1..N$

$j := 1..m$

Средние значения отклика

$$Y_i := \text{mean}(\text{submatrix}(Y0, i, i, 1, m))$$

$$Y = \begin{pmatrix} 1.34 \\ 2.38 \\ 2.4 \\ 3.92 \\ 4.9 \end{pmatrix}$$

Приближение по логарифмической функции  $F(x) = a + b \ln(x)$

Коэффициенты регрессии

$$a := \text{intercept}(\ln(X), Y) = -1.755$$

$$b := \text{slope}(\ln(X), Y) = 1.77$$

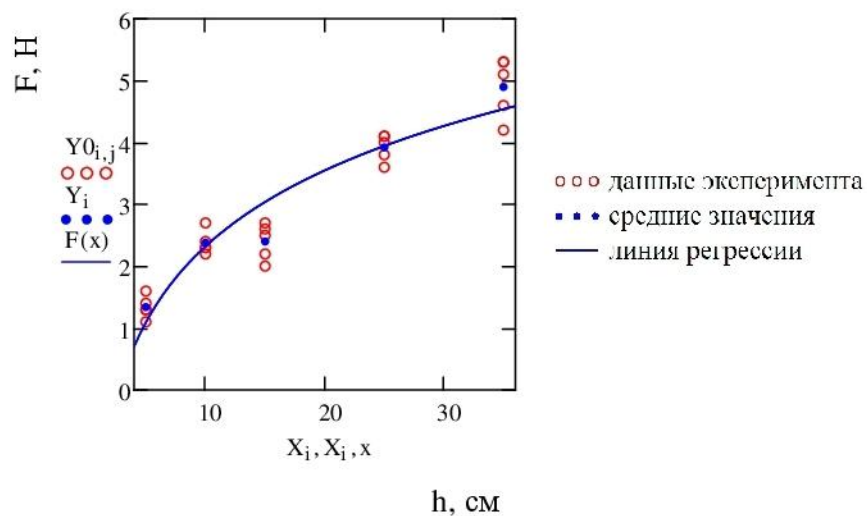
Уравнение регрессии

$$F(x) := a + b \cdot \ln(x)$$

Коэффициент детерминации

$$R2 := 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - F(X_i))^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \text{mean}(Y))^2} = 0.924$$

Построение графика функции  $F(x) \rightarrow 1.7703550107177277 \cdot \ln(x) - 1.7545321946872226$



Регрессионный анализ результатов однофакторного эксперимента по определению влияния толщины слоя  $X$  (см) на усилие перемещения  $Y$  (Н) трех зерен пшеница по пшенице при усиллии по толщине зерна (MathCAD 14.0, листинг -8)

Исходные данные

ORIGIN := 1

$$X := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 15 \\ 25 \\ 35 \end{pmatrix} \quad Y0 := \begin{pmatrix} 1.9 & 1.9 & 1.5 & 1.3 & 1.2 \\ 3.7 & 3.8 & 3.6 & 2.8 & 2.5 \\ 5 & 4.9 & 4.3 & 3.9 & 3.8 \\ 5.2 & 5.2 & 5.5 & 4.9 & 5 \\ 6.2 & 5.8 & 5 & 6.1 & 5.7 \end{pmatrix}$$

Число опытов:

Число повторностей:

$N := \text{rows}(Y0)$

$m := \text{cols}(Y0)$

$N = 5$

$m = 5$

$i := 1..N$

$j := 1..m$

Средние значения отклика

$$Y_i := \text{mean}(\text{submatrix}(Y0, i, i, 1, m))$$

$$Y = \begin{pmatrix} 1.56 \\ 3.28 \\ 4.38 \\ 5.16 \\ 5.76 \end{pmatrix}$$

Приближение по логарифмической функции  $F(x) = a + b \ln(x)$

Коэффициенты регрессии

$$a := \text{intercept}(\ln(X), Y) = -1.751$$

$$b := \text{slope}(\ln(X), Y) = 2.157$$

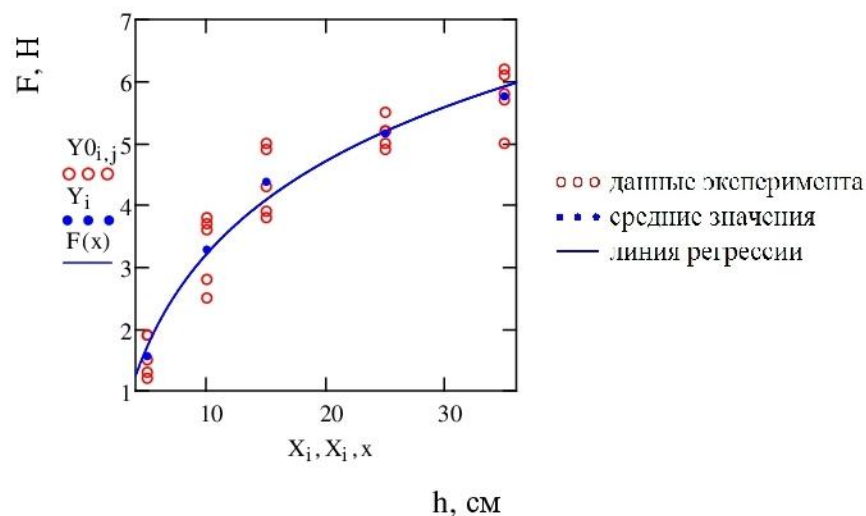
Уравнение регрессии

$$F(x) := a + b \cdot \ln(x)$$

Коэффициент детерминации

$$R2 := 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - F(X_i))^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \text{mean}(Y))^2} = 0.987$$

Построение графика функции  $F(x) \rightarrow 2.1570980808219486 \cdot \ln(x) - 1.7505625106055289$



Регрессионный анализ результатов однофакторного эксперимента по определению влияния толщины слоя X (см) на усилие перемещения Y (Н) трех зерен пшеница по ячменю при усиллии по длине зерна (MathCAD 14.0, листинг -9)

Исходные данные

ORIGIN := 1

$$X := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 15 \\ 25 \\ 35 \end{pmatrix} \quad Y0 := \begin{pmatrix} 2.3 & 2.6 & 2 & 1.9 & 1.7 \\ 4.1 & 3.8 & 3.5 & 2.6 & 2.8 \\ 4.8 & 5 & 3.9 & 3.7 & 4 \\ 6.6 & 6.8 & 5.2 & 5.5 & 5 \\ 5.3 & 4.2 & 5.7 & 6 & 5.8 \end{pmatrix}$$

Число опытов:

Число повторностей:

$N := \text{rows}(Y0)$

$m := \text{cols}(Y0)$

$N = 5$

$m = 5$

$i := 1..N$

$j := 1..m$

Средние значения отклика

$$Y_i := \text{mean}(\text{submatrix}(Y0, i, i, 1, m))$$

$$Y = \begin{pmatrix} 2.1 \\ 3.36 \\ 4.28 \\ 5.82 \\ 5.4 \end{pmatrix}$$

Приближение по логарифмической функции  $F(x) = a + b \ln(x)$

Коэффициенты регрессии

$$a := \text{intercept}(\ln(X), Y) = -0.936$$

$$b := \text{slope}(\ln(X), Y) = 1.914$$

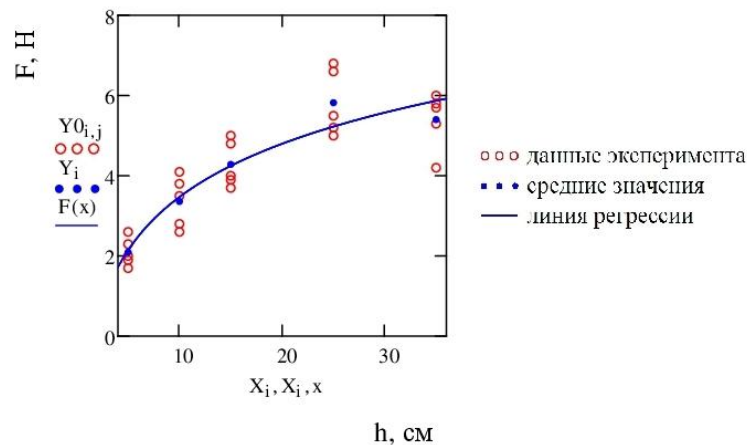
Уравнение регрессии

$$F(x) := a + b \cdot \ln(x)$$

Коэффициент детерминации

$$R2 := 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - F(X_i))^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \text{mean}(Y))^2} = 0.936$$

Построение графика функции  $F(x) \rightarrow 1.914281960878212 \cdot \ln(x) - 0.9360922607117832$



Регрессионный анализ результатов однофакторного эксперимента по определению влияния толщины слоя X (см) на усилие перемещения Y (Н) трех зерен пшеница по ячменю при усиллии по толщине зерна (MathCAD 14.0, листинг -10)

Исходные данные

ORIGIN := 1

$$X := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 15 \\ 25 \\ 35 \end{pmatrix} \quad Y0 := \begin{pmatrix} 1.8 & 1.7 & 1.4 & 1.4 & 1.5 \\ 2.9 & 3.7 & 2.3 & 2 & 2.4 \\ 4.2 & 4.2 & 2.7 & 2.5 & 2.8 \\ 5 & 5.2 & 5.2 & 4.5 & 4.9 \\ 4.8 & 4.2 & 5.5 & 5.1 & 4.7 \end{pmatrix}$$

Число опытов:  $N := \text{rows}(Y0)$       Число повторностей:  $m := \text{cols}(Y0)$   
 $N = 5$        $m = 5$   
 $i := 1..N$        $j := 1..m$

Средние значения отклика

$$Y_i := \text{mean}(\text{submatrix}(Y0, i, i, 1, m)) \quad Y = \begin{pmatrix} 1.56 \\ 2.66 \\ 3.28 \\ 4.96 \\ 4.86 \end{pmatrix}$$

Приближение по логарифмической функции  $F(x) = a + b \ln(x)$

Коэффициенты регрессии

$$a := \text{intercept}(\ln(X), Y) = -1.52$$

$$b := \text{slope}(\ln(X), Y) = 1.861$$

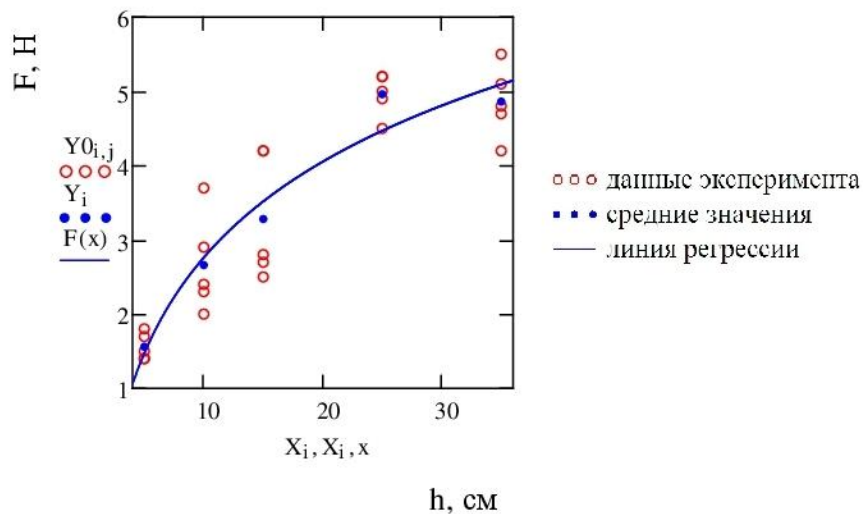
Уравнение регрессии

$$F(x) := a + b \cdot \ln(x)$$

Коэффициент детерминации

$$R2 := 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - F(X_i))^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \text{mean}(Y))^2} = 0.956$$

Построение графика функции  $F(x) \rightarrow 1.8605598930295404 \cdot \ln(x) - 1.5201783932699056$



Регрессионный анализ результатов однофакторного эксперимента по определению влияния толщины слоя X (см) на усилие перемещения Y (Н) трех зерен ячменя по пшенице при усиллии по длине зерна (MathCAD 14.0, листинг -11)

Исходные данные

ORIGIN := 1

$$X := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 15 \\ 25 \\ 35 \end{pmatrix} \quad Y0 := \begin{pmatrix} 3.2 & 2.8 & 2.6 & 2.5 & 2 \\ 4.6 & 4.2 & 4.4 & 4 & 3.8 \\ 8.3 & 8.2 & 7.3 & 6.5 & 7.5 \\ 9.5 & 9.8 & 9 & 8.7 & 9 \\ 11.9 & 11.2 & 11.5 & 10.7 & 10.5 \end{pmatrix}$$

Число опытов:  $N := \text{rows}(Y0)$   
 $N = 5$   
 $i := 1..N$

Число повторностей:  $m := \text{cols}(Y0)$   
 $m = 5$   
 $j := 1..m$

Средние значения отклика

$$Y_i := \text{mean}(\text{submatrix}(Y0, i, i, 1, m))$$

$$Y = \begin{pmatrix} 2.62 \\ 4.2 \\ 7.56 \\ 9.2 \\ 11.16 \end{pmatrix}$$

Приближение по логарифмической функции  $F(x) = a + b \ln(x)$

Коэффициенты регрессии

$$a := \text{intercept}(\ln(X), Y) = -5.143$$

$$b := \text{slope}(\ln(X), Y) = 4.513$$

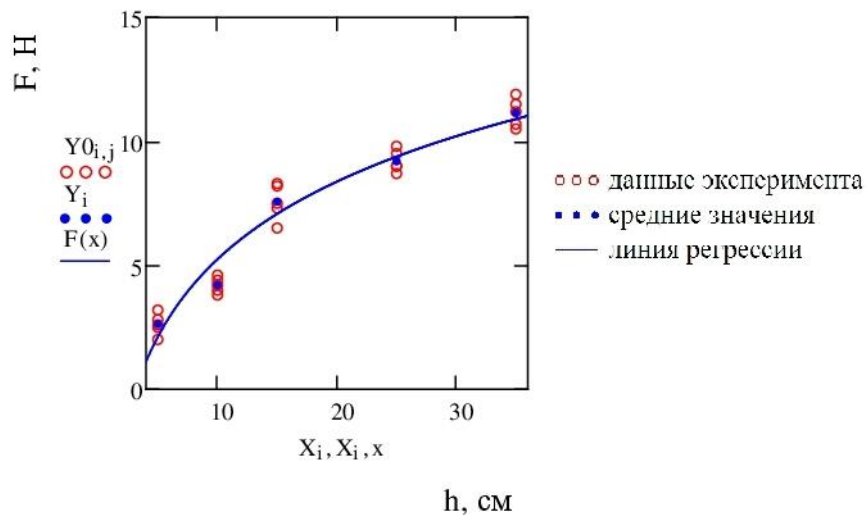
Уравнение регрессии

$$F(x) := a + b \cdot \ln(x)$$

Коэффициент детерминации

$$R2 := 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - F(X_i))^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \text{mean}(Y))^2} = 0.966$$

Построение графика функции  $F(x) \rightarrow 4.5134056741596318 \cdot \ln(x) - 5.1427793000840865$



Регрессионный анализ результатов однофакторного эксперимента по определению влияния толщины слоя  $X$  (см) на усилие перемещения  $Y$  (Н) трех зерен ячменя по пшенице при усиллии по толщине зерна (MathCAD 14.0, листинг -12)

Исходные данные

ORIGIN := 1

$$X := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 15 \\ 25 \\ 35 \end{pmatrix} \quad Y0 := \begin{pmatrix} 2.6 & 2.4 & 2.3 & 2.5 & 2 \\ 4.2 & 4.9 & 3.5 & 3.2 & 4 \\ 6 & 5.1 & 4.3 & 5.5 & 5.3 \\ 7.2 & 6.3 & 5 & 5.7 & 6.1 \\ 7.3 & 6.8 & 6.1 & 6.3 & 5.8 \end{pmatrix}$$

Число опыгов:

Число повторностей:

 $N := \text{rows}(Y0)$  $m := \text{cols}(Y0)$  $N = 5$  $m = 5$  $i := 1..N$  $j := 1..m$ 

Средние значения отклика

$$Y_i := \text{mean}(\text{submatrix}(Y0, i, i, 1, m))$$

$$Y = \begin{pmatrix} 2.36 \\ 3.96 \\ 5.24 \\ 6.06 \\ 6.46 \end{pmatrix}$$

Приближение по логарифмической функции  $F(x) = a + b \ln(x)$ 

Коэффициенты регрессии

$$a := \text{intercept}(\ln(X), Y) = -0.978$$

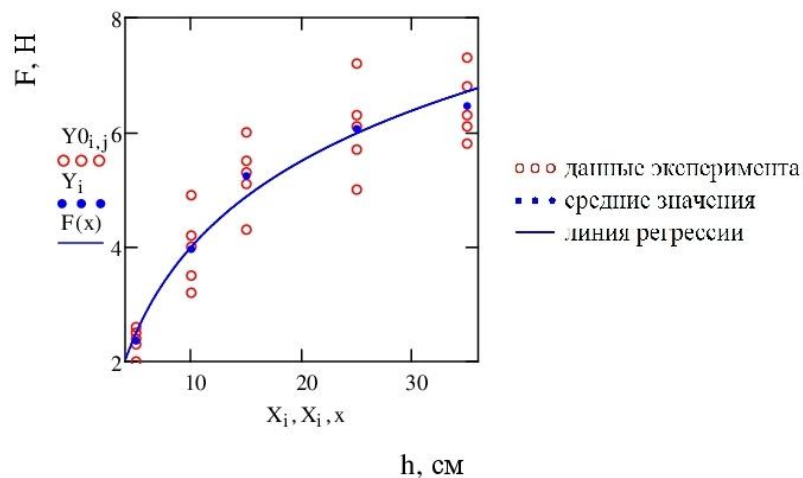
$$b := \text{slope}(\ln(X), Y) = 2.163$$

Уравнение регрессии

$$F(x) := a + b \cdot \ln(x)$$

Коэффициент детерминации

$$R2 := 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - F(X_i))^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \text{mean}(Y))^2} = 0.98$$

Построение графика функции  $F(x) \rightarrow 2.1627491645816783 \cdot \ln(x) - 0.97770096956045194$ 



## Приложение Б1

Результаты многофакторного эксперимента по определению влияния частоты вращения рабочего шнека ( $X1$ ), угла его наклона относительно вертикали выгрузной горловины ( $X2$ ) и степени раскрытия перепускного окна ( $X3$ ), находящегося в середине кожуха шнека, на производительность  $Q$ , кг/с и энергоёмкость  $E$ , кВт·ч/т процесса смешивания при демонтированном активаторе и проверка условия коэффициента вариации дисперсий по G-критерию Кохрена ( $\alpha = 0.05$ )

План (факторы)			Производительность $Q$ , кг/с (критерий оптимизации)					Измеренная полезная мощность $N$ , кВт			Энергоёмкость $E$ , кВт·ч/т (критерий оптимизации)				
			Повторности			Среднее	Дисп.	Повторности			Повторности			Среднее	Дисп.
X1	X2	X3	1	2	3			1	2	3	1	2	3		
1	1	0	0.342	0.339	0.351	0.344	0.000039	0.33	0.37	0.30	0.27	0.30	0.23	0.268	0.00109848
-1	1	0	0.126	0.125	0.118	0.123	0.000019	0.19	0.20	0.22	0.41	0.45	0.51	0.456	0.00240067
1	-1	0	0.057	0.074	0.067	0.066	0.000073	0.18	0.25	0.24	0.87	0.94	0.98	0.931	0.00328837
-1	-1	0	0.054	0.057	0.03	0.047	0.000219	0.34	0.37	0.19	1.77	1.79	1.74	1.767	0.00059819
1	0	1	0.2	0.198	0.178	0.192	0.000148	0.22	0.25	0.19	0.30	0.35	0.30	0.315	0.00089812
-1	0	1	0.063	0.064	0.068	0.065	0.000007	0.20	0.20	0.22	0.86	0.86	0.88	0.867	0.00014169
1	0	-1	0.197	0.198	0.175	0.190	0.000169	0.18	0.20	0.12	0.26	0.28	0.19	0.244	0.00213124
-1	0	-1	0.073	0.067	0.067	0.069	0.000012	0.21	0.19	0.18	0.79	0.79	0.76	0.781	0.00025448
0	1	1	0.185	0.188	0.188	0.187	0.000003	0.13	0.15	0.17	0.20	0.22	0.26	0.226	0.00087321
0	-1	1	0.028	0.033	0.02	0.027	0.000043	0.14	0.16	0.10	1.43	1.36	1.40	1.397	0.00123658
0	1	-1	0.213	0.2	0.169	0.194	0.000511	0.25	0.23	0.21	0.32	0.32	0.34	0.328	0.00020345
0	-1	-1	0.051	0.013	0.044	0.036	0.000409	0.23	0.05	0.18	1.24	1.13	1.16	1.175	0.00331631
0	0	0	0.129	0.118	0.119	0.122	0.000037	0.21	0.19	0.19	0.45	0.45	0.44	0.447	0.00003560
0	0	0	0.115	0.121	0.124	0.120	0.000021	0.20	0.22	0.17	0.48	0.50	0.38	0.452	0.00445072
0	0	0	0.114	0.124	0.125	0.121	0.000037	0.18	0.22	0.25	0.43	0.50	0.57	0.499	0.00461733
Сумма построчных дисперсий							<b>0.001747</b>	Сумма построчных дисперсий							<b>0.02554447</b>
Максимальная из построчных дисперсий							<b>0.000511</b>	Максимальная из построчных дисперсий							<b>0.00461733</b>
G-критерий Кохрена			соответствует					G-критерий Кохрена			соответствует				
$G_{0,05}(2,15) = 0.3346$			$G_1 = 0.29 < G_{таб} = 0.3346$					$G_{0,05}(2,15) = 0.3346$			$G_2 = 0.18 < G_{таб} = 0.3346$				

Регрессионный анализ результатов многофакторного эксперимента по определению влияния частоты вращения рабочего шнека ( $X1$ ), угла его наклона относительно вертикали выгрузной горловины ( $X2$ ) и степени раскрытия перепускного окна ( $X3$ ), находящегося в середине кожуха шнека, на производительность  $Q$ , кг/с процесса смешивания при демонтированном активаторе(листинг MathCAD 14.0)

**Исходные данные**

ORIGIN := 1

Матрица уровней варьирования факторов

$$F := \begin{pmatrix} 70 & 9 & 90 \\ 50 & 4.5 & 45 \\ 30 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$F1 := F^{(1)}$      $F2 := F^{(2)}$   
 $F3 := F^{(3)}$

Интервалы варьирования факторов

$$\Delta 1 := F1_1 - F1_2 \quad \Delta 2 := F2_1 - F2_2 \quad \Delta 3 := F3_1 - F3_2$$

$$\Delta 1 = 20 \quad \Delta 2 = 4.5 \quad \Delta 3 = 45$$

**План эксперимента**

$$X1 := \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad X2 := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad X3 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad Y0 := \begin{pmatrix} 0.342 & 0.339 & 0.351 \\ 0.126 & 0.125 & 0.118 \\ 0.057 & 0.074 & 0.067 \\ 0.054 & 0.057 & 0.03 \\ 0.2 & 0.198 & 0.178 \\ 0.063 & 0.064 & 0.068 \\ 0.197 & 0.198 & 0.175 \\ 0.073 & 0.067 & 0.067 \\ 0.185 & 0.188 & 0.188 \\ 0.028 & 0.033 & 0.02 \\ 0.213 & 0.2 & 0.169 \\ 0.051 & 0.013 & 0.044 \\ 0.129 & 0.118 & 0.119 \\ 0.115 & 0.121 & 0.124 \\ 0.114 & 0.124 & 0.125 \end{pmatrix}$$

Количество строк плана:

Количество повторностей опыта

$n := \text{rows}(X1) \quad n = 15$

$m := \text{cols}(Y0) \quad m = 3$

$i := 1..n$

Раскодирование факторов:

$x1_i := X1_i \cdot \Delta 1 + F1_2$   
 $X1 := x1$

$x2_i := X2_i \cdot \Delta 2 + F2_2$   
 $X2 := x2$

$x3_i := X3_i \cdot \Delta 3 + F3_2$   
 $X3 := x3$

Единичный вектор:

$$L_i := 1$$

Системная матрица:

$$X := \text{augment} \left[ L, X1, X2, X3, (X1 \cdot X2), (X1 \cdot X3), (X2 \cdot X3), (X1 \cdot X1), (X2 \cdot X2), (X3 \cdot X3) \right]$$

Количество оцениваемых параметров

$$k := \text{cols}(X) \quad k = 10 \quad j := 1..k$$

Средние значения откликов

$$Y_i := \text{mean}(\text{submatrix}(Y0, i, i, 1, m))$$

Y =

0.344
0.123
0.066
0.047
0.192
0.065
0.19
0.069
0.187
0.027
0.194
0.036
0.122
0.12
0.121

**МНК (метод наименьших квадратов)**

Дисперсионная матрица

$$C := (X^T \cdot X)^{-1}$$

Оценки коэффициентов регрессии

$$a := C \cdot X^T \cdot Y$$

a =

Оценки результатов

$$y := X \cdot a$$

	1
1	0.1385
2	-0.0048
3	-0.010833
4	0.000433
5	0.000561
6	0.000002
7	0.000002
8	0.000052
9	0.000148
10	-0.000006

**Определение ошибки оценивания (при условии адекватности модели)**

Суммы квадратов отклонений

$$Sd := \sum_{i=1}^n \left[ m \cdot (Y_i - y_i)^2 \right]$$

$$Se := \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Y0_{i,j} - Y_i)^2$$

Числа степеней свободы

$$\nu1 := n - k$$

$$\nu2 := n \cdot (m - 1)$$

Несмещённая оценка дисперсии ошибок наблюдений

$$s2 := \frac{Se}{m \cdot \nu2}$$

Ковариационная матрица ошибок оценок параметров регрессии

$$K := C \cdot s2$$

Уровень значимости  $\alpha := 0.1$ Критическое значение распределения Стьюдента с  $\nu2$  степенями свободы, соответствующее выбранному уровню значимости  $\alpha$ 

$$tkp := qt \left( 1 - \frac{\alpha}{2}, \nu2 \right)$$

Доверительные интервалы для оценок  $a_j$ 

$$\Delta_j := tkp \cdot \sqrt{K_{j,j}}$$

	1		1	"0" - коэффициент $a_j$ <u>статистически</u>
1	0.039		1	<u>незначим</u> с доверительной
2	$1.438 \cdot 10^{-3}$		1	вероятностью $1 - \alpha = 0.9$
3	$4.085 \cdot 10^{-3}$		1	
4	$4.085 \cdot 10^{-4}$		1	
5	$5.875 \cdot 10^{-5}$	$ a_j  > \Delta_j =$	0	"1" - коэффициент $a_j$ <u>статистически</u>
6	$5.875 \cdot 10^{-6}$		0	<u>значим</u> на уровне $\alpha = 0.1$
7	$2.611 \cdot 10^{-5}$		1	
8	$1.376 \cdot 10^{-5}$		0	
9	$2.718 \cdot 10^{-4}$		1	
10	$2.718 \cdot 10^{-6}$		0	
			1	

**Проверка адекватности модели**

$n > k = 1$  - условие применимости метода ("1" - истина; "0" - ложь)

Уровень значимости  $\alpha := 0.01$

$F_{кр} := \text{root}(\text{pF}(x, \nu_1, \nu_2) - 1 + \alpha, x, 0, 10)$   $F_{кр} = 3.699$

$F := \frac{Sd \cdot \nu_2}{Se \cdot \nu_1}$   $F = 1.012$

$F < F_{кр} = 1$  ("1" - модель адекватна; "0" - модель не адекватна)

**Исключение из модели незначимых коэффициентов (при условии адекватности модели)**

Новая системная матрица:

$X := \text{augment}[L, X1, X2, X3, \overrightarrow{(X1-X2)}, \overrightarrow{(X1-X1)}, \overrightarrow{(X3-X3)}]$

Количество оцениваемых параметров

$k := \text{cols}(X)$   $k = 7$   $j := 1..k$

**МНК (метод наименьших квадратов)**

Дисперсионная матрица  $C := (X^T \cdot X)^{-1}$

Оценки коэффициентов регрессии  $a := C \cdot X^T \cdot Y$   $a =$

Оценки результатов  $y := X \cdot a$

$\begin{pmatrix} 0.131423 \\ -0.004667 \\ -0.009389 \\ 0.000538 \\ 0.000561 \\ 0.000052 \\ -0.000007 \end{pmatrix}$

**Определение ошибки оценивания  
(при условии адекватности модели)**

Суммы квадратов отклонений

$$Sd := \sum_{i=1}^n \left[ m \cdot (Y_i - y_i)^2 \right]$$

$$Se := \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Y_{0,i,j} - Y_i)^2$$

Числа степеней свободы

$$\nu 1 := n - k$$

$$\nu 2 := n \cdot (m - 1)$$

Несмещённая оценка дисперсии ошибок наблюдений

$$s2 := \frac{Se}{m \cdot \nu 2}$$

Ковариационная матрица ошибок оценок параметров регрессии

$$K := C \cdot s2$$

Уровень значимости  $\alpha := 0.1$

Критическое значение распределения Стьюдента с  $\nu 2$  степенями свободы, соответствующее выбранному уровню значимости  $\alpha$

$$t_{кр} := qt\left(1 - \frac{\alpha}{2}, \nu 2\right) \quad \Delta := 0$$

Доверительные интервалы для оценок  $a_j$

$$\Delta_j := t_{кр} \cdot \sqrt{K_{j,j}}$$

$$\Delta = \begin{pmatrix} 0.036 \\ 1.409 \times 10^{-3} \\ 3.053 \times 10^{-3} \\ 2.576 \times 10^{-4} \\ 5.875 \times 10^{-5} \\ 1.372 \times 10^{-5} \\ 2.71 \times 10^{-6} \end{pmatrix} \quad |a_j| > \Delta_j = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

"0" - коэффициент  $a_j$  статистически незначим с доверительной вероятностью

"1" - коэффициент  $a_j$  статистически значим на уровне

**Проверка адекватности модели**

$n > k = 1$  - условие применимости метода: "1" - метод применим;  
"0" - метод не применим  
Уровень значимости  $\alpha := 0.01$

$$F_{кр} := root(pF(x, \nu 1, \nu 2) - 1 + \alpha, x, 0, 10) \quad F_{кр} = 3.173$$

$$F := \frac{Sd \cdot \nu 2}{Se \cdot \nu 1} \quad F = 0.772$$

$F < F_{кр} = 1$  ("1" - модель адекватна; "0" - модель не адекватна)

**Регрессионная модель**

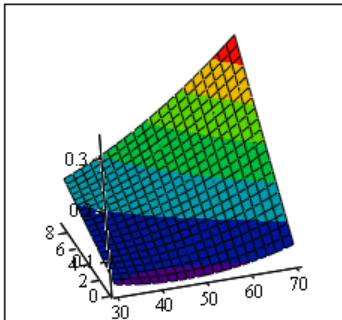
$$Z(x_1, x_2, x_3) := a_1 + a_2 \cdot x_1 + a_3 \cdot x_2 + a_4 \cdot x_3 + a_5 \cdot x_1 \cdot x_2 + a_6 \cdot x_1^2 + a_7 \cdot x_3^2$$

**Оптимизация результатов**

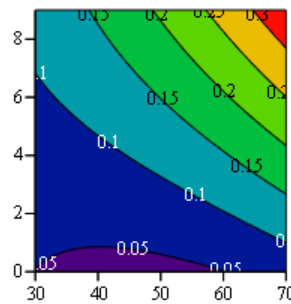
	$x_1 := 50$	$x_2 := 5$	$x_3 := 50$
Given	$30 < x_1 < 70$	$0 < x_2 < 9$	$0 < x_3 < 90$

$$M := \text{Maximize}(Z, x_1, x_2, x_3) = \begin{pmatrix} 70 \\ 9 \\ 41.174 \end{pmatrix} \quad + \quad Z(M_1, M_2, M_3) = 0.339$$

$$Z1(x_1, x_2) := Z(x_1, x_2, M_3)$$

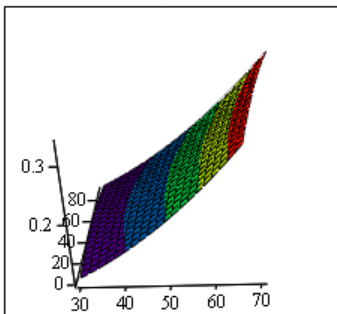


Z1

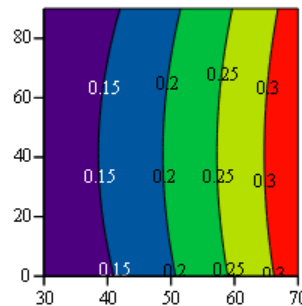


Z1

$$Z2(x_1, x_3) := Z(x_1, M_2, x_3)$$

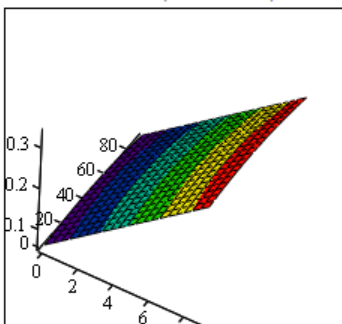


Z2

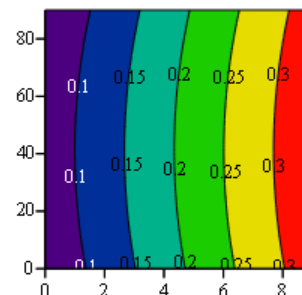


Z2

$$Z3(x_2, x_3) := Z(M_1, x_2, x_3)$$



Z3



Z3

Регрессионный анализ результатов многофакторного эксперимента по определению влияния частоты вращения рабочего шнека ( $X1$ ), угла его наклона относительно вертикали выгрузной горловины ( $X2$ ) и степени раскрытия перепускного окна ( $X3$ ), находящегося в середине кожуха шнека, на энергоемкость  $E$ , кВт·ч/т процесса смешивания при демонтированном активаторе(листинг MathCAD 14.0)

Исходные данные

ORIGIN := 1

Матрица уровней варьирования факторов

$$F := \begin{pmatrix} 70 & 9 & 90 \\ 50 & 4.5 & 45 \\ 30 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$F1 := F^{(1)}$     $F2 := F^{(2)}$   
 $F3 := F^{(3)}$

Интервалы варьирования факторов

$$\Delta 1 := F1_1 - F1_2 \quad \Delta 2 := F2_1 - F2_2 \quad \Delta 3 := F3_1 - F3_2$$

$$\Delta 1 = 20 \quad \Delta 2 = 4.5 \quad \Delta 3 = 45$$

План эксперимента

$X1 :=$	$X2 :=$	$X3 :=$	$Y0 :=$
$\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.27 & 0.3 & 0.234 \\ 0.41 & 0.45 & 0.507 \\ 0.87 & 0.94 & 0.984 \\ 1.77 & 1.79 & 1.741 \\ 0.3 & 0.35 & 0.296 \\ 0.86 & 0.86 & 0.881 \\ 0.26 & 0.28 & 0.192 \\ 0.79 & 0.79 & 0.762 \\ 0.2 & 0.22 & 0.258 \\ 1.43 & 1.36 & 1.401 \\ 0.32 & 0.32 & 0.345 \\ 1.24 & 1.13 & 1.155 \\ 0.45 & 0.45 & 0.44 \\ 0.48 & 0.5 & 0.376 \\ 0.43 & 0.5 & 0.566 \end{pmatrix}$

Количество строк плана:

Количество повторностей опыта

 $n := \text{rows}(X1) \quad n = 15$  $m := \text{cols}(Y0) \quad m = 3$  $i := 1..n$ 

Раскодирование факторов:

 $x1_i := X1_i \cdot \Delta 1 + F1_2$   
 $X1 := x1$  $x2_i := X2_i \cdot \Delta 2 + F2_2$   
 $X2 := x2$  $x3_i := X3_i \cdot \Delta 3 + F3_2$   
 $X3 := x3$

Единичный вектор:

$$L_i := 1$$

Системная матрица:

$$X := \text{augment}\left[L, X1, X2, X3, (X1-X2), (X1-X3), (X2-X3), (X1 \cdot X1), (X2 \cdot X2), (X3 \cdot X3)\right]$$

Количество оцениваемых параметров

$$k := \text{cols}(X) \quad k = 10 \quad j := 1..k$$

Средние значения откликов

$$Y_i := \text{mean}(\text{submatrix}(Y0, i, i, 1, m))$$

Y =

0.27
0.46
0.93
1.77
0.32
0.87
0.24
0.78
0.23
1.4
0.33
1.18
0.45
0.45
0.5

**МНК (метод наименьших квадратов)**

Дисперсионная матрица

$$C := (X^T \cdot X)^{-1}$$

Оценки коэффициентов регрессии

$$a := C \cdot X^T \cdot Y \quad a =$$

Оценки результатов

$$y := X \cdot a$$

	1
1	2.720049
2	-0.041097
3	-0.320559
4	0.002513
5	0.0018
6	-0.000004
7	-0.0004
8	0.0002
9	0.015298
10	0.000003

**Определение ошибки оценивания (при условии адекватности модели)**

Суммы квадратов отклонений

$$Sd := \sum_{i=1}^n \left[ m \cdot (Y_i - y_i)^2 \right]$$

$$Se := \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Y0_{i,j} - Y_i)^2$$

Числа степеней свободы

$$\nu1 := n - k$$

$$\nu2 := n \cdot (m - 1)$$

Несмещённая оценка дисперсии ошибок наблюдений

$$s2 := \frac{Se}{m \cdot \nu2}$$

Ковариационная матрица ошибок оценок параметров регрессии

$$K := C \cdot s2$$

Уровень значимости  $\alpha := 0.1$ Критическое значение распределения Стьюдента с  $\nu2$  степенями свободы, соответствующее выбранному уровню значимости  $\alpha$ 

$$tkp := qt\left(1 - \frac{\alpha}{2}, \nu2\right)$$

Доверительные интервалы для оценок  $a_j$ 

$$\Delta_j := tkp \cdot \sqrt{K_{j,j}}$$



	1	
1	0.15	$ a_j  > \Delta_j = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
2	$5.499 \cdot 10^{-3}$	
3	0.016	
4	$1.562 \cdot 10^{-3}$	
5	$2.247 \cdot 10^{-4}$	
6	$2.247 \cdot 10^{-5}$	
7	$9.986 \cdot 10^{-5}$	
8	$5.262 \cdot 10^{-5}$	
9	$1.039 \cdot 10^{-3}$	
10	$1.039 \cdot 10^{-5}$	

"0" - коэффициент  $a_j$  статистически незначим с доверительной вероятностью  $1 - \alpha = 0.9$   
 "1" - коэффициент  $a_j$  статистически значим на уровне  $\alpha = 0.1$

### Проверка адекватности модели

$n > k = 1$  - условие применимости метода ("1" - истина; "0" - ложь)

Уровень значимости  $\alpha := 0.01$

$F_{кр} := \text{root}(pF(x, \nu1, \nu2) - 1 + \alpha, x, 0, 10)$   $F_{кр} = 3.699$

$F := \frac{Sd \cdot \nu2}{Se \cdot \nu1}$   $F = 0.908$

$F < F_{кр} = 1$  ("1" - модель адекватна; "0" - модель не адекватна)

### Исключение из модели незначимых коэффициентов (при условии адекватности модели)

Новая системная матрица:

$X := \text{augment}[L, X1, X2, X3, (X1 \cdot X2), (X2 \cdot X3), (X1 \cdot X1), (X2 \cdot X2)]$

Количество оцениваемых параметров

$k := \text{cols}(X)$   $k = 8$   $j := 1..k$

### МНК (метод наименьших квадратов)

Дисперсионная матрица

$C := (X^T \cdot X)^{-1}$

$\begin{pmatrix} 2.723744 \\ -0.041168 \\ -0.320353 \\ 0.002572 \\ 0.0018 \\ -0.0004 \\ 0.000199 \\ 0.015275 \end{pmatrix}$

Оценки коэффициентов регрессии

$a := C \cdot X^T \cdot Y$

$a =$

Оценки результатов

$y := X \cdot a$

**Определение ошибки оценивания  
(при условии адекватности модели)**

Суммы квадратов отклонений

$$Sd := \sum_{i=1}^n \left[ m \cdot (Y_i - y_i)^2 \right]$$

$$Se := \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Y_{0,i,j} - Y_i)^2$$

Числа степеней свободы

$$\nu 1 := n - k$$

$$\nu 2 := n \cdot (m - 1)$$

Несмещённая оценка дисперсии ошибок наблюдений

$$s2 := \frac{Se}{m \cdot \nu 2}$$

Ковариационная матрица ошибок оценок параметров регрессии

$$K := C \cdot s2$$

Уровень значимости  $\alpha := 0.1$

Критическое значение распределения Стьюдента с  $\nu 2$  степенями свободы, соответствующее выбранному уровню значимости  $\alpha$

$$t_{кр} := qt\left(1 - \frac{\alpha}{2}, \nu 2\right) \quad \Delta := 0$$

Доверительные интервалы для оценок  $a_j$

$$\Delta_j := t_{кр} \cdot \sqrt{K_{j,j}}$$

$$\Delta = \begin{pmatrix} 0.139 \\ 5.39 \times 10^{-3} \\ 0.016 \\ 5.504 \times 10^{-4} \\ 2.247 \times 10^{-4} \\ 9.986 \times 10^{-5} \\ 5.246 \times 10^{-5} \\ 1.036 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \quad |a_j| > \Delta_j = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

"0" - коэффициент  $a_j$  статистически незначим с доверительной вероятностью

"1" - коэффициент  $a_j$  статистически значим на уровне

**Проверка адекватности модели**

$n > k = 1$  - условие применимости метода: "1" - метод применим;

Уровень значимости  $\alpha := 0.01$

"0" - метод не применим

$$F_{кр} := \text{root}(pF(x, \nu 1, \nu 2) - 1 + \alpha, x, 0, 10)$$

$$F_{кр} = 3.304$$

$$F := \frac{Sd \cdot \nu 2}{Se \cdot \nu 1}$$

$$F = 0.696$$

$F < F_{кр} = 1$  ("1" - модель адекватна; "0" - модель не адекватна)

**Регрессионная модель**

$$Z(x_1, x_2, x_3) := a_1 + a_2 \cdot x_1 + a_3 \cdot x_2 + a_4 \cdot x_3 + a_5 \cdot x_1 \cdot x_2 + a_6 \cdot x_2 \cdot x_3 + a_7 \cdot x_1^2 + a_8 \cdot x_2^2$$

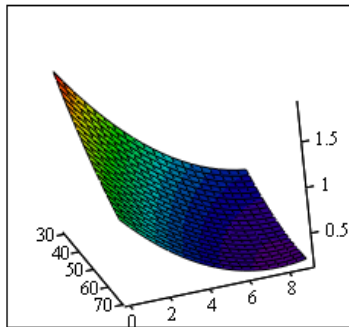
**Оптимизация результатов**

+

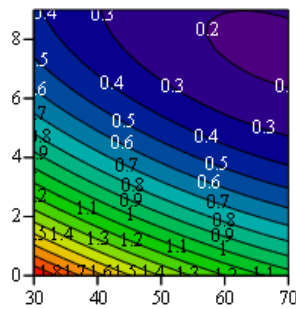
	$x_1 := 50$	$x_2 := 5$	$x_3 := 50$
Given	$30 < x_1 < 70$	$0 < x_2 < 9$	$0 < x_3 < 90$

$$M := \text{Minimize}(Z, x_1, x_2, x_3) = \begin{pmatrix} 70 \\ 7.542 \\ 90 \end{pmatrix} \quad Z(M_1, M_2, M_3) = 0.178$$

$$Z1(x_1, x_2) := Z(x_1, x_2, M_3)$$

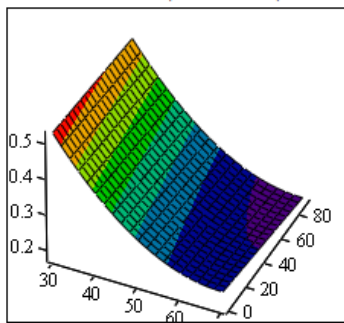


Z1

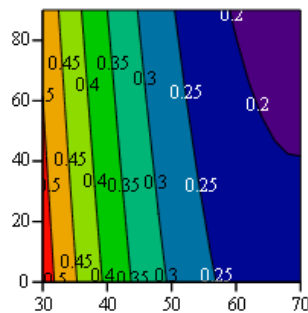


Z1

$$Z2(x_1, x_3) := Z(x_1, M_2, x_3)$$

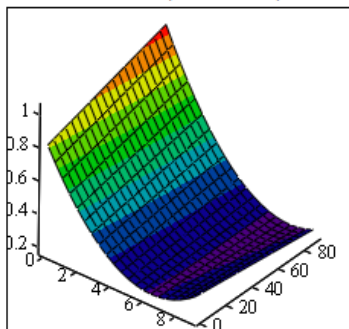


Z2

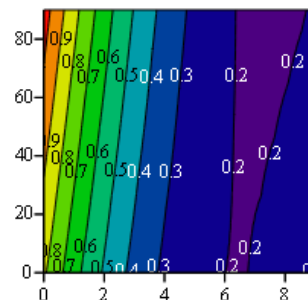


Z2

$$Z3(x_2, x_3) := Z(M_1, x_2, x_3)$$



Z3



Z3

Результаты однофакторного эксперимента по определению влияния времени рабочего процесса  $t$ , мин на качество смешивания  $\lambda$ , % и проверка условия коэффициента вариации дисперсий по G-критерию Кохрена ( $\alpha = 0.05$ )

Таблица 1 – План и результаты эксперимента без использования активатора

Время рабочего цикла $t$ , мин. (фактор)	Степень коэффициента вариации $\lambda$ , % (отклик)				
	Повторности			Среднее	Дисп.
	1	2	3		
1	44.1	51.1	35.3	43.5	62.90192
4	45.3	38.1	56.7	46.7	87.82867
7	74.8	74.9	80.7	76.8	11.2364
10	86.3	87.1	87.6	87	0.477777
13	88.4	88.7	90.5	89.2	1.324197
16	91.7	91.2	89.8	90.9	0.911583
19	91.7	89.5	92.2	91.1	2.064699

Сумма построчных дисперсий 166.7452

Максимальная из построчных дисперсий 87.82867

G-критерий Кохрена соответствует

$G_{0,05}(2,7) = 0.5612$	$G_1 = 0.53$	<	$G_{таб} = 0.5612$
--------------------------	--------------	---	--------------------

Таблица 2 – План и результаты эксперимента при использовании активатора

Время рабочего цикла $t$ , мин. (фактор)	Степень коэффициента вариации $\lambda$ , % (отклик)				
	Повторности			Среднее	Дисп.
	1	2	3		
1	54.1	53.1	61.1	56.1	19.04641
2	69.8	67.8	77.8	71.8	28.43573
3	73.9	76.4	78.6	76.3	5.539492
4	90.7	91.7	90.3	90.9	0.514033
5	96.6	94.6	89.3	93.5	14.46514
6	92.4	92.2	88.4	91	5.124477
7	97.0	96.7	93.5	95.7	3.816169

Сумма построчных дисперсий 76.94144

Максимальная из построчных дисперсий 28.43573

G-критерий Кохрена соответствует

$G_{0,05}(2,7) = 0.5612$	$G_1 = 0.37$	<	$G_{таб} = 0.5612$
--------------------------	--------------	---	--------------------

Регрессионный анализ результатов однофакторного эксперимента по определению влияния времени рабочего процесса  $t$ , мин на качество смешивания  $\lambda$ , % без использования активатора (листинг Mathcad 14.0)

Исходные данные

ORIGIN := 1

$$X := \begin{pmatrix} 1 \\ 4 \\ 7 \\ 10 \\ 13 \\ 16 \\ 19 \end{pmatrix} \quad Y0 := \begin{pmatrix} 44.14 & 51.09 & 35.27 \\ 45.34 & 38.08 & 56.68 \\ 74.8 & 74.93 & 80.67 \\ 86.27 & 87.09 & 87.64 \\ 88.36 & 88.73 & 90.51 \\ 91.66 & 91.21 & 89.83 \\ 91.67 & 89.47 & 92.16 \end{pmatrix}$$

Число опытов:

Число повторностей:

$$N := \text{rows}(Y0)$$

$$m := \text{cols}(Y0)$$

$$N = 7$$

$$m = 3$$

$$i := 1..N$$

$$j := 1..m$$

Средние значения отклика

$$Y_i := \text{mean}(\text{submatrix}(Y0, i, i, 1, m))$$

$$Y = \begin{pmatrix} 43.5 \\ 46.7 \\ 76.8 \\ 87 \\ 89.2 \\ 90.9 \\ 91.1 \end{pmatrix}$$

Квадратичное приближение  $F(x) = a_1 + a_2 x + a_3 x^2$ 

$$1_i := 1 \quad XX := \text{augment}\left[1, X, \begin{pmatrix} \overrightarrow{X \cdot X} \end{pmatrix}\right]$$

$$\text{МНК: } a := (XX^T \cdot XX)^{-1} \cdot XX^T \cdot Y$$

Коэффициенты регрессии

$$a = \begin{pmatrix} 31.383069 \\ 7.47672 \\ -0.228836 \end{pmatrix}$$

Уравнение регрессии

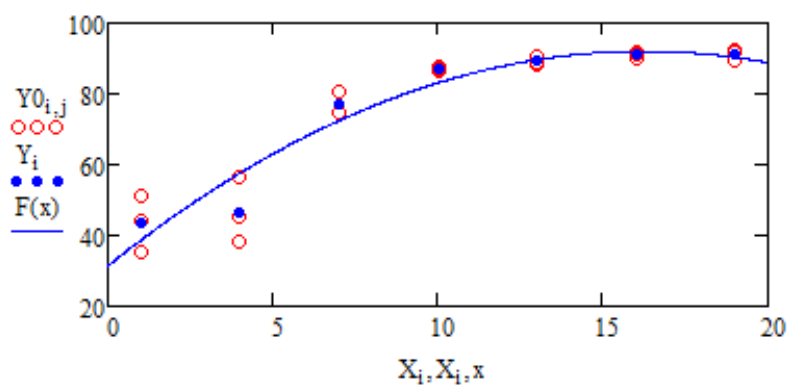
$$F(x) := a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot x^2$$

Коэффициент детерминации

$$R2 := 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - F(X_i))^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \text{mean}(Y))^2} = 0.933$$

Построение графика функции

$$F(x) := 31.38 + 7.47 \cdot x - 0.23 \cdot x^2$$



Результаты многофакторного эксперимента по определению влияния угла раскрытия лопастей механического активатора  $x_1$ , град., угла поворота механического активатора относительно оси рабочего вала  $x_2$ , град. частоты колебаний механического активатора  $x_3$ , мин<sup>-1</sup> на степень коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , % и проверка условия коэффициента вариации дисперсий по G-критерию Кохрена ( $\alpha = 0.05$ )

План (факторы)			Степень однородности смеси $\lambda$ , % (отклик)				
X1	X2	X3	Повторности			Среднее	Дисп.
			1	2	3		
1	1	0	89.85	90.89	91.40	90.71	0.623865
-1	1	0	80.86	80.63	79.52	80.34	0.512261
1	-1	0	87.71	87.87	88.47	88.02	0.162495
-1	-1	0	77.20	76.98	77.75	77.31	0.155194
1	0	1	90.09	89.13	90.14	89.79	0.325345
-1	0	1	77.21	78.51	75.38	77.03	2.472274
1	0	-1	85.22	85.26	85.49	85.32	0.02052
-1	0	-1	76.41	76.23	76.06	76.23	0.030598
0	1	1	83.36	82.22	80.96	82.18	1.445693
0	-1	1	85.78	85.82	85.67	85.76	0.005967
0	1	-1	82.93	83.16	81.70	82.60	0.613244
0	-1	-1	76.91	76.39	77.23	76.84	0.178107
0	0	0	85.07	85.32	84.69	85.03	0.099562
0	0	0	85.16	84.17	83.20	84.18	0.960965
0	0	0	84.61	84.23	85.65	84.83	0.536371

Сумма построчных дисперсий **8.142461**

Максимальная из построчных дисперсий **2.472274**

G-критерий Кохрена соответствует

$G_{0,05}(2,15) =$	0.3346	$G_1 =$	0.30	<	$G_{таб} =$	0.3346
--------------------	--------	---------	------	---	-------------	--------

Регрессионный анализ результатов многофакторного эксперимента по определению влияния угла раскрытия лопастей механического активатора  $x_1$ , град., угла поворота механического активатора относительно оси рабочего вала  $x_2$ , град. и частоты колебаний механического активатора  $x_3$ , мин<sup>-1</sup> на степень коэффициента вариации смеси  $\lambda$ , % (листинг MathCAD 14.0)

## Исходные данные

ORIGIN := 1

Матрица уровней варьирования факторов

$$F := \begin{pmatrix} 130 & 60 & 90 \\ 100 & 40 & 65 \\ 70 & 20 & 40 \end{pmatrix}$$

$$F1 := F^{(1)} \quad F2 := F^{(2)} \\ F3 := F^{(3)}$$

Интервалы варьирования факторов

$$\Delta 1 := F1_1 - F1_2 \quad \Delta 2 := F2_1 - F2_2 \quad \Delta 3 := F3_1 - F3_2 \\ \Delta 1 = 30 \quad \Delta 2 = 20 \quad \Delta 3 = 25$$

## План эксперимента

$$X1 := \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad X2 := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad X3 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad Y0 := \begin{pmatrix} 89.85 & 90.89 & 91.4 \\ 80.86 & 80.63 & 79.52 \\ 87.71 & 87.87 & 88.47 \\ 77.2 & 76.98 & 77.75 \\ 90.09 & 89.13 & 90.14 \\ 77.21 & 78.51 & 75.38 \\ 85.22 & 85.26 & 85.49 \\ 76.41 & 76.23 & 76.06 \\ 83.36 & 82.22 & 80.96 \\ 85.78 & 85.82 & 85.67 \\ 82.93 & 83.16 & 81.7 \\ 76.91 & 76.39 & 77.23 \\ 85.07 & 85.32 & 84.69 \\ 85.16 & 84.17 & 83.2 \\ 84.61 & 84.23 & 85.64 \end{pmatrix}$$

Количество строк плана:

Количество повторностей опыта

$$n := \text{rows}(X1) \quad n = 15$$

$$m := \text{cols}(Y0) \quad m = 3$$

$$i := 1..n$$

Раскодирование факторов:

$$x1_i := X1_i \cdot \Delta 1 + F1_2 \\ X1 := x1$$

$$x2_i := X2_i \cdot \Delta 2 + F2_2 \\ X2 := x2$$

$$x3_i := X3_i \cdot \Delta 3 + F3_2 \\ X3 := x3$$

Единичный вектор:

$$L_i := 1$$

Системная матрица:

$$X := \text{augment} \left[ L, X1, X2, X3, (X1 \cdot X2), (X1 \cdot X3), (X2 \cdot X3), (X1 \cdot X1), (X2 \cdot X2), (X3 \cdot X3) \right]$$

Количество оцениваемых параметров

$$k := \text{cols}(X) \quad k = 10 \quad j := 1..k$$

Средние значения откликов

$$Y_i := \text{mean}(\text{submatrix}(Y0, i, i, 1, m))$$

Y =

90.71
80.34
88.02
77.31
89.79
77.03
85.32
76.23
82.18
85.76
82.6
76.84
85.03
84.18
84.83

МНК (метод наименьших квадратов)

Дисперсионная матрица

$$C := (X^T \cdot X)^{-1}$$

Оценки коэффициентов регрессии

$$a := C \cdot X^T \cdot Y \quad a =$$

Оценки результатов

$$y := X \cdot a$$

	1
1	35.755706
2	0.141933
3	0.4496
4	0.635869
5	-0.000138
6	0.001221
7	-0.004665
8	-0.000185
9	-0.001041
10	-0.003866

Определение ошибки оценивания  
(при условии адекватности модели)

Суммы квадратов отклонений

$$Sd := \sum_{i=1}^n \left[ m \cdot (Y_i - y_i)^2 \right]$$

$$Se := \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Y0_{i,j} - Y_i)^2$$

Числа степеней свободы

$$\nu1 := n - k$$

$$\nu2 := n \cdot (m - 1)$$

Несмещённая оценка дисперсии ошибок наблюдений

$$s2 := \frac{Se}{m \cdot \nu2}$$

Ковариационная матрица ошибок оценок параметров регрессии

$$K := C \cdot s2$$

Уровень значимости  $\alpha := 0.1$ Критическое значение распределения Стьюдента с  $\nu2$  степенями свободы, соответствующее выбранному уровню значимости  $\alpha$ 

$$tkp := qt \left( 1 - \frac{\alpha}{2}, \nu2 \right)$$

Доверительные интервалы для оценок  $a_j$ 

$$\Delta_j := tkp \cdot \sqrt{K_{j,j}}$$



	1	
1	6.8	$ a_j  > \Delta_j =$
2	0.093	
3	0.108	
4	0.097	
5	$6.017 \cdot 10^{-4}$	
6	$4.814 \cdot 10^{-4}$	
7	$7.221 \cdot 10^{-4}$	
8	$4.175 \cdot 10^{-4}$	
9	$9.394 \cdot 10^{-4}$	
10	$6.012 \cdot 10^{-4}$	

"0" - коэффициент  $a_j$  статистически незначим с доверительной вероятностью  $1 - \alpha = 0.9$

"1" - коэффициент  $a_j$  статистически значим на уровне  $\alpha = 0.1$

#### Проверка адекватности модели

$n > k = 1$  - условие применимости метода ("1" - истина; "0" - ложь)

Уровень значимости  $\alpha := 0.01$

$F_{кр} := \text{root}(\text{pF}(x, \nu_1, \nu_2) - 1 + \alpha, x, 0, 10)$   $F_{кр} = 3.699$

$F := \frac{Sd \cdot \nu_2}{Se \cdot \nu_1}$   $F = 3.696$

$F < F_{кр} = 1$  ("1" - модель адекватна; "0" - модель не адекватна)

#### Исключение из модели незначимых коэффициентов (при условии адекватности модели)

Новая системная матрица:

$X := \text{augment}[L, X1, X2, X3, (X1 \cdot X3), (X2 \cdot X3), (X2 \cdot X2), (X3 \cdot X3)]$

Количество оцениваемых параметров

$k := \text{cols}(X)$   $k = 8$   $j := 1..k$

#### МНК (метод наименьших квадратов)

Дисперсионная матрица

$C := (X^T \cdot X)^{-1}$

$\begin{pmatrix} 38.181554 \\ 0.099442 \\ 0.433538 \\ 0.633322 \\ 0.001222 \\ -0.004667 \\ -0.00101 \\ -0.003846 \end{pmatrix}$

Оценки коэффициентов регрессии

$a := C \cdot X^T \cdot Y$

$a =$

Оценки результатов

$y := X \cdot a$

**Определение ошибки оценивания  
(при условии адекватности модели)**

Суммы квадратов отклонений

$$Sd := \sum_{i=1}^n \left[ m \cdot (Y_i - y_i)^2 \right] \quad +$$

$$Se := \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Y_{0,i,j} - Y_i)^2$$

Числа степеней свободы

$$\nu 1 := n - k$$

$$\nu 2 := n \cdot (m - 1)$$

Несмещённая оценка дисперсии ошибок наблюдений

$$s2 := \frac{Se}{m \cdot \nu 2}$$

Ковариационная матрица ошибок оценок параметров регрессии

$$K := C \cdot s2$$

Уровень значимости  $\alpha := 0.1$

Критическое значение распределения Стьюдента с  $\nu 2$  степенями свободы, соответствующее выбранному уровню значимости  $\alpha$

$$tkp := qt\left(1 - \frac{\alpha}{2}, \nu 2\right) \quad \Delta := 0$$

Доверительные интервалы для оценок  $a_j$

$$\Delta_j := tkp \cdot \sqrt{K_{j,j}}$$

$$\Delta = \begin{pmatrix} 4.725 \\ 0.032 \\ 0.089 \\ 0.097 \\ 4.813 \times 10^{-4} \\ 7.219 \times 10^{-4} \\ 9.364 \times 10^{-4} \\ 5.993 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \quad |a_j| > \Delta_j = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

"0" - коэффициент  $a_j$  статистически незначим с доверительной вероятностью

"1" - коэффициент  $a_j$  статистически значим на уровне

**Проверка адекватности модели**

$n > k = 1$  - условие применимости метода: "1" - метод применим;

Уровень значимости  $\alpha := 0.01$

"0" - метод не применим

$$F_{kp} := \text{root}(pF(x, \nu 1, \nu 2) - 1 + \alpha, x, 0, 10)$$

$$F_{kp} = 3.304$$

$$F := \frac{Sd \cdot \nu 2}{Se \cdot \nu 1}$$

$$F = 2.745$$

$F < F_{kp} = 1$  ("1" - модель адекватна; "0" - модель не адекватна)

**Уравнение регрессии**

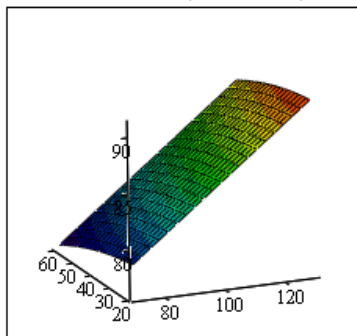
$$Z(x_1, x_2, x_3) := a_1 + a_2 \cdot x_1 + a_3 \cdot x_2 + a_4 \cdot x_3 + a_5 \cdot x_1 \cdot x_3 + a_6 \cdot x_2 \cdot x_3 + a_7 \cdot x_2^2 + a_8 \cdot x_3^2$$

**Оптимизация результатов**

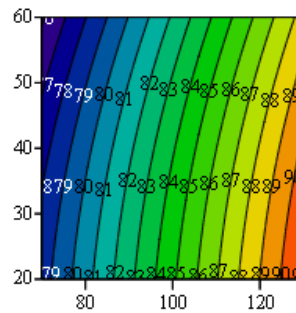
	$x_1 := 100$	$x_2 := 40$	$x_3 := 65$
Given	$70 < x_1 < 130$	$20 < x_2 < 60$	$40 < x_3 < 90$

$$M := \text{Maximize}(Z, x_1, x_2, x_3) = \begin{pmatrix} 130 \\ 20 \\ 90 \end{pmatrix} \quad Z(M_1, M_2, M_3) = 91.114$$

$Z1(x_1, x_2) := Z(x_1, x_2, M_3)$

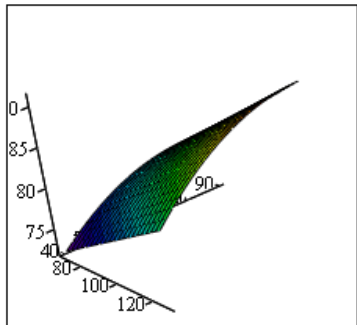


Z1

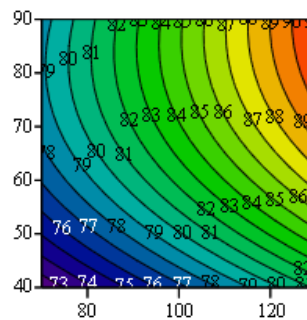


Z1

$Z2(x_1, x_3) := Z(x_1, M_2, x_3)$

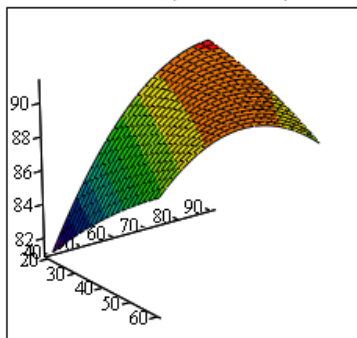


Z2

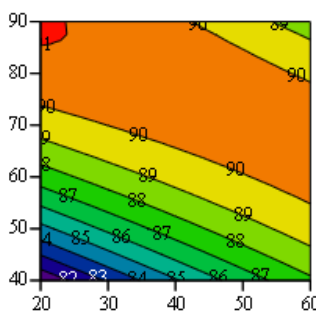


Z2

$Z3(x_2, x_3) := Z(M_1, x_2, x_3)$



Z3



Z3

Регрессионный анализ результатов однофакторного эксперимента по определению влияния времени рабочего процесса  $t$ , мин на качество смешивания  $\lambda$ , % при использовании активатора (листинг MathCAD 14.0)

Исходные данные

ORIGIN := 1

$$X := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{pmatrix} \quad Y0 := \begin{pmatrix} 54.14 & 53.06 & 61.1 \\ 69.79 & 67.76 & 77.84 \\ 73.92 & 76.36 & 78.62 \\ 90.73 & 91.69 & 90.28 \\ 96.6 & 94.64 & 89.26 \\ 92.39 & 92.22 & 88.39 \\ 97 & 96.65 & 93.45 \end{pmatrix}$$

Число опытов:

Число повторностей:

$$N := \text{rows}(Y0)$$

$$m := \text{cols}(Y0)$$

$$N = 7$$

$$m = 3$$

$$i := 1..N$$

$$j := 1..m$$

Средние значения отклика

$$Y_i := \text{mean}(\text{submatrix}(Y0, i, i, 1, m))$$

$$Y = \begin{pmatrix} 56.1 \\ 71.8 \\ 76.3 \\ 90.9 \\ 93.5 \\ 91 \\ 95.7 \end{pmatrix}$$

Квадратичное приближение  $F(x) = a_1 + a_2 x + a_3 x^2$

$$1_i := 1 \quad XX := \text{augment}\left[1, X, \begin{pmatrix} \rightarrow \\ \rightarrow \\ \rightarrow \end{pmatrix} (X \cdot X)\right]$$

МНК:  $a := (XX^T \cdot XX)^{-1} \cdot XX^T \cdot Y$

Коэффициенты регрессии

$$a = \begin{pmatrix} 40.98429 \\ 17.08595 \\ -1.35714 \end{pmatrix}$$

Уравнение регрессии

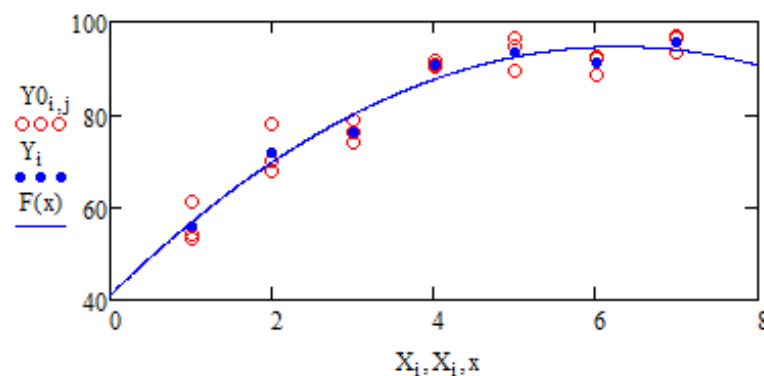
$$F(x) := a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot x^2$$

Коэффициент детерминации

$$R2 := 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - F(X_i))^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \text{mean}(Y))^2} = 0.964$$

Построение графика функции

$$F(x) := 40.98 + 17.08 \cdot x - 1.36 \cdot x^2$$



### Экспериментальное определение степени коэффициента вариации кормовой смеси

Таблица 1 – Расчет степени коэффициента вариации дробленой зерновой смеси: овес 93%, ячмень 7% + кормовые добавки (контрольный компонент - ячмень)

№ пробы	Масса пробы, г.	Масса контрольного компонента в пробе, г.	Массовая доля контрольного компонента в пробе, %
1	11.03	0.75	6.76
2	11.48	0.75	6.52
3	9.97	0.67	6.73
4	10.56	0.85	8.01
5	10.32	0.57	5.51
6	10.86	0.79	7.24
7	9.05	0.64	7.08
8	8.61	0.67	7.76
9	10.10	0.62	6.16
10	9.43	0.58	6.15
11	7.44	0.61	8.19
12	11.52	0.93	8.06
13	9.21	0.75	8.12
14	7.59	0.60	7.87
15	7.93	0.74	9.39
<b>Среднее арифметическое значение <math>B_{cp}</math> =</b>			<b>7.30</b>
<b>Среднеквадратическое отклонение <math>\sigma</math> =</b>			<b>0.84</b>

**Коэффициент вариации  $\gamma$  = 11.45**

**Степень однородности смеси  $\lambda$  = 88.55**

Таблица 2 – Расчет степени коэффициента вариации дробленой зерновой смеси: пшеница 23%, овес 10%, отруби 60% + кормовые добавки (контрольный компонент - овес)

№ пробы	Масса пробы, г.	Масса контрольного компонента в пробе, г.	Массовая доля контрольного компонента в пробе, %
1	10.40	0.90	8.67
2	10.07	0.96	9.48
3	9.50	0.96	10.06
4	9.54	0.90	9.40
5	9.56	0.92	9.67
6	10.14	1.07	10.54
7	9.80	1.00	10.22
8	10.65	1.11	10.41
9	9.31	0.82	8.84
10	10.19	0.91	8.89
11	10.22	0.91	8.90
12	10.88	1.04	9.59
13	9.68	0.84	8.69
14	10.28	0.74	7.16
15	10.77	1.21	11.28
<b>Среднее арифметическое значение <math>B_{cp}</math> =</b>			<b>9.45</b>
<b>Среднеквадратическое отклонение <math>\sigma</math> =</b>			<b>0.75</b>

**Коэффициент вариации  $\gamma$  = 7.92**  
**Степень однородности смеси  $\lambda$  = 92.08**

Таблица 3– Расчет степени коэффициента вариации недробленной зерновой смеси: пшеница 25%, овес 15%, просо 10%, отруби 40% + кормовые добавки(контрольный компонент - просо)

№ пробы	Масса пробы, г.	Масса контрольного компонента в пробе, г.	Массовая доля контрольного компонента в пробе, %
1	9.67	0.70	7.27
2	10.70	1.28	11.96
3	9.54	0.80	8.43
4	9.27	0.99	10.69
5	9.31	0.78	8.42
6	10.88	0.89	8.14
7	9.18	0.98	10.64
8	9.00	0.64	7.13
9	10.50	1.03	9.81
10	9.41	1.00	10.62
11	10.43	1.27	12.20
12	10.53	0.86	8.16
13	10.42	0.98	9.42
14	10.12	1.08	10.71
15	9.96	1.02	10.28
Среднее арифметическое значение $B_{cp} =$			<b>9.59</b>
Среднеквадратическое отклонение $\sigma =$			<b>1.36</b>

Коэффициент вариации  $\gamma =$  **14.15**  
 Степень однородности смеси  $\lambda =$  **85.85**

Приложение В2

Таблица 1 – Расчет показателей срока окупаемости при размере стада 379 голов

№ стр.	Показатели		Ед. изм.	Установка для смешивания кормов		Расчет	Примечание, ссылка
				СВ-1,1	предлагаемая		
1	Годовой объем перерабатываемого продукта	$V$	т	830	830	$V = 379 \cdot 0.006 \cdot 365$	формула (5.7)
2	Производительность установки	$Q$	т/ч	0.5	0.6	-	исх. данные
3	Установленная мощность	$N$	кВт	1.5	0.32	-	исх. данные
4	Энергоемкость	$E$	кВт·ч/т	3.00	0.53	$E=N/Q$	формула (5.9)
5	Годовая нормативная нагрузка	$T$	ч	1 660	1 383	$T=V/Q$	формула (5.8)
6	Численность обслуживающего персонала	$z$	чел	1	1	-	исх. данные
7	Часовая ставка оператора	$h_{\text{ч}}$	руб	100	100	-	исх. данные
8	Затраты труда на годовой объем работы	$t$	чел·ч	1 660	1 383	$t=T \cdot z$	формула (5.10)
9	Расходы на оплату труда персонала в год	$З_{OT}$	руб	276 227	230 189	$З_{OT}=t \cdot h_{\text{ч}} \cdot 1,3 \cdot 1,28$	формула (5.11)
10	Тариф на эл. энергию для с/х предпр-й	$C_{\text{Э}}$	руб/кВт·ч	5.2	5.2	-	исх. данные
11	Затраты на эл. энергию в год	$\text{Э}$	руб	12 948	2 302	$\text{Э}=V \cdot E \cdot C_{\text{Э}}$	формула (5.12)
12	Балансовая стоимость установки (кап. вложения)	$S_{\text{Б}}$	руб	79 000	83 300	-	исх. данные
13	Коэффициент эфф-ти кап. вложений	$e_{\text{Н}}$	-	0.1	0.1	-	исх. данные
14	Списание стоимости (часовая амортизация)	$h_{\text{А}}$	руб/ч	4.52	4.77	$h_{\text{А}}=S_{\text{Б}}/(8 \cdot 273 \cdot 8)$	формула (5.14)
15	Сумма годовой амортизации	$A$	руб	7 506	6 595	$A=T \cdot h_{\text{А}}$	формула (5.13)
16	Годовые нормы на ремонт и ТО	$k_{\text{ТО}}$	%	8.00%	8.00%	-	исх. данные
17	Затраты на ремонт и ТО	$З_{\text{ТО/ТР}}$	руб	6 320	6 664	$З_{\text{ТО/ТР}}=S_{\text{Б}} \cdot k_{\text{ТО}}/100$	формула (5.15)
18	Эксплуатационные затраты в год	$З_{\text{Э}}$	руб	303 001	245 751	$З_{\text{Э}}=\text{Э}+З_{\text{OT}}+A+З_{\text{ТО/ТР}}$	формула (5.17)
19	Прямые затраты в год	$З_{\text{П}}$	руб	310 901	254 081	$З_{\text{П}}=З_{\text{Э}}+S_{\text{Б}} \cdot e_{\text{Н}}$	формула (5.16)
20	Годовая экономия абсолютная	$\text{Э}_{\text{Г}}$	руб	-	<b>56 821</b>	$\text{Э}_{\text{Г}}=З_{\text{П}}^{\text{С}} - З_{\text{П}}^{\text{П}}$	формула (5.18)
21	Годовая экономия относительная	$\text{Э}_{\text{Г}}^{\%}$	%	-	<b>18.28</b>	$\text{Э}_{\text{Г}}^{\%}=(\text{Э}_{\text{Г}}/З_{\text{П}}^{\text{С}}) \cdot 100$	формула (5.19)
22	Срок окупаемости	$C_{\text{О}}$	лет	-	<b>1.47</b>	$C_{\text{О}}=S_{\text{Б}}/\text{Э}_{\text{Г}}$	формула (5.20)



Таблица 2 – Расчет показателей срока окупаемости при размере стада 50 голов

№ стр.	Показатели		Ед. изм.	Установка для смешивания кормов		Расчет	Примечание, ссылка
				СВ-1,1	предлагаемая		
1	Годовой объем перерабатываемого продукта	$V$	т	110	110	$V = 50 \cdot 0.006 \cdot 365$	формула (5.7)
2	Производительность установки	$Q$	т/ч	0.5	0.6	-	исх. данные
3	Установленная мощность	$N$	кВт	1.5	0.32	-	исх. данные
4	Энергоемкость	$E$	кВт·ч/т	3.00	0.53	$E=N/Q$	формула (5.9)
5	Годовая нормативная нагрузка	$T$	ч	219	183	$T=V/Q$	формула (5.8)
6	Численность обслуживающего персонала	$z$	чел	1	1	-	исх. данные
7	Часовая ставка оператора	$h_{\text{ч}}$	руб	100	100	-	исх. данные
8	Затраты труда на годовой объем работы	$t$	чел·ч	219	183	$t=T \cdot z$	формула (5.10)
9	Расходы на оплату труда персонала в год	$З_{\text{ОТ}}$	руб	36 442	30 368	$З_{\text{ОТ}}=t \cdot h_{\text{ч}} \cdot 1,3 \cdot 1,28$	формула (5.11)
10	Тариф на эл. энергию для с/х предпр-й	$C_{\text{Э}}$	руб/кВт·ч	5.2	5.2	-	исх. данные
11	Затраты на эл. энергию в год	$\text{Э}$	руб	1 708	304	$\text{Э}=V \cdot E \cdot C_{\text{Э}}$	формула (5.12)
12	Балансовая стоимость установки (кап. вложения)	$S_{\text{Б}}$	руб	79 000	83 300	-	исх. данные
13	Коэффициент эфф-ти кап. вложений	$e_{\text{Н}}$	-	0.1	0.1	-	исх. данные
14	Списание стоимости (часовая амортизация)	$h_{\text{А}}$	руб/ч	4.52	4.77	$h_{\text{А}}=S_{\text{Б}}/(8 \cdot 273 \cdot 8)$	формула (5.14)
15	Сумма годовой амортизации	$A$	руб	990	870	$A=T \cdot h_{\text{А}}$	формула (5.13)
16	Годовые нормы на ремонт и ТО	$k_{\text{ТО}}$	%	8.00%	8.00%	-	исх. данные
17	Затраты на ремонт и ТО	$З_{\text{ТО/ТР}}$	руб	6 320	6 664	$З_{\text{ТО/ТР}}=S_{\text{Б}} \cdot k_{\text{ТО}}/100$	формула (5.15)
18	Эксплуатационные затраты в год	$З_{\text{Э}}$	руб	45 460	38 206	$З_{\text{Э}}=\text{Э}+З_{\text{ОТ}}+A+З_{\text{ТО/ТР}}$	формула (5.17)
19	Прямые затраты в год	$З_{\text{П}}$	руб	53 360	46 536	$З_{\text{П}}=З_{\text{Э}}+S_{\text{Б}} \cdot e_{\text{Н}}$	формула (5.16)
20	Годовая экономия абсолютная	$\text{Э}_{\text{Г}}$	руб	-	<b>6 824</b>	$\text{Э}_{\text{Г}}=З_{\text{П}}^{\text{С}} - З_{\text{П}}^{\text{П}}$	формула (5.18)
21	Годовая экономия относительная	$\text{Э}_{\text{Г}}^{\%}$	%	-	<b>12.79</b>	$\text{Э}_{\text{Г}}^{\%}=(\text{Э}_{\text{Г}}/З_{\text{П}}^{\text{С}}) \cdot 100$	формула (5.19)
22	Срок окупаемости	$C_{\text{О}}$	лет	-	<b>12.21</b>	$C_{\text{О}}=S_{\text{Б}}/\text{Э}_{\text{Г}}$	формула (5.20)

Таблица 3 – Расчет показателей срока окупаемости при размере стада 100 голов

№ стр.	Показатели		Ед. изм.	Установка для смешивания кормов		Расчет	Примечание, ссылка
				СВ-1,1	предлагаемая		
1	Годовой объем перерабатываемого продукта	$V$	т	219	219	$V = 100 \cdot 0.006 \cdot 365$	формула (5.7)
2	Производительность установки	$Q$	т/ч	0.5	0.6	-	исх. данные
3	Установленная мощность	$N$	кВт	1.5	0.32	-	исх. данные
4	Энергоемкость	$E$	кВт·ч/т	3.00	0.53	$E=N/Q$	формула (5.9)
5	Годовая нормативная нагрузка	$T$	ч	438	365	$T=V/Q$	формула (5.8)
6	Численность обслуживающего персонала	$z$	чел	1	1	-	исх. данные
7	Часовая ставка оператора	$h_{\text{ч}}$	руб	100	100	-	исх. данные
8	Затраты труда на годовой объем работы	$t$	чел·ч	438	365	$t=T \cdot z$	формула (5.10)
9	Расходы на оплату труда персонала в год	$З_{\text{ОТ}}$	руб	72 883	60 736	$З_{\text{ОТ}}=t \cdot h_{\text{ч}} \cdot 1,3 \cdot 1,28$	формула (5.11)
10	Тариф на эл. энергию для с/х предпр-й	$C_{\text{Э}}$	руб/кВт·ч	5.2	5.2	-	исх. данные
11	Затраты на эл. энергию в год	$\text{Э}$	руб	3 416	607	$\text{Э}=V \cdot E \cdot C_{\text{Э}}$	формула (5.12)
12	Балансовая стоимость установки (кап. вложения)	$S_{\text{Б}}$	руб	79 000	83 300	-	исх. данные
13	Коэффициент эфф-ти кап. вложений	$e_{\text{Н}}$	-	0.1	0.1	-	исх. данные
14	Списание стоимости (часовая амортизация)	$h_{\text{А}}$	руб/ч	4.52	4.77	$h_{\text{А}}=S_{\text{Б}}/(8 \cdot 273 \cdot 8)$	формула (5.14)
15	Сумма годовой амортизации	$A$	руб	1 980	1 740	$A=T \cdot h_{\text{А}}$	формула (5.13)
16	Годовые нормы на ремонт и ТО	$k_{\text{ТО}}$	%	8.00%	8.00%	-	исх. данные
17	Затраты на ремонт и ТО	$З_{\text{ТО/ТР}}$	руб	6 320	6 664	$З_{\text{ТО/ТР}}=S_{\text{Б}} \cdot k_{\text{ТО}}/100$	формула (5.15)
18	Эксплуатационные затраты в год	$З_{\text{Э}}$	руб	84 600	69 748	$З_{\text{Э}}=\text{Э}+З_{\text{ОТ}}+A+З_{\text{ТО/ТР}}$	формула (5.17)
19	Прямые затраты в год	$З_{\text{П}}$	руб	92 500	78 078	$З_{\text{П}}=З_{\text{Э}}+S_{\text{Б}} \cdot e_{\text{Н}}$	формула (5.16)
20	Годовая экономия абсолютная	$\text{Э}_{\text{Г}}$	руб	-	<b>14 422</b>	$\text{Э}_{\text{Г}}=З_{\text{П}}^{\text{С}} - З_{\text{П}}^{\text{П}}$	формула (5.18)
21	Годовая экономия относительная	$\text{Э}_{\text{Г}}^{\%}$	%	-	<b>15.59</b>	$\text{Э}_{\text{Г}}^{\%}=(\text{Э}_{\text{Г}}/З_{\text{П}}^{\text{С}}) \cdot 100$	формула (5.19)
22	Срок окупаемости	$C_{\text{О}}$	лет	-	<b>5.78</b>	$C_{\text{О}}=S_{\text{Б}}/\text{Э}_{\text{Г}}$	формула (5.20)

## Продолжение приложения В2

Таблица 4 – Расчет показателей срока окупаемости при размере стада 200 голов

№ стр.	Показатели		Ед. изм.	Установка для смешивания кормов		Расчет	Примечание, ссылка
				СВ-1,1	предлагаемая		
1	Годовой объем перерабатываемого продукта	$V$	т	438	438	$V = 200 \cdot 0.006 \cdot 365$	формула (5.7)
2	Производительность установки	$Q$	т/ч	0.5	0.6	-	исх. данные
3	Установленная мощность	$N$	кВт	1.5	0.32	-	исх. данные
4	Энергоемкость	$E$	кВт·ч/т	3.00	0.53	$E=N/Q$	формула (5.9)
5	Годовая нормативная нагрузка	$T$	ч	876	730	$T=V/Q$	формула (5.8)
6	Численность обслуживающего персонала	$z$	чел	1	1	-	исх. данные
7	Часовая ставка оператора	$h_{\text{ч}}$	руб	100	100	-	исх. данные
8	Затраты труда на годовой объем работы	$t$	чел·ч	876	730	$t=T \cdot z$	формула (5.10)
9	Расходы на оплату труда персонала в год	$З_{\text{ОТ}}$	руб	145 766	121 472	$З_{\text{ОТ}}=t \cdot h_{\text{ч}} \cdot 1,3 \cdot 1,28$	формула (5.11)
10	Тариф на эл. энергию для с/х предпр-й	$C_{\text{э}}$	руб/кВт·ч	5.2	5.2	-	исх. данные
11	Затраты на эл. энергию в год	$\text{Э}$	руб	6 833	1 215	$\text{Э}=V \cdot E \cdot C_{\text{э}}$	формула (5.12)
12	Балансовая стоимость установки (кап. вложения)	$S_{\text{Б}}$	руб	79 000	83 300	-	исх. данные
13	Коэффициент эфф-ти кап. вложений	$e_{\text{Н}}$	-	0.1	0.1	-	исх. данные
14	Списание стоимости (часовая амортизация)	$h_{\text{А}}$	руб/ч	4.52	4.77	$h_{\text{А}}=S_{\text{Б}}/(8 \cdot 273 \cdot 8)$	формула (5.14)
15	Сумма годовой амортизации	$A$	руб	3 961	3 480	$A=T \cdot h_{\text{А}}$	формула (5.13)
16	Годовые нормы на ремонт и ТО	$k_{\text{ТО}}$	%	8.00%	8.00%	-	исх. данные
17	Затраты на ремонт и ТО	$З_{\text{ТО/ТР}}$	руб	6 320	6 664	$З_{\text{ТО/ТР}}=S_{\text{Б}} \cdot k_{\text{ТО}}/100$	формула (5.15)
18	Эксплуатационные затраты в год	$З_{\text{э}}$	руб	162 880	132 831	$З_{\text{э}}=\text{Э}+З_{\text{ОТ}}+A+З_{\text{ТО/ТР}}$	формула (5.17)
19	Прямые затраты в год	$З_{\text{П}}$	руб	170 780	141 161	$З_{\text{П}}=З_{\text{э}}+S_{\text{Б}} \cdot e_{\text{Н}}$	формула (5.16)
20	Годовая экономия абсолютная	$\text{Э}_{\text{Г}}$	руб	-	<b>29 619</b>	$\text{Э}_{\text{Г}}=З_{\text{П}}^{\text{С}} - З_{\text{П}}^{\text{П}}$	формула (5.18)
21	Годовая экономия относительная	$\text{Э}_{\text{Г}}^{\%}$	%	-	<b>17.34</b>	$\text{Э}_{\text{Г}}^{\%}=(\text{Э}_{\text{Г}}/З_{\text{П}}^{\text{С}}) \cdot 100$	формула (5.19)
22	Срок окупаемости	$C_{\text{о}}$	лет	-	<b>2.81</b>	$C_{\text{о}}=S_{\text{Б}}/\text{Э}_{\text{Г}}$	формула (5.20)

Таблица 5 – Расчет показателей срока окупаемости при размере стада 400 голов

№ стр.	Показатели		Ед. изм.	Установка для смешивания кормов		Расчет	Примечание, ссылка
				СВ-1,1	предлагаемая		
1	Годовой объем перерабатываемого продукта	$V$	т	876	876	$V = 400 \cdot 0.006 \cdot 365$	формула (5.7)
2	Производительность установки	$Q$	т/ч	0.5	0.6	-	исх. данные
3	Установленная мощность	$N$	кВт	1.5	0.32	-	исх. данные
4	Энергоемкость	$E$	кВт·ч/т	3.00	0.53	$E=N/Q$	формула (5.9)
5	Годовая нормативная нагрузка	$T$	ч	1 752	1 460	$T=V/Q$	формула (5.8)
6	Численность обслуживающего персонала	$z$	чел	1	1	-	исх. данные
7	Часовая ставка оператора	$h_{\text{ч}}$	руб	100	100	-	исх. данные
8	Затраты труда на годовой объем работы	$t$	чел·ч	1 752	1 460	$t=T \cdot z$	формула (5.10)
9	Расходы на оплату труда персонала в год	$З_{\text{ОТ}}$	руб	291 533	242 944	$З_{\text{ОТ}}=t \cdot h_{\text{ч}} \cdot 1,3 \cdot 1,28$	формула (5.11)
10	Тариф на эл. энергию для с/х предпр-й	$C_{\text{э}}$	руб/кВт·ч	5.2	5.2	-	исх. данные
11	Затраты на эл. энергию в год	$\text{Э}$	руб	13 666	2 429	$\text{Э}=V \cdot E \cdot C_{\text{э}}$	формула (5.12)
12	Балансовая стоимость установки (кап. вложения)	$S_{\text{Б}}$	руб	79 000	83 300	-	исх. данные
13	Коэффициент эфф-ти кап. вложений	$e_{\text{Н}}$	-	0.1	0.1	-	исх. данные
14	Списание стоимости (часовая амортизация)	$h_{\text{А}}$	руб/ч	4.52	4.77	$h_{\text{А}}=S_{\text{Б}}/(8 \cdot 273 \cdot 8)$	формула (5.14)
15	Сумма годовой амортизации	$A$	руб	7 922	6 961	$A=T \cdot h_{\text{А}}$	формула (5.13)
16	Годовые нормы на ремонт и ТО	$k_{\text{ТО}}$	%	8.00%	8.00%	-	исх. данные
17	Затраты на ремонт и ТО	$З_{\text{ТО/ТР}}$	руб	6 320	6 664	$З_{\text{ТО/ТР}}=S_{\text{Б}} \cdot k_{\text{ТО}}/100$	формула (5.15)
18	Эксплуатационные затраты в год	$З_{\text{э}}$	руб	319 440	258 998	$З_{\text{э}}=\text{Э}+З_{\text{ОТ}}+A+З_{\text{ТО/ТР}}$	формула (5.17)
19	Прямые затраты в год	$З_{\text{П}}$	руб	327 340	267 328	$З_{\text{П}}=З_{\text{э}}+S_{\text{Б}} \cdot e_{\text{Н}}$	формула (5.16)
20	Годовая экономия абсолютная	$\text{Э}_{\text{Г}}$	руб	-	<b>60 012</b>	$\text{Э}_{\text{Г}}=З_{\text{П}}^{\text{С}} - З_{\text{П}}^{\text{П}}$	формула (5.18)
21	Годовая экономия относительная	$\text{Э}_{\text{Г}}^{\%}$	%	-	<b>18.33</b>	$\text{Э}_{\text{Г}}^{\%}=(\text{Э}_{\text{Г}}/З_{\text{П}}^{\text{С}}) \cdot 100$	формула (5.19)
22	Срок окупаемости	$C_{\text{о}}$	лет	-	<b>1.39</b>	$C_{\text{о}}=S_{\text{Б}}/\text{Э}_{\text{Г}}$	формула (5.20)

Таблица 6– Расчет показателей срока окупаемости при размере стада 600 голов

№ стр.	Показатели		Ед. изм.	Установка для смешивания кормов		Расчет	Примечание, ссылка
				СВ-1,1	предлагаемая		
1	Годовой объем перерабатываемого продукта	$V$	т	1314	1314	$V = 600 \cdot 0.006 \cdot 365$	формула (5.7)
2	Производительность установки	$Q$	т/ч	0.5	0.6	-	исх. данные
3	Установленная мощность	$N$	кВт	1.5	0.32	-	исх. данные
4	Энергоемкость	$E$	кВт·ч/т	3.00	0.53	$E=N/Q$	формула (5.9)
5	Годовая нормативная нагрузка	$T$	ч	2 628	2 190	$T=V/Q$	формула (5.8)
6	Численность обслуживающего персонала	$z$	чел	1	1	-	исх. данные
7	Часовая ставка оператора	$h_{\text{ч}}$	руб	100	100	-	исх. данные
8	Заграты труда на годовой объем работы	$t$	чел·ч	2 628	2 190	$t=T \cdot z$	формула (5.10)
9	Расходы на оплату труда персонала в год	$З_{\text{ОТ}}$	руб	437 299	364 416	$З_{\text{ОТ}}=t \cdot h_{\text{ч}} \cdot 1,3 \cdot 1,28$	формула (5.11)
10	Тариф на эл. энергию для с/х предпр-й	$C_{\text{э}}$	руб/кВт·ч	5.2	5.2	-	исх. данные
11	Заграты на эл. энергию в год	$\text{Э}$	руб	20 498	3 644	$\text{Э}=V \cdot E \cdot C_{\text{э}}$	формула (5.12)
12	Балансовая стоимость установки (кап. вложения)	$S_{\text{Б}}$	руб	79 000	83 300	-	исх. данные
13	Коэффициент эфф-ти кап. вложений	$e_{\text{Н}}$	-	0.1	0.1	-	исх. данные
14	Списание стоимости (часовая амортизация)	$h_{\text{А}}$	руб/ч	4.52	4.77	$h_{\text{А}}=S_{\text{Б}}/(8 \cdot 273 \cdot 8)$	формула (5.14)
15	Сумма годовой амортизации	$A$	руб	11 883	10 441	$A=T \cdot h_{\text{А}}$	формула (5.13)
16	Годовые нормы на ремонт и ТО	$k_{\text{ТО}}$	%	8.00%	8.00%	-	исх. данные
17	Заграты на ремонт и ТО	$З_{\text{ТО/ТР}}$	руб	6 320	6 664	$З_{\text{ТО/ТР}}=S_{\text{Б}} \cdot k_{\text{ТО}}/100$	формула (5.15)
18	Эксплуатационные заграты в год	$З_{\text{э}}$	руб	476 000	385 165	$З_{\text{э}}=\text{Э}+З_{\text{ОТ}}+A+З_{\text{ТО/ТР}}$	формула (5.17)
19	Прямые заграты в год	$З_{\text{П}}$	руб	483 900	393 495	$З_{\text{П}}=З_{\text{э}}+S_{\text{Б}} \cdot e_{\text{Н}}$	формула (5.16)
20	Годовая экономия абсолютная	$\text{Э}_{\text{Г}}$	руб	-	<b>90 405</b>	$\text{Э}_{\text{Г}}=З_{\text{П}}^{\text{С}} - З_{\text{П}}^{\text{П}}$	формула (5.18)
21	Годовая экономия относительная	$\text{Э}_{\text{Г}}^{\%}$	%	-	<b>18.68</b>	$\text{Э}_{\text{Г}}^{\%}=(\text{Э}_{\text{Г}}/З_{\text{П}}^{\text{С}}) \cdot 100$	формула (5.19)
22	Срок окупаемости	$C_{\text{О}}$	лет	-	<b>0.92</b>	$C_{\text{О}}=S_{\text{Б}}/\text{Э}_{\text{Г}}$	формула (5.20)


Таблица 7 – Расчет показателей срока окупаемости при размере стада 900 голов

№ стр.	Показатели		Ед. изм.	Установка для смешивания кормов		Расчет	Примечание, ссылка
				СВ-1,1	предлагаемая		
1	Годовой объем перерабатываемого продукта	$V$	т	1971	1971	$V = 900 \cdot 0.006 \cdot 365$	формула (5.7)
2	Производительность установки	$Q$	т/ч	0.5	0.6	-	исх. данные
3	Установленная мощность	$N$	кВт	1.5	0.32	-	исх. данные
4	Энергоемкость	$E$	кВт·ч/т	3.00	0.53	$E=N/Q$	формула (5.9)
5	Годовая нормативная нагрузка	$T$	ч	3 942	3 285	$T=V/Q$	формула (5.8)
6	Численность обслуживающего персонала	$z$	чел	1	1	-	исх. данные
7	Часовая ставка оператора	$h_ч$	руб	100	100	-	исх. данные
8	Затраты труда на годовой объем работы	$t$	чел·ч	3 942	3 285	$t=T \cdot z$	формула (5.10)
9	Расходы на оплату труда персонала в год	$З_{ОГ}$	руб	655 949	546 624	$З_{ОГ}=t \cdot h_ч \cdot 1,3 \cdot 1,28$	формула (5.11)
10	Тариф на эл. энергию для с/х предпр-й	$C_э$	руб/кВт·ч	5.2	5.2	-	исх. данные
11	Затраты на эл. энергию в год	$Э$	руб	30 748	5 466	$Э=V \cdot E \cdot C_э$	формула (5.12)
12	Балансовая стоимость установки (кап. вложения)	$S_Б$	руб	79 000	83 300	-	исх. данные
13	Коэффициент эфф-ти кап. вложений	$e_H$	-	0.1	0.1	-	исх. данные
14	Списание стоимости (часовая амортизация)	$h_A$	руб/ч	4.52	4.77	$h_A=S_Б/(8 \cdot 273 \cdot 8)$	формула (5.14)
15	Сумма годовой амортизации	$A$	руб	17 824	15 662	$A=T \cdot h_A$	формула (5.13)
16	Годовые нормы на ремонт и ТО	$k_{ТО}$	%	8.00%	8.00%	-	исх. данные
17	Затраты на ремонт и ТО	$З_{ТО/ТР}$	руб	6 320	6 664	$З_{ТО/ТР}=S_Б \cdot k_{ТО}/100$	формула (5.15)
18	Эксплуатационные затраты в год	$З_э$	руб	710 840	574 416	$З_э=Э+З_{ОГ}+A+З_{ТО/ТР}$	формула (5.17)
19	Прямые затраты в год	$З_П$	руб	718 740	582 746	$З_П=З_э+S_Б \cdot e_H$	формула (5.16)
20	Годовая экономия абсолютная	$Э_Г$	руб	-	<b>135 994</b>	$Э_Г=З_П^C - З_П^П$	формула (5.18)
21	Годовая экономия относительная	$Э^{\%}_Г$	%	-	<b>18.92</b>	$Э^{\%}_Г=(Э_Г/З_П^C) \cdot 100$	формула (5.19)
22	Срок окупаемости	$C_о$	лет	-	<b>0.61</b>	$C_о=S_Б/Э_Г$	формула (5.20)

Утверждаю  
Главный инженер  
АО "Октябрьское"  
С.А. Филин  
12 06 2017г.



Утверждаю  
Ректор ФГБОУ ВО РГАТУ  
Н.В. Бышов  
12 06 2017г.



### АКТ

#### испытания смесителя – обогатителя концентрированных кормов

Комиссия в составе: заведующий кафедры «Электроснабжение», д.т.н., доцент Каширин Д.Е., заведующий кафедры «Электротехника и физика», к.т.н., доцент Фатьянов С.О., д.б.н., профессор Пашенко В.М., ст. преподаватель Полякова А.А., к.т.н., доцент Гобелева С.Н от Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» (ФГБОУ ВО РГАТУ) и главного инженера от АО «Октябрьское» Филина С.А. составили настоящий акт о нижеследующем.

Сотрудниками ФГБОУ ВО РГАТУ был разработан смеситель – обогатитель концентрированных кормов и комплект чертежей, выполненный по патенту на полезную модель № 166266.

В 2015 - 2017 годах в АО «Октябрьское» сотрудниками РГАТУ были проведены производственные испытания смесителя-обогатителя концентрированных кормов, разработанного на кафедре электроснабжения РГАТУ. Смеситель-обогатитель используется в технологическом процессе кормоприготовления для поголовья КРС.

Смеситель-обогатитель содержит рабочую камеру, представляющую собой зерновой бункер, в которой сверху загружаются компоненты кормосмеси, шнек, активатор процесса смешивания и раму. Во время работы смесь из нижней части бункера забирается шнеком и подается сверху в бункер на активатор смешивания, который в свою очередь разбивает сыпучий поток на две части и разбрасывает его по внутреннему объему бункера.

Перед проведением опытов предполагали, что на процесс смешивания будет влиять свойства зерновой массы, так как они зависят от влажности; состава и степени измельчения зерна. Поэтому влажность ячменя используемого для приготовления концентрированного корма, находилась в диапазоне от 11,3 до 12,6%, а влажность пшеницы от 14,5 до 15,6 %. Так как эти компоненты корма являлись основными.

Испытания проводили в период с 9.06.2017г по 8.09.2017 г. В результате испытаний было установлено, что средняя продолжительность технического цикла не превышает 3 минут. Продолжительность выгрузки готового продукта 1,5 минуты. Удельный расход электроэнергии составляет  $E=0,5$  кВт · ч/т. Степень однородности при работе с зерновыми компонентами  $\lambda=88,6\%$ . Установленная мощность электродвигателя, приводящего шнек не превышает 0,3 кВт, а установленная мощность механического активатора не превышает 0,05 кВт. За период производственных испытаний приготовлено 1250 кг концентрированного корма, отвечающего ГОСТу 32855-2-14.

От ФГБОУ ВО РГАТУ

заведующий кафедры

«Электроснабжение»,

д.т.н., доцент

 Д.Е.Каширин

заведующий кафедры

«Электротехника и физика»,

к.т.н., доцент

  
 С.О.Фатьянов

д.б.н., профессор

В.М. Пашенко

ст. преподаватель

 А.А.Полякова.

к.т.н., доцент

Н.Б.Гобелев

Главный инженер АО «Октябрьское»

С.А. Филин





Утверждаю

Инженер

ООО "Ока Молоко"

К.В. Мелехин

12 06 2017г.

Утверждаю

Ректор ФГБОУ ВО РГАТУ

Н.В. Бышов

12 06 2017г.

## АКТ

## испытания смесителя – обогатителя концентрированных кормов

Комиссия в составе: заведующий кафедры «Электроснабжение», д.т.н., доцент Каширин Д.Е., заведующий кафедры «Электротехника и физика», к.т.н., доцент Фатьянов С.О., д.б.н., профессор Пустовалов А.П., ст. преподаватель Полякова А.А., к.т.н., ст. преподаватель Нагаев Н.Б. от Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» (ФГБОУ ВО РГАТУ) и инженера цеха от ООО «Ока Молоко» Мелехина К.В. составили настоящий акт о нижеследующем.

Сотрудниками ФГБОУ ВО РГАТУ был разработан смеситель – обогатитель концентрированных кормов и комплект чертежей, выполненный по патенту на полезную модель № 166266.

В период с 5.12 2016 г. по 9.06 2017 г. в ООО «Ока Молоко» были проведены производственные испытания опытного образца смесителя – обогатителя концентрированных кормов.

Испытания были направлены на исследование работоспособности смесителя – обогатителя и определение его основных технологических характеристик.

Корма приготавливали по трем рецептам.

По рецепту №1 приготавливали корма для обогащения рациона КРС, смесь состояла из овса (92%) и ячменя (7%), с добавлением поваренной соли, жмыха подсолнечника, трикальция и премикса. Заранее подготовленные

зерновые компоненты, путем измельчения на молотковой дробилке целого зерна до гранулометрического состава с размером частиц от 1,5 до 3,5 мм дозировали в заданном соотношении, при этом компонент с меньшей массовой долей (ячмень) маркировали путем окрашивания.

Кормовая смесь рецепт №2 предназначена для свиней на откорме и состоит из дробленых зерновых компонентов и добавок: пшеница (23%); овес (10%); жмых подсолнечника (4%); отруби (60%); мел молотый (1,4%); соль (0,4%); премикс откормочный (1,2%). Маркированный контрольный компонент – овес.

Кормовая смесь №3 предназначена для кур-несушек и состоит из недробленых зерновых компонентов и добавок: пшеница (25%); овес (15%); просо (10%); жмых подсолнечника (16%); отруби пшеничные (32%); мел молотый (1,6%); костная мука (0,4%). Контрольный компонент – просо.

В результате проведения опытов удалось установить: что однородность смеси приготовленной по рецепту №1 составляет 88,55 %, по рецепту №2 соответственно 92,08%, а по рецепту №3 85,85%.

Качество всех приготовленных кормов отвечает требованиям ГОСТа 32855 – 2014.

За время проведения испытаний было приготовлено 9850 кг. комбикорма.

Среднечасовая производительность смесителя – обогатителя составила 0,7 т/ч, средняя продолжительность выгрузки готового комбикорма из смесительного бункера 1,5 мин.

От ФГБОУ ВО РГАТУ

заведующий кафедры

«Электроснабжение»,

д.т.н., доцент

заведующий кафедры

«Электротехника и физика»,

к.т.н., доцент

д.б.н., профессор

ст. преподаватель

 Д.Е.Каширин

С.О.Фатьянов

А.П. Пустовалов

А.А.Полякова.

к.т.н., ст. преподаватель  
Инженер ООО «Ока Молоко»  
Инженер по ТБ ООО «Ока Молоко»



Н.Б. Нагаев  
К.В. Мелехин  
А.С. Балабаев

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 166226

СМЕСИТЕЛЬ-ОБОГАТИТЕЛЬ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ  
КОРМОВ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева" (ФГБОУ ВО РГАТУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2016116473

Приоритет полезной модели 26 апреля 2016 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 31 октября 2016 г.

Срок действия патента истекает 26 апреля 2026 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Излиев* Г.П. Излиев



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I»  
Агроинженерный факультет

# СЕРТИФИКАТ

настоящий сертификат подтверждает, что

**ПОЛЯКОВА Анастасия Анатольевна**

действительно является участником

Международной научно-практической конференции

посвященной 100-летию кафедры сельскохозяйственных машин агроинженерного факультета

«Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I»

«Инновационные направления развития технологий и технических средств механизации сельского хозяйства»

Россия, г. Воронеж, 25 декабря 2015 г.

Тема научного доклада: Исследование производительности смесителя - обогатителя концентрированных кормов.

Председатель оргкомитета конференции,  
ректор ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ

Н.И. Бухтояров

Зам. председателя оргкомитета конференции,  
зав. кафедрой сельскохозяйственных машин  
ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ

В.И. Орбинский



Министерство сельского хозяйства Российской Федерации  
 Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования  
 «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А.Костычева»  
**Совет Молодых Учёных ФГБОУ ВО РГАУ**



# СЕРТИФИКАТ

вручается

**Поляковой Анастасии Анатольевне**

*За активное участие во Всероссийской научно-практической  
 конференции «Инновационные и научно-технические разработки и  
 исследования молодых учёных»*

Председатель Совета молодых учёных

**И.Ю. Богданчиков**

18 марта 2016 год

г. Рязань

СЕРТИФИКАТ

Международная научно-практическая конференция  
**«ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ  
 НАУКИ»**

Настоящий сертификат подтверждает участие в конференции

с докладом

*«К вопросу определения производительности  
 шнекового смесителя-обогапителя  
 концентрированных кормов»*  
**обладатель сертификата**

**ПОЛЯКОВА**

**Анастасия Анатольевна**

адрес публикации материалов: [www.science-perm.ru](http://www.science-perm.ru)

Секретарь конференции

Руководитель НИЦ  
 «Инноватика»



П.Е. Шинкаренко

Т.М. Сигитов

г. Екатеринбург, 15 апреля 2016 года



# СЕРТИФИКАТ

участника II Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и молодых ученых

## «Перспективы развития

## сельскохозяйственного производства»

посвящённой 65-летию со дня основания инженерного факультета НГСХА  
10 июня 2015 г., г. Нижний Новгород, Россия

*Д. В. Сенева, Д. Э. Кошуров*

Ф. И. О. участника

*Проведение мероприятия завершено*

*Сверхосуществуи выполненая организационная работа*

название документа



*[Handwritten signature]*

Ректор НГСХА, д. б. н., профессор

Самоделкин А. Г.

