

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
ИМПЕРАТОРА ПЕТРА I

На правах рукописи

Дружинин Роман Александрович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА  
УДАРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации  
сельского хозяйства

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор В.В. Труфанов

Воронеж – 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ФУРАЖНОГО ЗЕРНА.....	12
1.1. Требования к комбикормам по крупности частиц.....	12
1.2. Анализ способов измельчения фуражного зерна .....	14
1.3. Анализ работы молотковых дробилок .....	16
1.4. Измельчители зерна ударно-центробежного действия .....	19
1.5. Приемы и способы увеличения эффективности УЦИ.....	28
1.5.1. УЦИ с сепарацией в гравитационном поле .....	28
1.5.2. УЦИ с промежуточной сепарацией за счет воздушного потока ....	30
1.5.3. УЦИ с промежуточной сепарацией в центробежном поле .....	32
1.6. Особые конструкции рабочих органов .....	34
1.7. Гранулометрический состав продукта .....	36
1.8. Теоретические исследования процесса измельчения материала .....	37
1.8.1. Затраты энергии на измельчение материала.....	38
1.8.2. Критическая скорость разрушения тела.....	41
1.9. Анализ литературного обзора.....	45
1.10. Выводы.....	46
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ЗЕРНА В УДАРНО - ЦЕНТРОБЕЖНОМ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ .....	47
2.1. Определение скорости перемещения зерна по вертикальной поверх- ности диска и зубу ножа.....	47
2.2. Определение производительности УЦИ.....	57
2.3. Определение параметров, влияющих на степень измельчения зерна....	60
2.4. Выводы.....	64
3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДО- ВАНИЙ .....	65
3.1. Программа экспериментальных исследований .....	65
3.2. Оборудование, материалы и приборы, применяемые при проведении исследований .....	65

3.3. Методика проведения экспериментальных исследований.....	71
3.3.1. Определение основных показателей процесса измельчения.....	71
3.3.2. Определение скорости рабочих органов.....	73
3.3.3. Определение зазора между лопатками.....	74
3.3.4. Методика определения энергоемкости процесса измельчения.....	74
3.4. Методика оценки точности измерений.....	75
3.5. Выбор факторов.....	77
3.6. Методика планирования эксперимента.....	78
3.7. Статистическая оценка результатов эксперимента и определение значимости коэффициентов регрессии.....	82
<b>4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ.....</b>	<b>85</b>
4.1. Зависимость удельных затрат энергии от скорости измельчающих дисков.....	85
4.2. Изменение удельной энергии измельчения от производительности, зазора между дисками и количества ножей.....	95
4.3. Зависимость модуля помола от зазора между дисками и величины подачи материала.....	97
4.4. Изменение удельной энергии и энергоемкости процесса измельчения от модуля помола и зазора между дисками.....	98
4.5. Сравнительная оценка результатов измельчения ячменя молотковой дробилкой КДУ-2 и ударно-центробежным измельчителем.....	101
4.6. Выбор рациональных значений факторов при анализе функций отклика.....	102
4.7. Зависимости производительности (Q) УЦИ от скорости измельчающих дисков.....	104
4.8. Выводы.....	105
<b>5. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРОВЕРКА И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДАРНО - ЦЕНТРОБЕЖНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ.....</b>	<b>107</b>
5.1. Результаты производственной проверки опытного образца ударно-центробежного измельчителя.....	107

5.2. Расчет экономической эффективности УЦИ.....	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	113
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	116
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 – РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПЛАНУ ХАРТЛИ ДЛЯ ЧЕТЫРЕХ ФАКТОРОВ.....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 – УРАВНЕНИЯ ПОШАГОВОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ОПИ- САНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ (AUD).....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 – КВАДРАТИЧНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ И КОНТУРНЫЕ ГРАФИКИ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ (AUD) ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬ- ЧЕНИЯ ЗЕРНА ОТ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ.....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 – УРАВНЕНИЯ ПОШАГОВОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ОПИ- САНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГИЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА (ЭИЗ).....	145
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 – КВАДРАТИЧНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ И КОНТУРНЫЕ ГРАФИКИ ЭНЕРГИИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА (ЭИЗ) ОТ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ.....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ 6 – УРАВНЕНИЯ ПОШАГОВОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ОПИ- САНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ МОДУЛЬ ПОМОЛА ЗЕРНА (М)...	152
ПРИЛОЖЕНИЕ 7 – КВАДРАТИЧНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ И КОНТУРНЫЕ ГРАФИКИ МОДУЛЯ ПОМОЛА (М) ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА ОТ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ 8 – УРАВНЕНИЯ ПОШАГОВОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ОПИ- САНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ СТЕПЕНЬ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА ( $\lambda$ ).....	159
ПРИЛОЖЕНИЕ 9 – КВАДРАТИЧНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ И КОНТУРНЫЕ ГРАФИКИ СТЕПЕНИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА ( $\lambda$ ) ОТ РАЗЛИЧНЫХ ПА- РАМЕТРОВ.....	160
ПРИЛОЖЕНИЕ 10 – ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ДВУХ-	

МЕРНЫХ ГРАФИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ.....	166
ПРИЛОЖЕНИЕ 11 – АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ В КФК ИП «СМОЛЯКОВ Г.А.».....	168
ПРИЛОЖЕНИЕ 12 – СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС...	169

## ВВЕДЕНИЕ

Согласно принятой в РФ концепции развития животноводческого комплекса до 2020 г. определяется потребность в использовании фуражного зерна и оценивается в 38,0 млн. т. К основным потребителям кормового зерна относятся такие отрасли, как скотоводство (48 %), свиноводство (26 %) и птицеводство (20 %).

В современных условиях аграрии животноводческой специализации стали отказываться от приобретения комбикормов и налаживают их производство на местах. Данный факт такой организации кормопроизводства позволяет значительно снизить затраты на транспортировку как сырья, так и готового итогового продукта, а также оптимальнее использовать ресурсы местных товаропроизводителей.

К сожалению, ряд недостатков и устаревшее, в т.ч. несовершенное оборудование привели к факту, что более 55 % используемого и потребляемого аграриями животноводства зерна, используемого в кормовых целях дается животным в виде однородного (монокорма), что влияет на снижение эффективности его использования [61].

Правильность приготовления кормов для животноводства в значительной мере влияет на эффективность производства получаемой продукции животноводческой отрасли.

При определении доли использования концентрированных кормов в общем балансе кормопроизводства присутствует показатель в 30,2-35 %.

Значимым фактором является способ измельчения, как ведущий в процессе подготовки зерновых кормовых культур к скармливанию скоту.

Данный процесс представляется как очень энергоемкий и трудоемкий и по среднестатистическим данным составляет порядка 60 % от суммарных затрат труда в заготовке кормов и приготовлении кормосмесей.

На сегодняшний день в качестве основного оборудования для измельчения фуражного зерна в большинстве хозяйств используются дробилки молотковые.

Сущность проблемы заключается в том, что увеличиваются современные требования к качеству зерна, получаемого в процессе измельчения, а также необ-

ходимости снизить к минимуму металло и энерго затраты. Однако используемые в современности традиционного типа измельчающие устройства и теоретические знания науки и техники в данной области не позволяют обеспечить усовершенствование данного процесса.

Принципиально новым, в отличие от молотковых дробилок, является принцип работы ударно - центробежных измельчителей, в основе которых заложен следующий принцип. В центробежном поле зерну придается движение, в результате удара о преграду (неподвижную или движущуюся) зерно разрушается.

Измельчительный процесс в таких отраслях, как керамическая, строительная и других, измельчители такого рода активно используются, вследствие чего снижаются энергозатраты [12, 21, 56, 61].

Несмотря на вышеуказанное, при процессе измельчения фуражного зерна использование данных видов измельчителей не практикуются. Основанием является низкое качество получаемой продукции, в частности его неоднородность, и недостаточность теоретической и экспериментальной базы исследования.

Таким образом, актуальным является рассмотрение вопроса о разработке измельчителей ударно-центробежного типа, которые позволяют получить качественный, более однородный состав итогового готового кормового продукта, при значительном снижении энергозатрат процесса. Результатом может быть новая конструктивная разработка с улучшенными рабочими органами, позволяющая реализовать новую технологическую схему разрушения зерна.

Настоящая работа посвящена совершенствованию конструкции и работы ударно-центробежного измельчителя зерна путем обоснования его рациональных конструктивных и режимных параметров.

#### Степень разработанности темы.

Проблемами совершенствования процесса измельчения фуражного зерна занимались российские и зарубежные ученые. Теоретические и практические разработки по измельчению зерна отражены в трудах: С.В. Золотарева, С.В. Денисова, С.В. Мельникова, В.А. Елисеева, Н.С. Дорофеева, Н.Е. Авдеева, В.В. Спорыхина, А.Р. Демидова, В.П. Горячкина, В.В.Труфанова, А.А. Сундеева, В.М.

Опрышко, М.Н. Изюмцевой, Ю.Н. Баранова; W. Kruger, E. Silver, A. Hendrix, P. Риттингер, Ф. Кик, Ф.С. Бонд, Р. Гийо, А.К. Рунквист, П.А. Ребиндер, А.А. Гриффитс, Г. Румпф, Д. Беренс, Е. Рейнерс, В. Эбергардт и др. Данными авторами рассматриваются только отдельные конструктивные параметры дробилок, что не учитывает комплекс технологических параметров агрегатов, удовлетворяющих современным требованиям сельскохозяйственного производства.

При анализе теоретической базы исследований на основе литературных источников было выявлено, что проблемы практики использования современных измельчителей зерновых кормов требует дальнейшего изучения и совершенствования для оптимизации параметров энергозатрат.

Имеющиеся в большинстве аграрных хозяйств измельчители технически не совершенны, в частности имеют ряд недостатков основными из которых являются: не возможность получения продукта надлежащего качества с более выровненным гранулометрическим составом, значительные габариты, большое содержание пылевидной фракции в готовой продукции. Таким образом устранение вышеотмеченных недостатков возможно при разработке новых типов измельчающих машин, одной из которых является ударно-центробежный измельчитель.

Цель исследований – Повысить эффективность процесса измельчения фуражного зерна за счет усовершенствования ударно–центробежного измельчителя.

Задачи исследования:

1. Разработать новое техническое решение ударно–центробежного измельчителя.
2. Разработать аналитические зависимости скорости движения зерна по вертикальной поверхности диска и основанию зуба ножа, а также математическую модель удельной энергоемкости процесса измельчения зерна в УЦИ.
3. Обосновать теоретически и экспериментально рациональные конструктивные параметры, а также режимы работы опытного измельчителя, позволяющие получать материал необходимого качества.
4. Рассчитать экономическую эффективность использования предложенного технического решения.



Объектом исследований является технологический процесс измельчения фуражного зерна в УЦИ, его элементы и основные рабочие органы.

Предмет исследований – закономерности влияния основных конструктивных параметров УЦИ на эффективность процесса дробления фуражного зерна.

Научную новизну диссертационной работы составляют:

- новое техническое решение конструкции УЦИ (патент РФ № 2438782);
- аналитические зависимости скорости движения зерна по вертикальной поверхности диска и основанию зуба ножа, а также математическая модель удельной энергоёмкости процесса измельчения зерна в ударно–центробежном измельчителе;
- теоретически и экспериментально обоснованные зависимости производительности УЦИ, учитывающие его конструктивные и режимные параметры, повышающие эффективность процесса измельчения зерна, позволяющие получить материал необходимого качества.

Теоретическая и практическая значимость.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы при проектировании, настройке и эксплуатации ударно–центробежных дробилок, а также в учебном процессе. Применение предложенной конструкции ударно–центробежного измельчителя позволяет получить готовый продукт зоотехнически требуемого качества с одновременным снижением удельной энерго– и металлоёмкости в более чем 1,5 раза при сравнении с существующей и принятой технологией процесса измельчения фуражного зерна.

Методологическая, теоретическая и экспериментальная база исследований.

Теоретическая часть исследований выполнена с использованием закономерностей и методов теоретической механики, сопротивления материалов и математического анализа. Экспериментальные исследования УЦИ проведены на основании теории планирования многофакторного эксперимента. Результаты обрабатывались с помощью методов математической статистики и пакета прикладных программ.

При проведении экспериментальных исследований ударно–центробежного измельчителя в лабораторных условиях кафедры механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции Федерального государственного

бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» использованы стандартные и частные методики с применением математического моделирования, современных приборов и оборудования. Обработку экспериментальных данных производили с использованием пакета программ Microsoft Office, Statistica 6, Mathcad 15, Maple 14 и др.

Работу выполняли в соответствии с перспективным планом научно исследовательской работой федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВПО «ВГАУ»). Тема №4.2 «Инновационные направления в механизации производства продукции животноводства».

На защиту выносятся:

- конструктивно–технологическая схема УЦИ;
- сбалансированные конструктивные параметры и режимы работы предложенного технического решения;
- аналитические зависимости процесса измельчения зерна в УЦИ;
- результаты экспериментальных исследований рабочего процесса УЦИ.

Апробация и реализация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы докладывались на конференциях: профессорско-преподавательского состава агроинженерного факультета ФГБОУ ВПО «ВГАУ» в 2010–2014 годах; всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в ФГБОУ ВПО «ВГЛТА» в 2010 году; международной заочной научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика» в ФГБОУ ВПО «ВГЛТА» в 2014 году. Результаты работы использованы в КФК ИП «Смоляков Г.А.» Хохольского района Воронежской области.

Отдельные результаты внедрены в учебный процесс при изучении измельчения зерна в ФГБОУ ВПО «ВГАУ».

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, в том числе 5 – в изданиях центральной печати, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, общим объемом 2,50 п. л (авторских 1,20 п. л.), получен 1 патент на изобретение РФ № 2438782 «Устройство для измельчения сыпучих материалов».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, включающего 177 наименования, из них 7 на иностранных языках, и приложений. Основная часть диссертации изложена на 133 страницах компьютерного текста, включая 43 рисунка и 15 таблиц.

## 1. ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ФУРАЖНОГО ЗЕРНА

### 1.1. Требования к комбикормам по крупности частиц

В основе рациона питания животных и птицы используются комбинированные, а также концентрированные корма, рационный процент которых может достигать более 50 % [5, 56, 61, 66, 67].

В аграрных хозяйствах Российской Федерации ежегодно расходуется для приготовления кормов животноводства фуражного зерна порядка сорока - пятидесяти миллионов тонн [12, 56, 61, 70]. Измельчение зерна является ведущей операцией в процессе приготовления комбинированных кормов, на долю которого приходится расход электроэнергии до 73 % общего технологического процесса [61].

Измельчение зернового сырья обусловлено физиологией сельскохозяйственных животных, так как скорость переработки частиц кормов желудочным соком прямо пропорционально общей площади их поверхности. При измельчении зерна образуются множество частиц с большей общей поверхностью, что способствует усвоению питательных веществ. На продуктивность животных оказывает значительное влияние степень измельчения продукта.

При комплексном анализе трудов отечественных и зарубежных исследователей стандартами были установлены, а затем в дальнейшем регламентированы для различных видов кормов размеры частиц готового продукта, при этом учитывались половозрастные группы сельскохозяйственных животных [9, 13, 16, 21, 25, 26, 30, 51, 78, 105, 137].

Так, по данным вышеуказанных источников, продуктивность свиней возможна при их кормлении кормами тонкого помола, при этом фракция частиц должна варьироваться от 0,5 до 1,0 мм. При выращивании КРС эффективным является использование кормов среднего помола от 1,0 до 1,9 мм.

Для кормления птиц необходимо использовать корм помола крупного, при требуемом размере частиц от 1,8 до 2,5 мм. При изменении вышеуказанных размеров, а так же наличие в кормах очень мелкой (пылевидной) фракции может привести к спаду продуктивности на 20 - 30 % продуктивности скота. [9, 16, 21, 25, 30, 51, 78, 136].

Проведенный нами анализ литературных научных источников позволил сделать комплексный вывод о том, что при скармливании скоту тонко и мелко измельченного корма в последствии будет приводить к снижению, как самого прироста, так и негативному влиянию на процессы пищеварения, в том числе - заболевания органов пищеварительной системы.

Таким образом, оценку эффективность измельчения зерна, как материала, нужно оценивать как по показателям энергетичности, так и по показателям качества, т.е. по неоднородности получаемого готового корма (продукта), которое оценивается присутствием целых зерен, а также наличием мелких частиц с размерами до 0,25 мм.

Эффективность скармливания можно повысить при оптимизации получаемых размеров частиц продукта, т.е. зерна для отдельных видов животных соответственно, согласно с зоотехническими требованиями. Переизмельчение корма негативно сказывается на здоровье и продуктивность животных, увеличивает энергоемкость процесса.

На заводах и предприятиях по производству кормов, в хозяйствах для получения фуражных кормов и используют для измельчения зерна станки для плющения, дезинтеграторы, молотковые дробилки, и др.

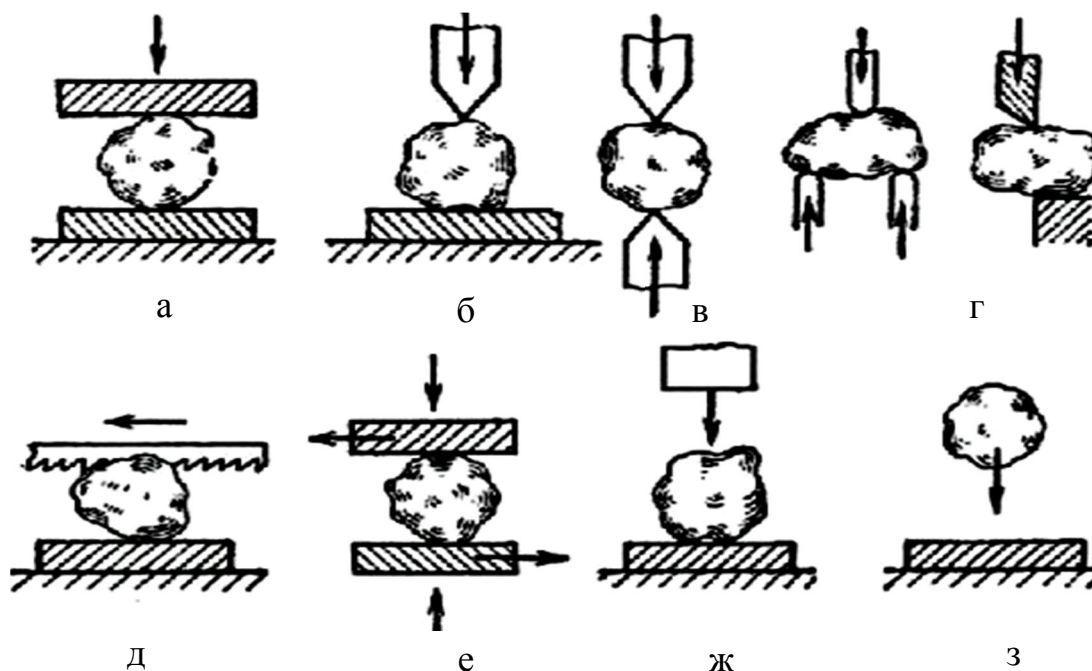
Наибольшее распространение получили дробилки молотковые, так как они просты в устройстве. Несмотря на это преимущество у них есть ряд значимых недостатков, к которым можно отнести энергоемкость (17-25 кВт\*ч/т), разнородный гранулометрический состав получаемого готового продукта и т.д. [17, 37, 44, 61, 65, 95, 147].

В последние годы в молотковых дробилках при активизации процесса совершенствования измельчения зерна можно отметить ряд путей по снижению удельных затрат электроэнергии на само измельчение зерна и рост качества итогового продукта. К таковым можно отнести: разработку принципиально новых технологических схем процесса измельчения, а также возможность конструктивной разработки принципиально инновационных конструкций основных рабочих органов используемых измельчителей, из числа ударно-центробежных, которым уделяется особое внимание [35,45, 61].

## 1.2. Анализ способов измельчения фуражного зерна

В предыдущем разделе нами отмечалось, что измельчение компонентов – является очень важной и энергоемкой операцией в общей технологии производства и подготовки кормов [37]. Данная операция непосредственно влияет на различного рода затраты и определяет качественные характеристики комбикормов, готовой продукции. [41, 62, 86, 132].

В научной и практической литературе, в производстве непосредственно выделяют следующие способы измельчения. К ним относят: раскалывание, раздавливание, резание, свободный удар, разламывание, истирание, распиливание, стесненный удар и др., что приведено на рисунке 1.1. [12, 67, 99, 140]. От способа измельчения зависят эффективность процесса и качество получаемых измельчённых кормов.



а – раздавливание; б – раскалывание; в – разламывание; г – резание; д – распиливание; е – истирание; ж – стесненный удар; з – свободный удар

Рисунок 1.1 – Виды дробления зерна

Выбор способа измельчения зависит от физических, механических свойств материала измельчения, от параметров требуемых получить в итоговой продукции. На рисунке 1.1. б показан процесс раскалывания. Резание представлено на

рисунке 1.1. г, распиливание на рисунке 1.1. д соответственно. При необходимости получения продукта тонкого измельчения используют прием истирания, который представлен на рисунке 1.1. е, совмещая с приемом раздавливания - рисунок 1.1. а и ударом (рисунок 1.1 ж, з) соответственно [26, 61, 97, 166].

Зерно фуражного назначения проходит процесс измельчения в преимуществе случаев ударом и раздавливанием, при участии некоторых других способов разрушения. В трудах ряда исследователей отмечается доказательство того, что минимальная энергоемкость складывается в процессе удара [10, 64, 134, 135, 136].

Так, в исследованиях Д. Беренса, проведенных на довольно хрупких материалах, установлен факт того, что работы на измельчение при ударе составляют до 42 % от работы на измельчение при раздавливании. Данный факт подтверждается трудами С.В. Мельникова и ученого - исследователя Ф.Г. Плохова.

Выбор в пользу ударного измельчения предлагается в трудах В.А. Денисова. Он считает, что эффективность измельчения определяется и зависит, от времени приложения внешних сил и температурного режима материала измельчения. Ученым Барабашкиным В.П. отмечается, что, стоимость машин (удельная) с ударным действием ниже, чем вальцовых, которые работают на основе принципа раздавливания, до 2,0 раз, масса снижается в 4-е раза, мощность двигателей до 1,6 раз.

Таким образом, на современном этапе развития техники и технологий, имеющееся оборудование для измельчения зерна однообразно. Принцип его действия осуществляется за счет разрушения зернового материала путем усилия сжатия и сдвига. К таковым относятся молотковые дробилки и вальцовые мельницы. Однако, в настоящее время в процессе измельчения зернового материала, на спец. предприятиях актуальными становятся ударно - центробежные измельчители, к числу которых следует отнести: центробежные дробилки, дисмембраторы, дезинтеграторы, при необходимости получения продукции тонкого помола - мельницы струйные и коллоидные и пр. [34, 61, 79, 140].

### 1.3. Анализ работы молотковых дробилок

Молотковые дробилки широко используются в аграрном производстве комбикормов благодаря несложности конструкции, надежности, простоте обслуживания.

Данные измельчители производят продукт с равномерным измельчением, имеют легкое извлечение из дробильной камеры, возможность изменения степени измельчения, простое управление процессом, не сложную замену вышедших из строя деталей и возможность измельчения большого набора материалов [53, 97, 176].

Рядом ученых (В.И. Сыроватка, Н.С. Дорофеев, В.Р. Алешкин, П.М. Рошин, Л.А. Гафнер) и другими, изучавших молотковые дробилки, [24, 26, 27, 41,42, 48, 49, 50, 51, 54, 100, 140, 167], было установлено следующее:

- оптимальное значение зазора между решетом и концами молотков составляет не больше 3,5 мм;
- преимущественную эффективность по сравнению с другими имеют прямоугольные или со ступенчатыми концами молотки (пластинчатые), так, наилучшее рекомендуемое расстояние между молотками должно составлять в среднем 8 мм;
- решето, в молотковых дробилках должно соответствовать толщине от 1,5 до 3,0 мм. В случае, если решета имеют толщину 3 мм и более они хуже просеивают, а если меньше 1,5 мм то снижаются прочностные характеристики;
- самыми эффективными определяются решета, имеющие чешуйчатую поверхность.

К конструкторским и научным достижениям современности необходимо отнести разработку значительного количества модифицированных молотковых дробилок, имеющих массу отличий. В частности изменёнными кинематическими, технологическими, а также конструктивными параметрами.

В процессе изготовления качественных комбикормов на заводах, предприятиях традиционно используются дробилки, имеющие производительность от 4 т/ч



и более. К таковым относят: А1-ДДП, ММ-140, А1-ДМР-12, А1-ДДР, А1-ДМР-20, и др.

Большинство молотковых дробилок, выпускаемых отечественными предприятиями, относятся к дробилкам закрытого типа. Всем им присущ недостаток, это получение неоднородного гранулометрического состава итогового готового продукта, т.е. наличие частиц разного размера: может присутствовать как пылевидная фракция, так и целые зерна.

Это обусловлено тем, что при средней скорости продукта в 0,5 окружной скорости конца молотка в зоне контакта с молотками, а в зоне контакта с поверхностью решета она слишком высокая и может составлять до 0,2.

Частицы крупных размеров будут располагаться ближе к поверхности решета, таким образом, затрудняя возможность просеивания частиц, достигших необходимых проходных размеров. Это самосортирование в последствии может привести к переизмельчению продукта, что будет вызывать рост неоднородности гранулометрического состава, а как следствие увеличение затрат энергии на процесс.

Экспериментальные исследования [28, 85] показывают на сколько эффективно измельчение в много стадий при применении промежуточной сепарации. Так, при использовании двух стадий измельчения увеличение диаметра отверстий решета в дробильном аппарате мало влияет на изменение состава фракций готового продукта. В трудах В.А. Афанасьева [8] отмечается, что при увеличении диаметрального размера отверстий решета с 3,0 до 5,0 мм, усредненный размер частиц опытного сырья- ячменя незначительно увеличивается с 0,9 до 1,0 мм. При использовании одностадийного способа с 1,0 до 1,8 мм. Данные исследования свидетельствуют, что при двухстадийном измельчении получается значительно более выровненный гранулометрический состав получаемого готового продукта.

По данным А.А. Сундеева, В.А. Елисеева, и других, что отмечается в источниках [47, 131, 132, 133-136] подтверждается факт, что при увеличении диаметра ротора с 400 до 1200 мм, прямо пропорционально увеличивается общая производительность дробилки.

Однако в этом случае происходит увеличение расхода энергии. Также, вышеступенными авторами выявлено и доказано, что при скорости молотков (окружной) от 80 до 100 м/с, оптимальные размеры ротора будут находиться в пределах от 0,55 до 0,7 м [123, 124].

Молотковые дробилки можно классифицировать и по способу питания: дробилки с радиальной и осевой подачами. От питания будут зависеть некоторые факторы: технологические, конструктивные, динамические.

Родоначальником исследования в области влияния способа питания на работу молотковой дробилки влияния был W. Kruger [173].

В его трудах отмечено, что на эффективность работы молотковой дробилки не влияет способ загрузки и определяется из конструктивных параметров.

Несмотря на это, при детальном изучении этой проблемы, отмечается ряд противоречий.

В частности при изучении трудов В.В. Спорыхина, А.М. Тарасенко, и других, наоборот отмечается эффективность загрузки центральной. В частности, при проведении испытаний экспериментальной дробилки при центральной загрузке производительность была от 1,5 до 3 раз больше чем при радиальной, при этом расход энергии был практически неизменным.

Одну из центральных ролей при измельчении зерна в агрегатах закрытого типа принадлежит решету. Решето необходимо для сепарирования итогового продукта и, с помощью него регулируется степень измельчения.

В ряде трудов отмечается, что при окружной скорости молотков от 55 до 100 м/с на измельчение ударом приходится от 11,7 до 17 % энергии. Остальное количество приходится на измельчение истиранием.

В трудах E. Silver, A. Hendrix, опытным путем доказано, что оптимальным значениям окружной скорости будут соответствовать значения от 36 до 45 м/с [174, 175, 177].

Г.И. Шуба, отмечает, что при увеличении окружной скорости молотков наблюдается и увеличение производительности и энергии. По его экспериментальным данным скорость в 82 м/с является оптимальной.

Однако, А.А. Зеленев рекомендует скорость до 100 м/с. Это же отмечается и у В.М. Прощак [121] и у В.Т. Плохова. При росте скорости молотков наблюдается рост затрат на энергию, что зависит от предела текучести используемых материалов [163, 171, 172].

В трудах С.В. Мельников установлено, что полное разрушение всех зерен происходит на скорости более 100 м/с, за один удар. Он рекомендует проводить процесс измельчения зерна за счет воздействия ударом многократно в молотковых дробилках [104].

В целом, технический и технологический процесс измельчения зерна является сложным и малоизученным. Имеющийся теоретический и практический опыт не дает полноценной возможности определить скорость удара его численным значением и т.д., что требует принципиально новых технических решений и разработок.

#### **1.4. Измельчители зерна ударно-центробежного действия**

На современном этапе многих исследователей интересует проблема применения измельчителей, конструктивно и технологически отличающихся от молотковых, в частности - центробежных дробилок.

В основе их действия - принцип разгона зерновки при воздействии центробежных сил инерции, с ударом о преграду. Однако, большинство измельчителей характеризует низкая энерго- и металлоемкость, среднее качество полученного продукта, пониженный уровень шумового воздействия и вибрации, и др.

В настоящее время использование данного вида измельчителей определяется низким исследованием конструкционных параметров, а также отсутствием принятых методик расчета параметров и режимов работы их основных рабочих органов. Помимо этого их неравномерность гранулометрического состава получаемого продукта и значительными сложностями при изготовлении [38, 72, 93, 116, 117, 118, 161].

На основе проведенных исследований и анализа литературы, в т.ч. патентной, можно выделить различные конструкции УЦИ, сведенные в классификационную схему рисунок 1.2.



Рисунок 1.2 – Классификационная схема УЦИ

В.Н. Блиничев для дробления материалов в хим. пром. использовал измельчение в трехступенчатых дробилках (каскадное), что представлено на рисунке 1.3 в.

Первым создателем УЦИ был В.В. Товаров, Конструкция его центробежной дробилки представлена на рисунке 1.3. б. Ее, ротор расположен на вертикальном валу и имеет разгонные лопасти.

Сырье поступает в ротор, затем берется лопастями, затем под действием центробежной силы инерции, поступает на отбойные плиты. Выгрузка готового материала происходит под действием сил тяжести. Однако, данная конструкция не получила широкого использования из-за повышенной неоднородности получаемой продукции, в частности - гранулометрического состава.

В производственных условиях подобные конструкции не эффективны, т.к. характеризуются плохой регулировкой гранулометрического состава, проводимой на основе изменения частоты движения ротора.

Аналогичная конструкция УЦИ для измельчения материала была изучена В.А. Елисеевым в 60-х годах. Однако, получаемый продукт был неоднороден по своему составу и данная конструкция широко не использовалась.

В.А. Денисов, повышая однородность получаемого продукта в центробежных дробилках предложил использовать неоднократное ударное нагружение материала с промежуточной сепарацией. На рисунке 1.3. г представлена дробилка, которая имеет цилиндрический корпус, а также загрузочные и выгрузные отверстия. [37].

В данной дробилке гранулометрический состав получаемого продукта можно регулировать за счет частоты вращения ротора, а также диаметра отверстий решет [50, 69].

В современной промышленности используются дезинтеграторы и дисмембраторы при необходимости получения готового продукта тонкого измельчения [1, 2, 3 34, 42-44, 61, 166].

Однако, при сравнении с дезинтеграторами и дисмембраторами, центробежные дробилки имеют ряд недостатков, к которым можно отнести: конструкцию отбойных дек, которая не может обеспечить выброс измельченного продукта из района измельчения, поэтому зерно измельчается не полностью, а росте подачи увеличивается и неоднородность комбикорма [54, 78, 150].

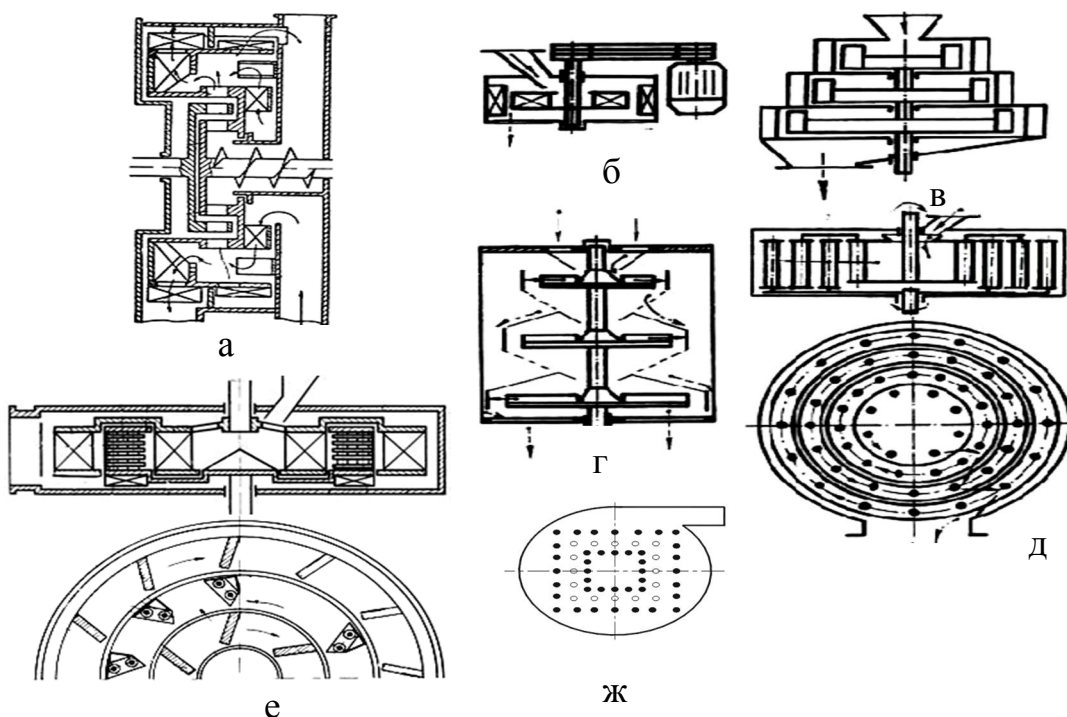
Анализируя исследования теоретиков и практиков, что при изготовлении продукта крупного и среднего помола рекомендуется использовать двухступенчатые УЦИ, которые представлены на рисунках 1.3. а, в, е., однако при необходимости получить продукт тонкого помола, эффективными являются многоступенчатые дробилки, которые представлены на рисунке 1.3. д [98, 157, 158, 159].

Все конструкции дезинтеграторов имеют цилиндрический корпус, в нем располагаются роторы, вращающиеся противоположно.

В большинстве случаев, ножи на роторах конструкционно расположены по окружности, на разных радиусах и имеют определенный зазор.

В практических разработках Ю.Н. Баранова предлагается конструкция, в которой ножи, измельчающие материал находятся на сторонах квадрата, что представлено на рисунке 1.3. ж. Автор утверждает, что такое размещение

ударных элементов способствует получению рабочих камер переменного сечения. Данная конструкция изменяет в лучшую сторону нагрузки на измельчаемое сырье, а также способствует интенсификации измельчения, как процесса и создает возможности для роста производительности. Происходит рост количества взаимодействующих частиц сырья между собой.



а – дезинтегратор с промежуточной воздушной сепарацией по замкнутому циклу; б – дробилка В.В. Товарова; в – каскадная дробилка; г – трехступенчатая дробилка с промежуточной сепарацией; д – пальцевый дезинтегратор; е – дезинтегратор с промежуточной сепарацией на плоских измельчающих элементах; ж – дезинтегратор с расположением пальцев по квадрату.

Рисунок 1.3 – Конструктивно-технологические схемы УЦИ

На рисунке 1.4. представлена схема движения зерна в рабочей камере на примере пальцевого или штифтового дезинтегратора.

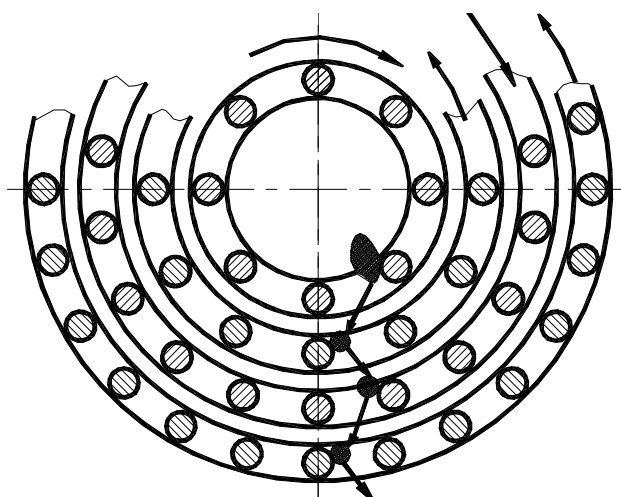


Рисунок 1.4 – Движение элемента в дезинтеграторе

Первоначально в дезинтеграторах измельчающие составляющие конструкции были изготовлены в форме круглого сечения, что представлено на рисунках 1.3. д и 1.4. В последствии стали применяться элементы измельчения плоской формы, имеющие прямоугольное и 3-е угольное сечение (рисунок 1.3. в, е).

Элементы плоской формы способствуют увеличению скорости вылета (абсолютной) частиц, т.к. участвуют в двигательном процессе по поверхности элемента, что способствует получению оптимального направления встречи частицы с режущим элементом, что в последствии исключает возврат поступающего сырья назад на предшествующий ряд рабочих органов. Помимо этого, элементы плоской формы имеют значительно высокую износостойкость, по сравнению с молотками, однако меньшую ремонтпригодность [61, 133].

В современной практике измельчения более распространены УЦИ с вертикальной осью вращения. Изначально исходные конструкции дезинтеграторов были выполнены с горизонтальной вращательной осью [61, 155, 147].

В старых конструкциях УЦИ выгрузка полученного продукта производилась самотеком, на основе гравитационных сил и представлена на рисунках 1.3 б, в.

Учитывая повышенную транспортирующую способность дезинтеграторов и дисмембраторов выгрузка полученного материала производится при действии центробежных сил инерции и воздушного потока, что представлено на рисунках 1.3. в, е, д.

При рассмотрении некоторых вариантов УЦИ, необходимо отметить, что в них выгрузка получаемого продукта производится транспортером [83, 121, 122].

Ряд современных конструкций УЦИ выполняют с применением промежуточной сепарацией зерна и без нее.

Процесс сепарации продукта в некоторых случаях может проводиться, в том числе, и при помощи воздушного потока, что представлено на рисунке 1.3. а, а также гравитационных сил на решетках и так далее (рисунок 1.3. г), в т.ч. и за счет инерционных центробежных сил (рисунок 1.3. е).

В отечественной промышленности первые модели УЦИ хорошо зарекомендовали себя в производстве комбикормов, с качеством тонкого измельчения солей и некоторых зерен в пленке [166, 167].

В нижеприведенной таблице обозначены основные характеристики используемых измельчающих моделей. В таблице приведены ДБ-5, А1-ДДШ, ИЛС-5, ДРЦ-5 [61].

Таблица 1.1 – Основные технические показатели измельчителей фуражного зерна

Показатели	Молотковые		Ударно-центробежные		
	ДБ-5	КДМ-3	А1-ДДШ	ИЛС-5	ДРЦ-5
Производительность (ячмень, W=13%), т/ч	4,00	2,50	3,65	4,00	4,00
Установленная мощность, кВт	30	23,1	35	30	26
Модуль помола, мм	1,35	1,24	1,15	1,65	1,20
Степень измельчения	2,69	3,39	3,65	2,55	3,50
Удельная энергоемкость, кВт·ч/т·λ	3,24	3,54	2,56	2,87	1,81
Расход энергии, кВт·ч/т	7,5	12,0	9,6	7,5	6,5
Масса, кг	900	1000	1480	600	500
Удельная металлоемкость, кг/(т/ч)	225	512	405,8	150	125
Содержание пылевидной фракции, %	13-15	15-17	Нет данных	Нет данных	12-15
Выход целых зерен, %	6-8	4-6	Нет данных	Нет данных	1-2

При проведении анализа данных вышеприведенной таблицы можно отметить следующее: самая низкая энергоемкость измельчения присуща ДРЦ-5, который обеспечивает средний помол. Из данных таблицы можно отметить, что указанные в ней дробилки отличаются значительной металлоемкостью и энергоемкостью при сравнении их с УЦИ.



Для получения продукта тонкого помола, а также очень тонкого используются измельчители А1-ДДШ [61].

Широкое распространение УЦИ обусловлено в различных отраслях производства, в частности в строительной, химической и других за счет повышенной однородностью характеристик используемых материалов. По этому получаемый продукт обладает выравненностью. Однако, при применении в сельском хозяйстве, можно отметить особенность зерновых культур, которые являются органическим материалом и имеют неоднородность свойств в зависимости от культуры, что лежит в основе неравномерности фракционного состава получаемой продукции.

Также, в зависимости от культуры, зерновки обладают разными физическими и химическими свойствами.

Таким образом, проявляется существенный недостаток УЦИ, каковым является регулировка частоты вращения роторов при измельчении, определяющийся в зависимости от вида культуры, сорта. В частности при помоле зерен кукурузы для полного разрушения сырья скорость удара должна составлять 60 м/с, а для ячменя не менее 130 м/с [94, 137].

Малоэффективным при эксплуатации во всех измельчителях приводами принято использовать асинхронные двигатели с переменным током. При этом, регулирование частоты вращения роторов производится за счет переменных шкивов.

Способ измельчения в УЦИ, является давно известным и актуален в современной практике дробления.

Так, на производстве немецкой фирмы «Krupp» производится выпуск УЦИ серии «Тайфун». Допустимая рабочая линейная скорость которого составляет 60 м/с, при этом имеется ускоритель с диаметром от 700 до 1100 мм.

Австрийская фирма SBM, также производит оборудование для дробления разных типов и размеров, при этом диаметр ускорителя может составлять 800, 1000, 1200 мм, а его линейная скорость колеблется от 60 до 74 м/с.

Лидером в данной области, по производству центробежно-ударного оборудования на зарубежном рынке является фирма «Barmac». В настоящее время она является частью корпорации «Metco Minerals».

Необходимо отметить еще одного крупного товаропроизводителя УЦИ-компанию Sandvic. Данная фирма выпускает модель «Merlin», схожую по своим параметрам и характеристикам с «Barmac» [44].

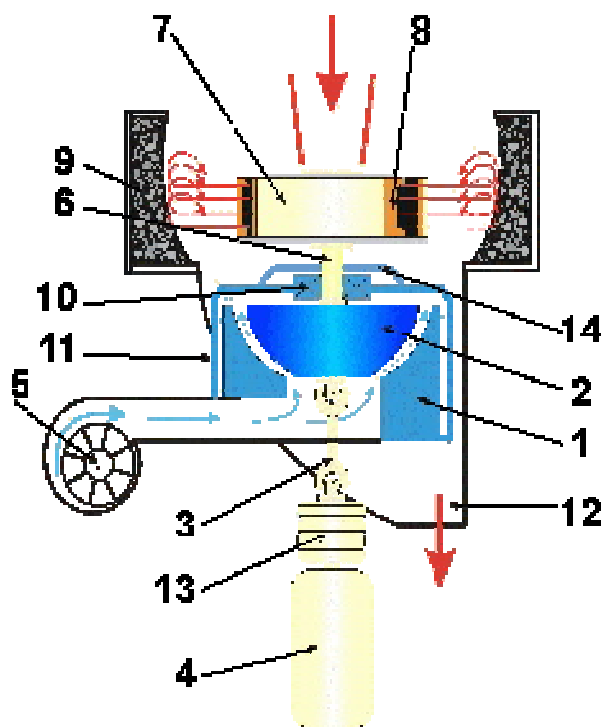
На основе изучения развития производственной отрасли, свойств и особенностей УЦИ, можно выявить ряд следующих противоречий. К первому относится необходимость обеспечения роста скорости удара для увеличения эффективности процесса ударной дезинтеграции. Ко второму - эксплуатационный ресурсный спад опорных подшипниковых узлов при увеличении ударного и абразивного износа конструктивных рабочих органов агрегатов и росте скорости удара.

Ограничения имеют модификации на основе подшипников. В частности, для материалов, имеющих абразивность, исходные параметры крупности питания не должны быть более 60 мм, при этом, диаметр ротора должен составлять менее 1 м, а его линейная скорость варьироваться от 60 до 70 м/с для максимальных типовых размеров.

Чтобы преодолеть ограничения, которые накладываются на скорость вращения ускорителей агрегатов на опорах подшипниковых, в конструкции моделей центробежного типа использовалась воздушная опора. Впервые, о которой упоминается еще в начале 20 века.

При помощи простой, надежной и эффективной конструкции решались значимые проблемы. Опора выглядит следующим образом: 2-е полусферы, в межзазорный промежуток которой подается нагнетенный воздух. При малом его давлении, возможно, применять типовой напорный вентилятор. Часть ротора, поднимаясь, находит под действием ряда внешних воздействий (факторов) вращательную ось.

Таким образом, уменьшается чувствительность к дисбалансирующим факторам до 10 раз при сравнении с аналогами, имеющими подшипники. Вследствие чего снимаются ограничения роторных систем на вращательные скорость и размеры. [44].



1 – статор; 2 – ротор; 3 – карданный вал; 4 – электродвигатель; 5 – воздушный вентилятор; 6 – вал; 7 – ускоритель; 8 – концевая лопатка ускорителя; 9 – камера измельчения; 10 – предохранительный узел на случай аварийного отключения воздуха; 11 – крышка опорной части; 12 – патрубок для выгрузки дроблённого продукта; 13 – центробежная муфта; 14 – пыльник

Рисунок 1.5 – Опорная часть центробежных дробилок на воздушной опоре

Большинство известных моделей вышеуказанного вида измельчителей отличаются высокими скоростями вращения рабочих деталей. Вследствие чего обладают значительными затратами энергии на создание сопутствующего потока воздуха, который влияет на направление, скорость движения частицы в рабочей отсеке (камере) измельчителя.

Данный процесс особенно присущ дезинтеграторам с наличием плоских рабочих элементов. Это формирует проблемы при математическом описании процесса работы, в рабочей камере упомянутого УЦИ.

Необходимо отметить, что комплексные исследования, описания движения воздушного потока в рабочей камере дисмембратора, не проводились [109].

## **1.5. Приемы и способы увеличения эффективности УЦИ**

При анализе недостатков УЦИ необходимо как отметить значительную неоднородность гранулометрического состава получаемого измельченного продукта, так регулировку частоты вращения роторов, которую необходимо часто производить при использовании разнородного сырья.

На основе отмеченных недостатков, пути и способы повышения качества получаемого измельченного продукта, снижение энергетической емкости процесса дробления целесообразно проводить в следующих направлениях:

а). Организовывать процесс измельчителя так, чтобы при первом ударе разрушенные элементы частиц подвергались последующим ударам с низким к.п.д. На основе этого частицы не будут переизмельчаться. При этом целые зерна будут разрушаться, подвергаясь удару.

б). Рост эффективности измельчающего процесса можно осуществлять при помощи сепарации сырья в управляемом инерционно - силовом поле за счет использования сил инерции (центробежных). УЦИ отвечают требованиям создания и регулирования этого поля.

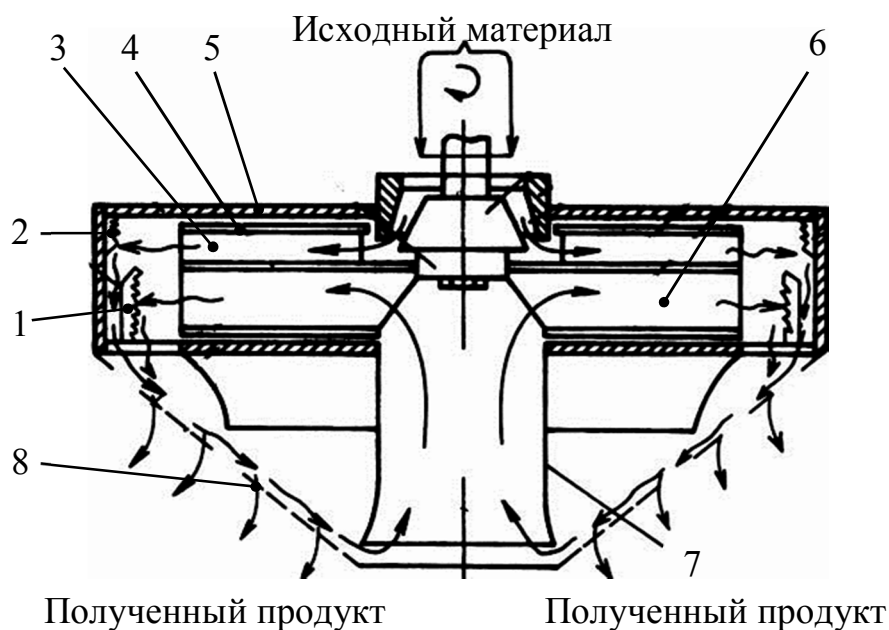
На основе изучения и анализа патентных источников, а также литературных изданий нами выделены самые эффективные способы измельченного сырья, используемые в УЦИ, промежуточной сепарации. Все измельчители на основе способа сепарации можно классифицировать по трем группам, что представлено на рисунке 1.3. К ним относятся измельчители с сепарацией на основе действия как потока воздуха, так и гравитационного и центробежного полей [67, 165].

### **1.5.1. УЦИ с промежуточной сепарацией в гравитационном поле**

В.А. Денисовым была разработана конструкция трехступенчатой центробежной дробилки с промежуточной сепарацией. В ней под действием гравитационных сил происходило разделение измельченного продукта на наклоненной силовой поверхности [37]. Ее преимуществом, если сравнивать с молотковой, был

вынос сепарирующих органов из измельчающей зоны. Данная особенность конструкции увеличивала надежность работы дробилки. К ее недостаткам можно отнести отсутствие рецикла и возможности интенсифицировать процесс сепарации.

Современной моделью указанной группы измельчителей с промежуточной сепарацией является УЦИ, которая под руководством В.А. Денисова, проектировалась в НПО «Винт» и защищена рядом патентов: № 2129466, № 2108159, представлена на рисунке 1.6.



1, 2 – круговые отбойные деки; 3 – верхняя разгонная лопатка; 4 – разгонный ротор; 5 – корпус дробилки; 6 – нижняя разгонная лопатка; 7 – всасывающий патрубок; 8 – коническое решето.

Рисунок 1.6 – Центробежная дробилка с внутренним рециклом

Процесс дробления в указанной дробилке заключается в следующем: исходный материал подается на разгонный ротор- 4, лопатками -3 происходит его разгон и удар об отбойную деку (круговую)- 2, затем, частично измельченное сырье перемещается на решето в виде конуса- 8, в котором происходит сепарация сырья. Элементы нестандартного размера под действием потока воздуха, который создается нижними лопатками- 6, через патрубок -7 перемещается на разгонные лопатки, где происходит повторные разгон и удар о круговые деки позиция -1. Полученный готовый материал выгружается через решето (поз.- 8).

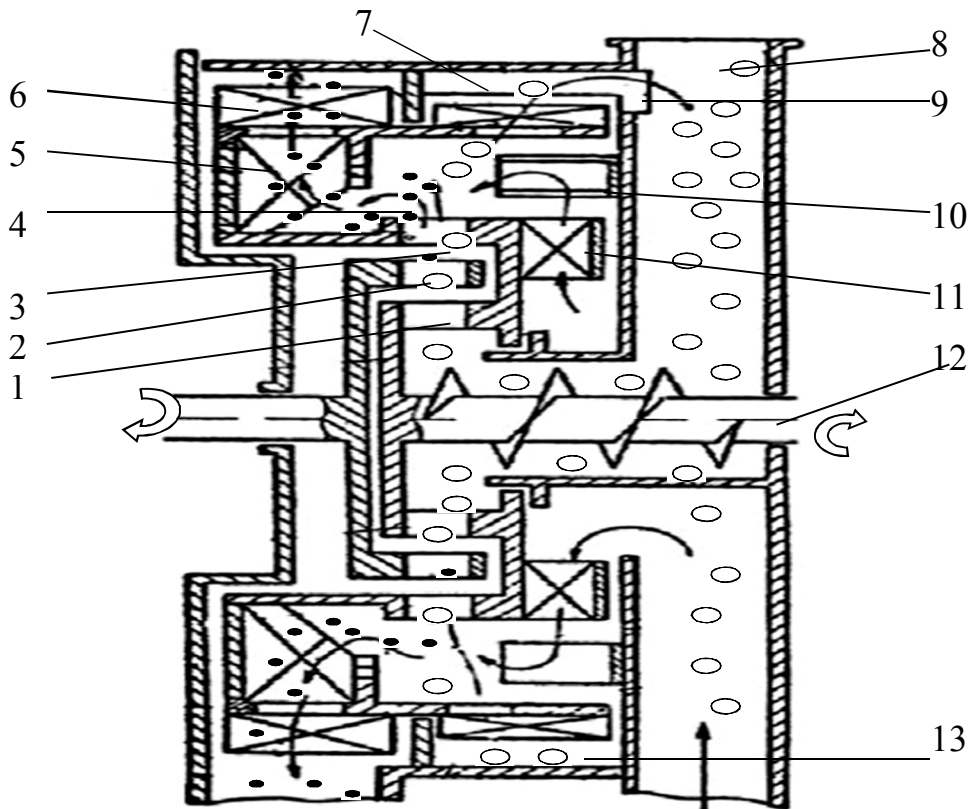
Однако у этой и аналоговых конструкций УЦИ отсутствует возможность управления гравитационном полем, что является существенным недостатком. По этому, в описанной выше конструкции отмечается низкое качество полученного продукта при росте подачи в дробительную камеру. Помимо этого, отрицательным фактором в процессе сепарации, может служить воздействие потока воздуха, который двигается в отверстиях сит навстречу частицам.

### **1.5.2. УЦИ с промежуточной сепарацией за счет потока воздуха**

В своих трудах значимое внимание ряда исследователей, изучающих проблему совершенствования УЦИ, посвятили промежуточной сепарации на основе действия потока воздуха. Указанный вид сепарации основан на отличие массы и аэродинамического коэффициента сопротивления воздуху целого и разрушенного зерна [1].

В авторских свидетельствах за номерами 1058130, 938236 данный факт отмечен, и представляется на рисунке 1.7.

Принцип работы указанного дезинтегратора-сепаратора осуществляется на основе поступления исходного материала на измельчение через течку - 8 и питатель - 12. Ряд серийных ударов он получает от измельчающих элементов 1,2, 3. В результате этого материал дробится и попадает в сепарационную зону- 4. Поток воздуха создается вентиляционными лопатки, путем нагнетания и передается на неподвижные лопатки - 10. Форма в виде дуги лопаток направляет воздушный поток в зону сепарации (поз. 4), с направлением, пересекающим массу сырья, движущегося из последнего ряда измельчающих элементов конструкции -3. Сепарирующий воздушный поток, который создается (позиции - 5, 6, 10, 11), выводит частицы мелкой фракции из дезинтегратора. При этом, частицы крупного размера направляются на измельчение повторно, кольцевой канал- 13, в направлении к ба- рьеру -7 , через входной канал- 9.



1,2,3 – измельчающие элементы; 4 – зона сепарации; 5,6,10,11 – лопатки; 7 – направляющий барьер; 8 – течка; 9 – входной канал; 12 – питатель; 13 – кольцевой канал

Рисунок 1.7 – Дезинтегратор-сепаратор с промежуточной сепарацией за счет потока воздуха

Целью указанного изобретения являлось создание потока воздуха, который бы был перпендикулярен потокам движения измельченного материала.

Данная конструкция за счет рецикла способствует получить готовый продукт более выровненного качества.

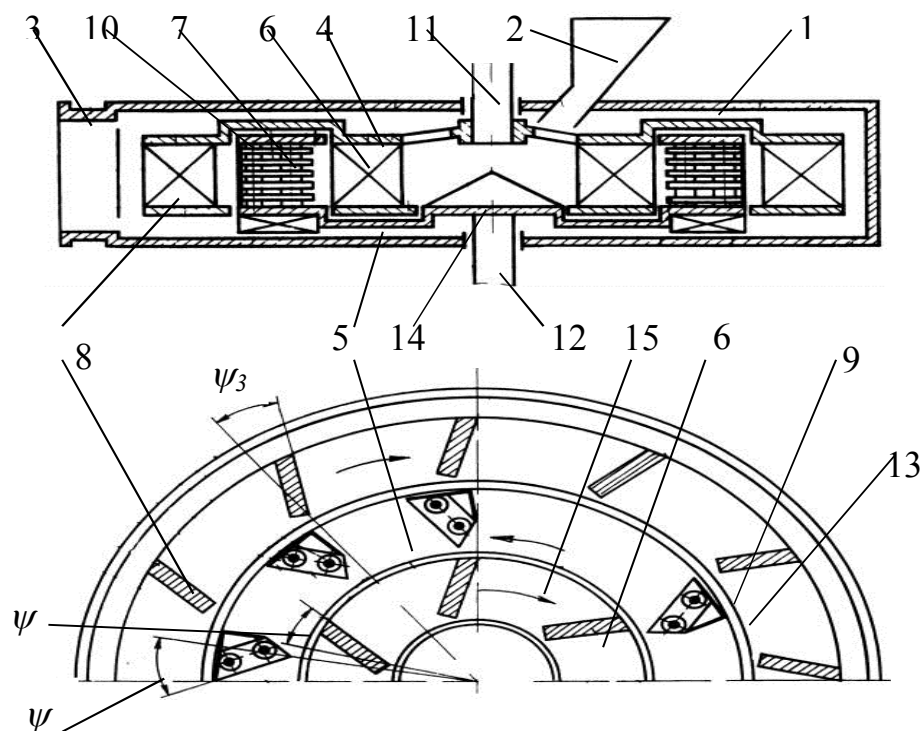
Тем не менее, она имеет ряд недостатков, к которым относится повышенная металлоемкость конструкции, удельная энергоемкость измельчения, т.к. создается дополнительный поток воздуха, аэродинамическое сопротивление вентиляционных лопаток, усложненность конструкции.

Отдельным направлением в процессе совершенствования УЦИ, является снижение потока воздуха, который создается элементами измельчения. Практика широко используется в решении данной проблемы применение центробежного поля. [60, 61, 170].

### 1.5.3. УЦИ с промежуточной сепарацией в центробежном поле

При сепарации измельченных материалов большими техническими и производственными возможностями с регулировкой центробежных силовых полей обладают УЦИ. В конструктивных параметрах они схожи с сепараторами инерционными, которые предложил использовать для очищения от примесей зерна Н.Е. Авдеев.

Совместно Алтайским ГАУ и Агроинженерным университетом г. Челябинска [61] проводились разработки и изготовление образца дезинтегратора с промежуточной сепарацией полученного измельченного материала за счет действия центробежных сил инерции, рисунок 1.8.



1 – корпус; 2 – загрузочная воронка; 3 – выходное отверстие; 4,15 – диск; 5 – встречно-вращающийся диск; 6 – плоский элемент первого ряда; 7 – ударные элементы промежуточного ряда; 8 – плоские ударные элементы последнего ряда; 9 – кольцо; 10 – комплект ножей первого ряда; 11,12 – вал; 13 – кожух; 14 – конус.

Рисунок 1.8 – Дезинтегратор с промежуточной сепарацией в центробежном поле



Работал указанный измельчитель за счет подачи и загрузки сырья через воронку -2, затем распределяется конусом 14, затем захватывается плоскими элементами 6 первого ряда диска 4, разгоняется и выбрасывается на поверхность ударных элементов 7 промежуточного ряда встречно-вращающегося диска 5. Соударение элементарных частиц материала осуществлялось с поверхностью ударных элементов, поз.-7. После промежуточно измельченная продукция захватывалась ударными элементами, затем, под влиянием центробежных сил разгонялась.

Вместе с увеличением скорости измельчаемого продукта параллельно поверхности – 7, осуществляется процесс сепарации.

Полученный продукт, имеющий размер частиц меньше зазора между пластинами в виде трапеций, попадает в зазор между ними. При этом, частицы более крупного размера сырья, увеличивая скорость, выбрасываются на поверхность плоских ударных элементов, повторно, поз.- 8, диска - 4, в котором материал до конца проходит процесс измельчения, выходясь через патрубок – поз. 3.

Фракция проходowego размера выходит через сквозные пазы, расположенные на диске, при помощи потока воздуха [60, 145].

При помощи изменения угловой частоты вращения дисковых элементов, количества промежуточных рядов, а также зазоров между трапециевидными пластинами производится регулирование фракции помола. Эта конструкция в ходе лабораторных испытаний проявила ряд недостатков.

Так, не учитывалось инерционное поле, что исключило возможность последующего вывода фракции проходowego размера из сепарационной зоны. Причиной этого являлось то, что, прошедшей через ряд пластин частице, нужно изменить направление перемещения на  $90^\circ$ , при этом преодолевать силы трения, возникающие на внутренней стороне кожуха.

Также не учитывалось поведение потока воздуха в сепарационной зоне.

Вместе с пластинами -7, кожух -13, воздействует как единая лопасть вентилятора, при высокой частоте вращения, до 3000 об/мин, создает встречное воздушное движение, что препятствует свободному движению частиц через зазоры.

При рассмотрении данных УЦИ, учитывались их положительные особенности при сравнении с дробилками центробежного типа. [61, 100, 124].

а) выгрузка полученного продукта из измельчающей зоны дезинтегратора производится за счет действия силы инерции, а также потока воздуха, что превышает силы гравитации, используемые в большинстве центробежных дробилок. Таким образом, полученный материал в результате дробления вовремя удаляется с поверхностей измельчающих органов, при этом, не затрудняя процесс разрушения нового зерна.

б) скорость удара зерна об измельчающие органы конструкций большинства типов измельчителей зерна колеблется от 60 до 80 м/с [61, 139, 141].

При использовании роторов в дезинтеграторе с противоположным вращением угловую скорость при сравнении с УЦИ, возможно снизить в 2-а раза.

Таким образом, увеличивается надежность кинематических передач, узлов трения, снижается общая нагрузка на детали, расположенные в сильном инерционном поле. Так же снижение угловых скоростей ротора положительно влияет на снижение энергозатрат на формирование негативного потока воздуха при холостом ходе.

## **1.6. Особые конструкции рабочих органов**

Конструктивно пассивные и активные органы имеют определенную оригинальность.

В частности, существует дробилка, которая имеет в своей конструкции зубчатый ротор и пассивный рабочий орган, изготовленный в форме деки, имеющей ячейки, размер которых снижается от загрузочного бункера сверху агрегата к нижней его части - выгрузному устройству. Вращение ротора может осуществляться во взаимно противоположные направления.

Учеными - изобретателями создана конструкция трехступенчатой центробежной дробилки, что повышает срок эксплуатации, эффективность процесса измельчения. Ротор конструкционно имеет два разгонных диска, которые изготовлены наподобие рабочих колес вентиляторов центробежного типа.

В некоторых видах измельчителей, при работе преобладают другие виды разрушения, нежели свободный удар из-за их конструкционных особенностей.

Из-за конструкционных особенностей рабочих органов в отдельных видах измельчителей, преобладают иные виды разрушений над свободным ударом. Их назвать измельчителями можно только условно. Тем не менее, они имеют ряд общих признаков, позволяющих их сопоставлять с дробилками [27, 38, 61, 92, 165].

Для получения крупно- кусковых частиц из слежавшихся материалов, рекомендуется использовать одновалковую зубчатую дробилку [142]. Ее активный рабочий орган изготовлен в виде вала зубчатого. Деки состоят из набора пластин, имеющих наклонную рабочую поверхность. Ударное измельчение сырья происходит при вращении против часовой стрелки, а по часовой стрелке происходит резание со сколом, которое сопровождается ударом.

На практике применяется еще и малогабаритная дробилка. Она имеет ротор, изготовленный в форме диска, который движется вращающимся движением в горизонтальной плоскости. На его поверхности размещены пальцеобразные выступы. Рабочий орган (пассивный), изготовлен в форме статора, с пальцеобразными выступами. Непосредственно измельчение продукта осуществляется в зазоре расположенным между статором и роторными пальцами.

Трудами В.М. Опрышко, ученого А.А. Сундеева, разработан и внедрен в производство УЦИ. Конструктивно он состоит из 2-х соосных дисков, которые движутся навстречу, являющихся его рабочими органами [111, 112, 117]. Измельчение производится пластинами, которые расположены на рабочих поверхностях дисков. Описанный вид измельчителя схож с мельницами и дробилками.

Необходимо уточнить, что описанные конструкции дают широкие возможности измельчителям, тем самым, повышая их основные показатели производительности и эксплуатации.

### 1.7. Гранулометрический состав продукта

Одним из качественных показателей измельчения является модуль крупности помола, который обозначается как показатель - М. Он является показателем средневзвешенного размера частиц измельченного продукта. При нахождении модуля помола используют сведения анализа просеивания измельченного продукта на лабораторно-экспериментальном расसेве [30, 167].

Расчет модуля помола производится по следующей формуле:

$$M = \frac{0,5P_0 + 1,5P_1 + 2,5P_2 + 3,5P_3}{100}, \quad (1.1)$$

где  $P_0$  – проход сита с отверстиями диаметром 1 мм, %;

$P_1, P_2, P_3$  – остаток на ситах с отверстиями 1; 2 и 3 мм соответственно, %.

Корм, имеющий различную крупность необходим для разных групп и видов скота. В связи с этим, конструкция фуражных дробилок, должна давать возможность изменять модуль измельчения (помола) в пределах необходимых параметров.

Так, сменой решет изменяется помол в решетных дробилках. При этом, фураж требуемого размера частиц можно получить при использовании решет, имеющих разные в диаметре отверстия.

При этом, так как модуль помола является усредненным показателем, то он не является полной характеристикой полученного продукта измельчения, в связи с чем, не представляется объективным, судить о качественных характеристиках получаемых кормов. [25, 30].

При производстве комбикормов на промышленных предприятиях, выделяют 3-и группы крупности измельченного зерна. К первой группе относят модуль помола от 0,55 до 0,6 мм; ко второй от 0,8 до 1,0 мм; к третьей от 1,4 до 1,7 мм.

Все корма должны отвечать требованиям зоотехнии. Важным показателем качества корма является равномерные параметры гранулометрического состава, который может быть разным при одинаковом модуле измельчения.

При рассмотрении гранулометрического состава корма, необходимо отметить необходимость минимального содержания в нем разнородных фракций ча-

стиц: как крупных, так и мелких. Однако получить в современных условиях, однородный по гранулометрическому составу продукт не возможно в большинстве случаев, так как имеющиеся в серийном производстве дробилки имеют недостатки в организации процесса дробления.

Переизмельчение материала возможно в случаях несвоевременного выведения элементов материала из рабочей зоны, а с использованием решет, имеющих большие отверстия, возникает вероятность прохождения целых или недоизмельченных зерен.

### **1.8. Теоретические исследования процесса измельчения материала**

Изучению измельчения зерна посвящены многие работы как отечественных, так и зарубежных ученых. Несмотря на это, до сегодняшнего дня нет единой теории, которая бы объясняла измельчительный процесс и давала бы четкий математический алгоритм расчета энергитических затрат на разрушение сырья. [61].

Теоретическое описание проблемы разрушения материала проводили следующие ученые В.А. Кирпичев, Ф.Г. Плохов, С.В. Елисеев, Ф.С. Бонд, Л.Б. Кик, С.Д. Хусид, Р. Гийо, А.К. Рунквист Р. Риттингер, В.П. Горячкин, П.А. Ребиндер, А.А. Гриффитс, Л.А. Глебов, Л.Б. Левенсон, Я.Н. Куприц, А.Р. Демидов, В.А. Мельников, В.И. Сыроватка и др. [26, 27, 34, 48-53, 54, 96, 97-103, 104, 136-144, 145].

Обоснованию как конструктивных, так и технологических составляющих процесса измельчения сырья в УЦИ, для повышения интенсификации непосредственно самого процесса, посвящены труды ученых, таких, как: В.Н. Блиничев, Г.Д. Гальперин, И.А. Хинт, Г.Н. Оскаленко, В.А. Денисов, П.И. Леонтьев, С.В. Золотарев, Н.М. Смирнов, Н.С. Сергеев, и других отечественных исследователей, а также зарубежных, в частности В. Эбергардт, Д. Беренс, Е. Рейнерс, Г. Румпф, и других [ 38, 61, 85, 86, 126].

### 1.8.1. Затраты энергии на измельчение материала

Опыт определения работы, которая затрачивается на измельчительный процесс материала имелся еще в XIX в. В частности, в этот период предлагались 2-е классические для современности теории измельчение тела: поверхностная, объемная.

Первая – сформулирована ученым П.Р. Риттингером [147], основывавшаяся на том, что нужная для процесса измельчения материала работа или энергия, будет прямо пропорциональной  $S$ (площади) заново образованной поверхности, определяясь по следующей формуле:

$$A_R = f(\Delta S) = K_R \cdot x^2, \quad (1.2)$$

где  $\Delta S$  - приращение удельной площади поверхности,  $\text{м}^2$ ;

$x$  - характерный размер частицы до измельчения, м;

$K_R$  - коэффициент пропорциональности.

Тем не менее, указанная зависимость является частным случаем. На практике, модуль помола будет изменяться в широких пределах. Он зависит от таких составляющих, как: крупность, способ измельчения сырья, а также технических и конструктивных особенностей измельчающего агрегата. Данная теория актуальна для процесса с получением материала тонкого измельчения, при котором образуется продукт, имеющий высокоразвитую удельную площадь поверхности [90, 147].

В 19-м веке, была разработана теория в которой говорится, что работа требуемая для измельчение материала прямо пропорциональны объему  $\Delta V$  ( $\text{м}^3$ ) деформированной части тела, выражаясь следующей формулой:

$$A_K = f(\Delta V). \quad (1.3)$$

Изначально автором теории был русский ученый В.А. Кирпичев, затем исследования продолжились немцем Киком. В связи с этим теория носит название Кирпичева-Кика.

Так как измененная деформацией часть объема  $\Delta V$  пропорциональна изначальному объему  $V$  всего куска, то по формуле:

$$A_K = K_K m, \quad (1.4)$$

где  $K_K$  - коэффициент пропорциональности;

$m$  - масса разрушаемого куска, кг.

Согласно описанной теории, энергия, которая необходима для разрушения частиц разного калибра, будет иметь равное значение, до тех пор, пока одним и тем же будет соотношение размеров. В связи с этим, объемная теория является наиболее точной при производимых расчетах процессов грубого измельчения. При данном процессе большее количество энергии идет на упругие деформации тела, при этом, минимальному изменению подвергается площадь поверхности. [99, 163].

Обсуждение как поверхностной, так и объемной теории проходило вплоть до современности, несмотря на то, что они обе не учитывают влияния конкретных фактов.

В связи с отмеченным выше Ф.С. Бонд разработал на основе этих теорий инновационную в 1952 году, которая получила название «примирительная». По его теории, работа, которая расходуется на процесс измельчения, пропорциональна усредненному геометрическому из всего объема и площади поверхности куска, подвергаемого измельчению [61].

$$A_B = K \sqrt{VS} = K \sqrt{K_K D^3} \sqrt{K_R D^2} = K_B D^{2.5}, \quad (1.5)$$

где  $K_B$  – коэффициент пропорциональности.

Silver E.A., учитывая рассмотренные соотношения, которые приведены выше, определил, что представляют собой частного случая, следующего утверждения, разработанного в 1937 году Walker[175]:

$$dE' = -K(dx/x^n) \text{ для } 1 \leq n \leq 2, \quad (1.6)$$

где  $dE'$  – энергия, требуемая на приращение размера  $dx$  в размере единицы массы материала;

$K$  – константа, зависящая от конструктивных особенностей измельчителя и материала;

$n$  – константа, зависящая от конструктивных особенностей измельчителя и материала.

При  $n=1$  вышеуказанное уравнение приводится к теории Кирпичева – Кика, при  $n=1,5$  к теории Бонда, а при  $n=2$  - теории Риттингера. [100].

Основной закон измельчения или уравнение П.А. Ребиндера, в развернутой форме выглядит в виде следующего выражения:

$$A = A_V + A_S = K_V \Delta V + K_S \Delta S, \quad (1.7)$$

где  $A_V$  – работа, затрачиваемая на деформации в объеме тела, Дж;

$A_S$  – работа, затрачиваемая на образование новых поверхностей, Дж;

$K_V$  – коэффициент пропорциональности;

$K_S$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий энергию поверхностного натяжения твердого тела.

Таким образом, важно отметить, что описанные теории не приводили к хорошим итогам и результатам в теоретическом обосновании определения энергетических на измельчительный процесс даже в частных случаях. [60, 129].

Все описанные классические гипотезы определяются как фундаментальные и используются для качественного изучения процессов работы и сравнительных расчетов для определения относительной величины работы, которая используется на измельчающий процесс [49, 147, 167].

На основе закона измельчения, С.В. Мельниковым была в 1952 году, использована рабочая эмпирическая формула, по которой определялись затраты на разрушение зернового материала [102]:

$$A_{изм} = C_{пр} (C_V \lg \lambda^3 + C_S (\lambda - 1)), \quad (1.8)$$



где  $C_{np}$  – коэффициент, учитывающий свойства материала, способ измельчения, конструктивные особенности измельчителя;

$C_V$  – коэффициент, выражающий удельную работу упругих деформаций;

$C_S$  – коэффициент, учитывающий работу, затрачиваемую на образование новых поверхностей при измельчении 1 кг зерна;

$\lambda$  – степень измельчения.

Работа, затрачиваемая на измельчающий процесс, учитывая положения о процессе разрушения зерна, а также энергетические затраты на формирование новых и развитие трещин, энергии, рассеиваемой в объеме частиц при их деформационном изменении и прочих факторов, выражается в виде [128, 129]:

$$A_{изм} = A_S + A_V + A_0, \quad (1.9)$$

где  $A_0$  - энергия, затрачиваемая на износ и нагрев рабочих органов, их деформирование и т.д., Дж.

Тем не менее, отмеченные выше выражения не имеют реализации в практических расчетах, в связи с чем, применяются только для анализа и сравнения различных измельчающих процессов и общих приемов повышения эффективности и пр. [49, 156].

### 1.8.2. Критическая скорость разрушения тела

Исследователи определяют особенность материала, подвергаться разрушению при ударе через критическую скорость разрушения, при которой зерно полностью разрушится. Иными словами через скорость удара сырья с рабочими органами [61].

На основе теории контактных напряжений, разработанной Герцем, академик В.П. Горячкин предложил критическую скорость находить по следующей формуле:

$$v_{кр} = \left( \sqrt{E/\rho} \right) \cdot \sigma_p / E, \quad (1.14)$$

где  $\sqrt{E/\rho}$  - скорость звука в материале, м/с;

$\sigma_p$  - предел прочности материала на растяжение, МПа.

В свою очередь В.П. Ромадин произвел видоизменение его формулы, предполагая, что отношение предела прочности к модулю упругости материала должно быть в 6/5 степени [32]. По расчетам, произведенным В.А. Денисовым и других исследователей, реальные рабочие скорости от 8 до 15 раз больше в дробилках молоткового типа скорости, которая определяется формулой (1.14).

Подробно определение критической скорости дал Г.С. Ходаков, предложив производить расчет по формуле [163]:

$$v_{кр} = \sqrt{(1/\rho k) [\sqrt[3]{p^5/E^2} + 12a(\beta l + \sigma)/\pi x]} , \quad (1.15)$$

где  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$k$  – к.п.д. ударного разрушения частицы;

$p$  – предел прочности материала;

$\beta$  – средняя объемная плотность энергии;

$l$  – глубина пластической деформации;

$\sigma$  – свободная энергия единицы поверхности;

$a$  – константа.

В настоящее время большинство исследователей при определении критической скорости разрушения опираются на формулу, экспериментально полученную С.В. Мельниковым и Ф.Г. Плоховым [98]:

$$v_{кр} = \sqrt{(K_d \sigma_{в.д} \ln(a/x))/\rho} , \quad (1.16)$$

где  $K_d = \sigma_{в.д} / \sigma_{в.с}$  – коэффициент динамичности (для зерна  $K_d = 1,6 \dots 2,0$ );

$\sigma_{в.д}$  и  $\sigma_{в.с}$  – соответственно пределы прочности зерна, определенные в динамических и статических условиях, МПа;

$a$  – размер зерна по линии удара, м;

$x$  – линейная величина оставшейся недеформируемой части зерна, м.

Использование указанной (1.16) эмпирической формулы сложно для зерновых материалов в связи с разнородной конфигурацией зерна, что затрудняет четкое определение значений  $\sigma_{в.д}$  и  $\sigma_{в.с}$  [68].

В трудах Л.А. Глебова, С.В. Зверева, а также других ученых, ведущей причиной основной ошибки в определении значений критических скоростей, как расчетных, так и экспериментальных, определяется отсутствием в приведенном выражении значений, которые бы учитывали особенности разрушение зерновки за счет формирования трещин [59, 129, 139].

На основе концепции разрушения тела и изучая зерно, как объект процесса разрушения, Л.А. Глебов, рассматривая зерновку как объект разрушения, вывел новую формула, по которой определял критическую скорость [103]:

$$v_{кр} = (T / \rho) \sqrt{\pi \gamma E / b^3 (1 + (1 + R)^2)}, \quad (1.17)$$

где  $T$  – время действия ударного импульса частицы при ее контакте с рабочим органом, с;

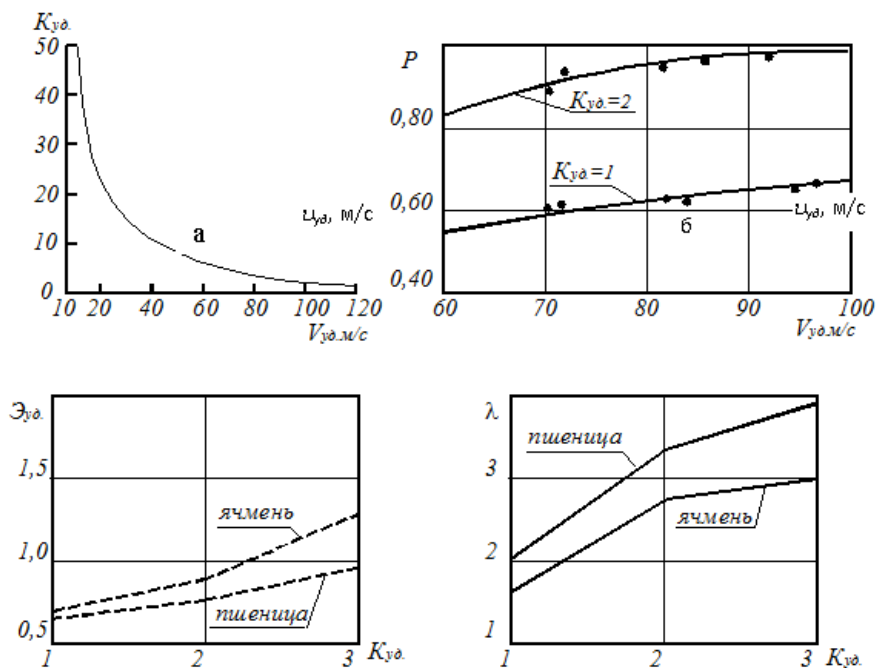
$\gamma$  – коэффициент, выражающий величину удельной поверхностной энергии разрушения;

$b$  – размер частицы, имеющей форму куба;

$R$  – коэффициент восстановления (определяется экспериментально).

При расчете времени удара ( $T$ ), по данной формуле, возникают проблемы, в связи с особенностью того, что он является зависимостью от скорости удара  $v_{уд}$ , в связи с чем может варьироваться в значительных пределах ( $10^{-6}$  -  $10^{-4}$  с) [ 59, 61] .

Изучая проблему определения оптимального количества ударов, которые нужны для полного разрушения зерна, ряд ученых расходятся во взглядах и мнениях. Так, например, С.В. Мельников, В.А. Денисов, Ф.Г. Плохов, и пр., едины в мнении, что максимально эффективным разрушение зерновки происходит за счет 1-го-2-х ударов на большой скорости ударного нагружения [ 61, 126, 138]. Этими учеными - исследователями выявлено, что с увеличением скорости удара  $v_{уд}$  от 40 - 120 м/с количество ударов, которые нужны для полного разрушения материала зерна может падать с 7 до 1, см. рисунок 1.9.а [61, 137].



а – зависимость числа ударов молотка, необходимых для полного разрушения зерна, от скорости удара; б – зависимость вероятности разрушения зерен ячменя  $P$  от скорости прямого удара  $v_{уд}$ ; в – зависимость удельной энергоёмкости  $\mathcal{E}_{уд}$  измельчения от числа ударов  $K_{уд}$ ; г – зависимость степени измельчения  $\lambda$  от числа ударов  $K_{уд}$

Рисунок 1.9 – Экспериментально полученные зависимости [60]

Иную зависимость скорости от числа ударов получил С.В. Золотарев [60], она представлена на рисунке 1.9.б. Данная зависимость показывает наглядным образом, что при  $v_{уд} \approx 100$  м/с и  $K_{уд} = 2$  вероятность разрушиться зерновке ячменя,  $P$ , будет равна 99 %. На рисунке 1.9.в, 1.9.г, можно наглядно проследить что с ростом количества числа ударов, на образцах ячменя, пшеницы, степень измельчения  $\lambda$  (будет возрастать плавнее, чем растёт удельная энергетическая ёмкость процесса измельчения  $\mathcal{E}_{уд}$ . Следовательно, при измельчении рекомендуется использовать 1, 2 удара при высокой скорости, которая должна варьироваться от 90 до 110 м/с. Аналогичная зависимость имеет место в трудах В.А. Денисова.

Ученые А.А. Хитов и С.В. Зверев, и пр., отмечают выгоды в энергетическом отношении разрушения материала неоднократным воздействием удара на основе формирования и развития трещин в зерне, при этом, используя промежуточное

просеивание получаемых продуктов помола, на небольших ударных скоростях. [68, 138].

На основании вышесказанного, можно сделать заключение, что все концепции, имеющиеся в современной практике, не дают объемной и подробной характеристики процесса разрушения зерновки, а также простой зависимости по расчету расхода энергии на разрушение зерна, критической скорости его разрушения.

Вследствие того, что зерно является материалом биологического происхождения, имеющий анизотропные свойства, которому присуща нелинейность. Перечисленные характеристики определяются типом культуры, сортовыми особенностями, влажностью, и прочими факторами. [61, 62, 129].

Таким образом, необходимо сочетать как известные теоретические разработки, так и экспериментальные исследования.

### **1.9. Анализ литературного обзора**

На основе проведенного исследования экспериментальных данных, в т.ч. и теоретических исследований ряда авторов можно сделать следующий вывод.

Учитывая разнообразные технические решения конструкций ударных измельчителей по производству кормов, необходимо основываться на факторе выбора в пользу надежности, долговечности и эффективности их работы, в том числе, в первую очередь снижении удельных энергетических затрат при получении измельченного продукта высокого качества и его равномерного фракционного состава. При этом нужно учитывать и простоту конструкции, которая не должна иметь высокую стоимость, металл и энергоемкость, а также легко обслуживаема и ремонтпригодна.

Таким образом, получение кормов в процессе измельчения материала, является сложным процессом, требующим решения и усовершенствованных и инновационных идей и подходов.

## 1.10. Выводы

Проведенный обзор позволяет сделать следующие выводы.

1. Эффективность скармливания можно повысить за счет оптимизации размеров частиц измельченного зерна для каждого вида животных в соответствии с зоотехническими требованиями. Переизмельчение корма негативно сказывается на здоровье и продуктивность животных, увеличивает энергоемкость процесса, ухудшает условия труда человека.

2. Процесс измельчения зерна сложное и недостаточно изученное явление. Сложившиеся полученные знания не позволяют однозначно ответить на многие принципиальные вопросы, например о числе и скорости удара, необходимых для полного разрушения зерновки.

3. Ударные центробежные измельчители фуражного зерна являются новым типом измельчающего оборудования. Они обладают низким удельным расходом энергии затрачиваемой на процесс и меньшей металлоемкостью, чем молотковые дробилки. Их внедрение в производство сдерживается отсутствием методик инженерного расчета и проектирования данных конструкций.

4. Низкая эффективность процесса измельчения определяется неравномерностью воздушно-продуктового слоя, таким образом, теорией и практикой установлено, что процесс сепарации материала эффективнее осуществлять за счет центробежных сил инерции в управляемом силовом инерционном поле. Этим условиям удовлетворяют ударно-центробежные измельчители.

5. Технические решения, удовлетворяющие показателям повышения работы ударно-центробежных измельчителей, основываются на разработке и усложнении их конструкционных параметров.

6. Рост эффективности процесса измельчения можно осуществить путем усовершенствования основных ведущих рабочих органов (активных).

## **2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ЗЕРНА В УДАРНО - ЦЕНТРОБЕЖНОМ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ**

### **2.1. Определение скорости перемещения зерна по вертикальной поверхности диска и зубу ножа**

Разрушение зерна в измельчителях ударно-центробежного типа осуществляется за счет направленного разгона измельчаемых частиц и последующих ударных нагрузений формируемых как за счет центробежных сил так и за счет скоростей приобретаемых после удара. Траекторию и величину скорости движения частицы в таких измельчителях можно описать, используя известные законы механики.

Результат разрушения будет наблюдаться в случае совмещения ударного воздействия ножей встречно вращающегося ротора и обеспечения достаточной скорости зерна на разгонном участке первой ступени измельчения.

В предложенной конструкции измельчителя имеются два вертикальных диска независимо приводимых в движение навстречу друг другу, на их внутренних поверхностях расположены ударные элементы, концентрически размещенные в рядах.

Зерно, поступающее к загрузочному диску разгоняется по его поверхности направляется в его центральную часть посредством направителя к ножам, где оно, ударяясь о поверхность зуба ножа, перемещается по нем к ножам второго диска, где подвергается удару о поверхности образующей конуса и срезающему воздействию ножа второго диска.

В целях формализации теоретических расчетных схем, а также по данным многочисленных исследований в области измельчения зерна, приняты следующие допущения [10, 13, 22, 55, 58, 61, 102, 115].

1. Исследуемая зерновка представляется в виде элемента массы.
2. Взаимодействие зерновок между собой отсутствует.

3. На скоростях более 50 м/с разрушение зерновки достигается в момент его контакта с поверхностью.

4. При эффективном ударном нагружении трение между телом и ударной поверхностью отсутствует.

5. При ударе зерна об образующую диска и ножа пластическими деформациями во время удара пренебрегаем.

6. Из-за значительного превышения массы ударного элемента измельчителя над массой зерновки, рассматриваем случай удара разрушаемого тела о неподвижную поверхность.

Рассмотрим зерно как материальную точку с массой  $m$ , совершающую движение по вертикальной поверхности диска и основанию зуба ножа. Схема сил действующих на элемент массы представлена на рисунке 2.1.

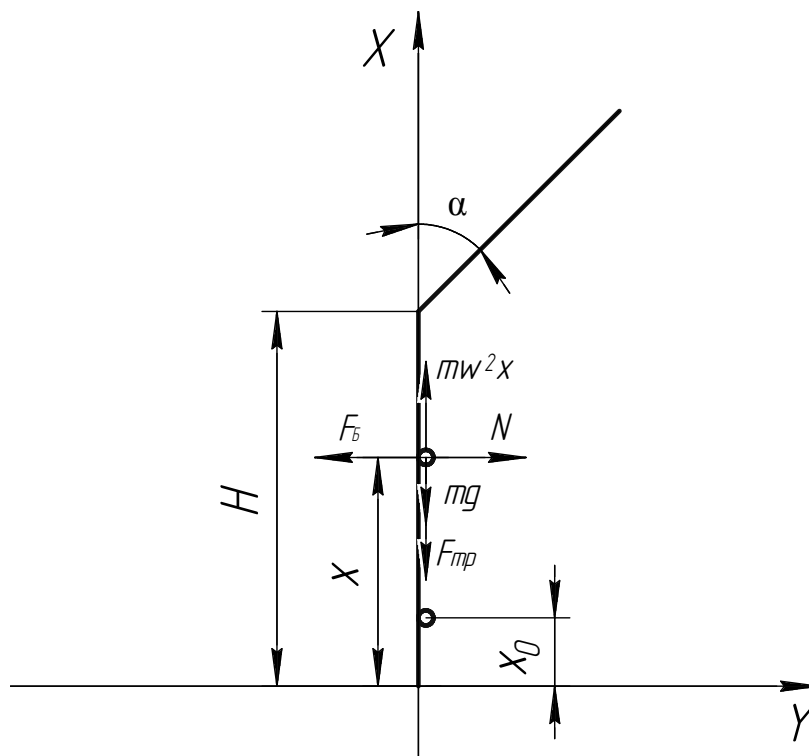


Рисунок 2.1 - Схема сил, действующих на элемент массы во время движения по вертикальной поверхности вверх [110]

На элемент массы во время движения по вертикальной поверхности вверх действуют: центробежная сила  $F_{ц} = m\omega^2 x$ , сила бокового давления  $F_{б}$ , сила трения  $F_{тр} = fN$ , где  $N$  – нормальная реакция стенки, равная  $F_{б}$  и сила тяжести  $mg$ .



$$m\ddot{x} = m \cdot \omega^2 \cdot x - m \cdot g - F_B \cdot f.$$

Равномерно распределенное по периметру нормальное горизонтальное давление сыпучих материалов  $p_h^n$  на стенку на глубине  $h-x$  от верха засыпки определяется по формуле [58, 102]:

$$p_h^n = \frac{\gamma\rho}{f} \left( 1 - e^{-\lambda f(h-x)/\rho} \right), \quad (2.1)$$

где  $\rho$  — гидравлический радиус поперечного сечения, определяемый по формуле

$$\rho = \frac{A}{U}, \text{ м};$$

$A, U$  — площадь и периметр поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;

$\gamma$  — удельный вес насыпного зерна,  $\text{Н}/\text{м}^3$ ;

$\lambda$  — коэффициент бокового давления сыпучего материала, определяемый по формуле  $\lambda = \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)$ , (для зерна допускается принимать  $\lambda = 0,44$ ).

Тогда силу бокового давления  $F_{\bar{\sigma}}$  можно определить по формуле:

$$F_{\bar{\sigma}} = p_h^n s = \frac{\gamma\rho}{f} \left( 1 - e^{-\lambda f(h-x)/\rho} \right) \cdot s, \quad (2.2)$$

где  $s$  — площадь контакта зерна с поверхностью,  $\text{м}^2$ .

Исходя из этого сила трения зерна о стенку примет вид:

$$F_{mp} = \gamma\rho \left( 1 - e^{-\lambda f(h-x)/\rho} \right) \cdot s.$$

Учитывая выше сказанное, уравнение движения элемента массы по вертикальной поверхности примет вид:

$$m\ddot{x} = m\omega^2 x - mg - \gamma\rho \left( 1 - e^{-\lambda f(h-x)/\rho} \right) s.$$

С учетом начальных условий мы получаем задачу Каши для квазилинейного дифференциального уравнения второго порядка:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \omega^2 \cdot x - g - \gamma \cdot \rho (1 - e^{-\lambda f(h-x)/\rho}) \cdot s/m \\ x(0) = x_0 \\ \dot{x}(0) = 0 \end{cases}$$

Данная задача аналитического решения не имеет и требует численной реализации. Было получено решение этой задачи с помощью встроенных процедур математического пакета Maple.

Следующим этапом является моделирование движения элемента массы по зубу ножа. На элемент массы действуют те же силы, что и при движении по вертикальной поверхности [162, 169]. Схема действия этих сил показана на рисунке 2.2.

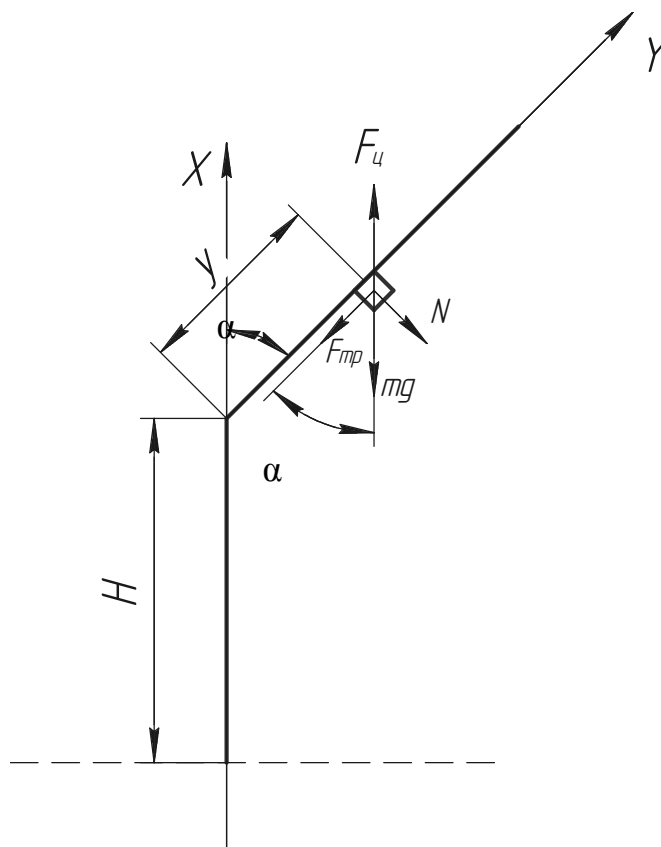


Рисунок 2.2 - Схема сил, действующих на элемент массы во время движения по основанию зубу ножа

Исходя из рисунка 2.2 центробежная сила определяется по формуле:

$$F_u = m \cdot \omega^2 \cdot (H + y \cdot \cos\alpha).$$

Нормальная реакция и как следствие сила трения примет вид:

$$N = F_u \cdot \sin\alpha - mg \cdot \sin\alpha;$$

$$F_{mp} = f \cdot N = f \cdot (F_y \cdot \sin \alpha - m \cdot g \cdot \sin \alpha) = f \cdot [m \cdot \omega^2 (H + y \cdot \cos \alpha) - mg] \cdot \sin \alpha = m \cdot f \cdot \sin \alpha [\omega^2 (H + y \cdot \cos \alpha) - g].$$

Кроме того, сила трения, вызванная кориолисовой силой, о боковую поверхность зуба:

$$F_{тр1} = f \cdot m \cdot 2\dot{y} \cdot \omega \cdot \sin \alpha.$$

Тогда закон движения по основанию зубу ножа (ось  $y$ ) примет вид:

$$m\ddot{y} = F_y \cdot \cos \alpha - mg \cdot \cos \alpha - F_{mp} - F_{тр1}.$$

Проведя несложные преобразования получаем:

$$\ddot{y} = \omega^2 (H + y \cdot \cos \alpha) \cdot \cos \alpha - g \cdot \cos \alpha - f \cdot \sin \alpha [\omega^2 (H + y \cdot \cos \alpha) - g] - f \cdot 2\dot{y} \cdot \omega \cdot \sin \alpha;$$

$$\ddot{y} = \omega^2 \cdot H \cdot \cos \alpha + \omega^2 \cdot y \cdot \cos^2 \alpha - g \cdot \cos \alpha - f \cdot \sin \alpha \omega^2 H + f \cdot \sin \alpha \cdot g - f \cdot \sin \alpha \cdot y \cdot \cos \alpha \cdot \omega^2 - f \cdot 2\dot{y} \cdot \omega \cdot \sin \alpha;$$

$$\ddot{y} = -f \cdot 2\dot{y} \cdot \omega \cdot \sin \alpha + (\omega^2 \cdot \cos^2 \alpha - f \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \omega^2) \cdot y + \omega^2 \cdot H \cdot \cos \alpha - g \cdot \cos \alpha - f \cdot \sin \alpha \cdot \omega^2 \cdot H + f \cdot \sin \alpha \cdot g.$$

Последнее уравнение с начальными условиями  $y(0) = 0, \dot{y}(0) = V_0$  дает нам задачу Коши для линейного неоднородного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами. Отметим, что начальной скоростью на этом участке  $V_0$  является конечная скорость движения на предыдущем участке  $V_k$ .

Вводя обозначения:

$$A = \omega^2 \cdot \cos^2 \alpha - f \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \omega^2,$$

$$B = \omega^2 \cdot H \cdot \cos \alpha - g \cdot \cos \alpha - f \cdot \sin \alpha \cdot \omega^2 \cdot H + f \cdot \sin \alpha \cdot g,$$

$$C = -f \cdot 2 \cdot \omega \cdot \sin \alpha,$$

получим

$$\ddot{y} - C \cdot \dot{y} - A \cdot y = B. \quad (2.3)$$

Общее решение уравнения (2.3) складывается из общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного уравнения.

Решим однородное уравнение:

$$\ddot{y} - C \cdot \dot{y} - A \cdot y = 0.$$

Составим характеристическое уравнение:

$$k^2 - C \cdot k - A = 0.$$

Решая полученное квадратное уравнение, находим корни характеристического уравнения  $k_1$  и  $k_2$ :

$$y_{одн} = c_1 \cdot e^{k_1 \cdot t} + c_2 \cdot e^{k_2 \cdot t}.$$

Частное решение ищем в виде:

$$y_{част} = D.$$

Подставим в формулу (2.3) находим:

$$D = -\frac{B}{A}.$$

Тогда решение (2.3) имеет вид:

$$y = y_{одн} + y_{част} = c_1 \cdot e^{k_1 \cdot t} + c_2 \cdot e^{k_2 \cdot t} - \frac{B}{A}, \quad (2.4)$$

$$\dot{y} = c_1 \cdot k_1 \cdot e^{k_1 \cdot t} + c_2 \cdot k_2 \cdot e^{k_2 \cdot t}. \quad (2.5)$$

Используя начальные условия

$$\begin{cases} y(0) = 0 \\ \dot{y}(0) = V_0 \end{cases},$$

определим  $c_1$  и  $c_2$ .

$$0 = c_1 + c_2 - \frac{B}{A^2} \Rightarrow c_1 + c_2 = \frac{B}{A^2};$$

$$V_0 = A \cdot c_1 - A \cdot c_2 \Rightarrow c_1 - c_2 = \frac{V_0}{A};$$

$$c_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{B}{A^2} + \frac{V_0}{A} \right);$$

$$c_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{B}{A^2} - \frac{V_0}{A} \right).$$

Численное решение трансцендентного уравнения

$$L = c_1 \cdot e^{k_1 \cdot t} + c_2 \cdot e^{k_2 \cdot t} - \frac{B}{A},$$

где  $L$ —длина зуба ножа, позволяет определить время движения  $T$  по нему, м.

Тогда скорость схода с основания зуба ножа определяется по формуле (2.5).

$$V_k = c_1 \cdot k_1 \cdot e^{k_1 \cdot t} + c_2 \cdot k_2 \cdot e^{k_2 \cdot t}.$$

Для конкретных численных значений:  $\omega$  – угловая скорость,  $c^{-1}$ ,  $\omega=272 c^{-1}$ ;

$f$  – коэффициент трения зерна по металлу,  $f=0,5$ ;

$g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ,  $g=9,81 m/c^2$ ;

$H$  – длина вертикального участка, м,  $H=0,04$  м;

$L$  – длина зуба, м,  $L=0,02$  м;

$\alpha$  – угол наклона зуба ножа,  $\alpha=45^\circ$ ;

$\lambda$  — коэффициент бокового давления сыпучего материала,  $\lambda= 0,44$ ;

$m$  – масса зерна, кг,  $m=0,00004$  кг;

$\rho$  — гидравлический радиус поперечного сечений силоса, м,  $\rho=0,01$  м;

$s$  – площадь контакта зерна,  $m^2$ ,  $s=0,000005 m^2$ ;

$\gamma$  – удельный вес насыпного зерна,  $H/m^3$ ;  $\gamma=6500 H/m^3$ .

Решая численным методом задачу Коши для вертикального участка, определяем закон движения элемента массы и его скорость в зависимости от времени. На рисунке 2.3 показан закон изменения скорости элемента массы в зависимости от времени.

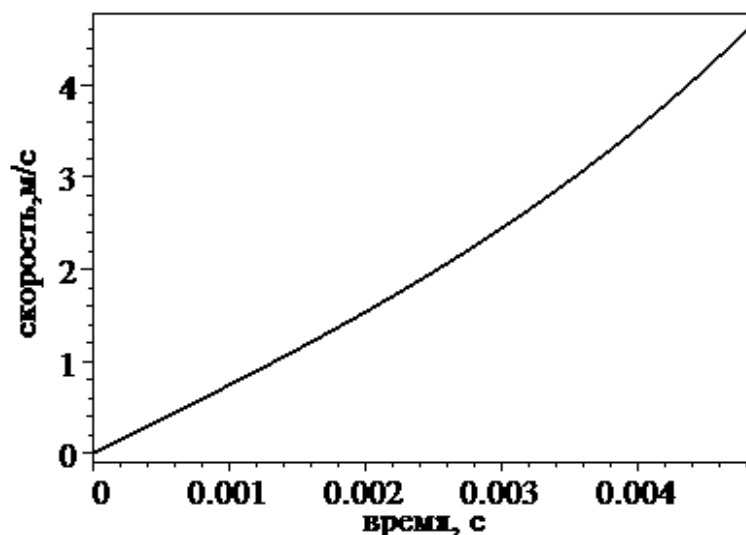


Рисунок 2.3 – закон изменения скорости элемента массы в зависимости от времени (движение вверх)

Время движения на вертикальном участке составляет  $T=0,0049$  с.

Скорость на выходе с вертикального участка и, соответственно, начальная скорость для второго участка:

$$V_k = V_0 = 4,69 \text{ м/с} .$$

Решение задачи Коши с этой начальной скоростью дает нам закон движения по основанию зуба ножа:

$$y(t) = 0,026 \cdot e^{70,5 \cdot t} - 0,03 \cdot e^{-263 \cdot t} - 0,028.$$

Дифференцируя это уравнение, получаем закон изменения скорости на этом участке:

$$V(t) = 1,81 \cdot e^{70,5 \cdot t} + 7,7 \cdot e^{-263 \cdot t}.$$

Подставляя в уравнение движения принятое значение длины зуба ножа  $L$ , получаем:

$$0,02 = 0,026 \cdot e^{70,5 \cdot t} - 0,03 \cdot e^{-263 \cdot t} - 0,028.$$

Решая данное трансцендентное уравнение, мы определяем время движения по основанию зуба ножа:  $T_1 = 0,0096 \text{ с}$ .

Подставив найденное время движения  $T_1$  в формулу закона изменения скорости, мы определим скорость схода элемента массы с основания зуба ножа:

$$V_{\text{кон}} = 1,81 \cdot e^{70,5 \cdot T_1} + 7,7 \cdot e^{-263 \cdot T_1} \Rightarrow$$

$$V_{\text{кон}} = 4,17 \text{ м/с}.$$

Закон изменения скорости от времени на двух участках представлен на рисунке 2.4:

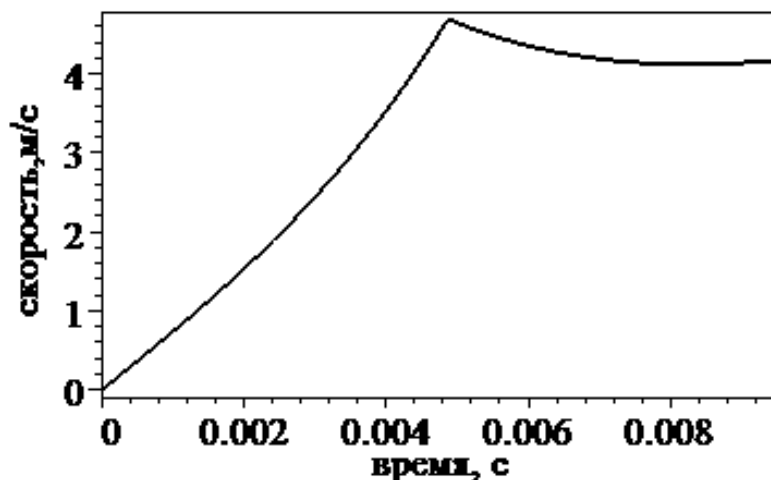


Рисунок 2.4 – Закон изменения скорости элемента массы в зависимости от времени на двух участках (движение вверх)

При движении элемента массы вниз в уравнениях движения на вертикальном и наклонном участках "g" изменится на "-g". Проведя аналогичные расчеты мы получили, что скорость при сходе с зуба ножа равняется  $V_{кон} = 4,22 \text{ м/с}$ .

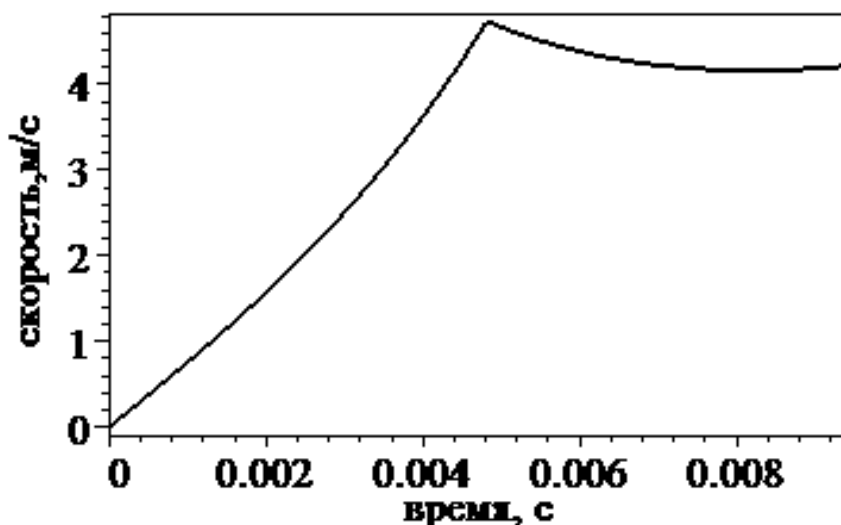


Рисунок 2.5 - Закон изменения скорости элемента массы в зависимости от времени на двух участках (движение вниз)

Очевидно, что скорости схода частиц с основания зуба ножа в направлениях, отличных от вертикали будут находиться в диапазоне между 4,17 м/с и 4,22 м/с.

Полученные уравнение позволят определить скорость перемещения зерна по вертикальной поверхности диска и зубу ножа в УЦИ. Скорость движения зерна зависит от угловой частоты вращения диска и от длины ножа.

Определим скорости удара зерновки с рабочими элементами последующих ступеней измельчения (рисунок 2.6).

Найдем угловую скорость вращения,  $c^{-1}$ :

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30},$$

где  $n$  – частота вращения диска,  $\text{мин}^{-1}$ .

$$\omega = \frac{3.141 \cdot 2600}{30} = 272 \text{ с}^{-1}.$$

Ударная угловая частота равняется:

$$\omega_{уд} = 2 \cdot \omega = 544 \text{ с}^{-1}.$$

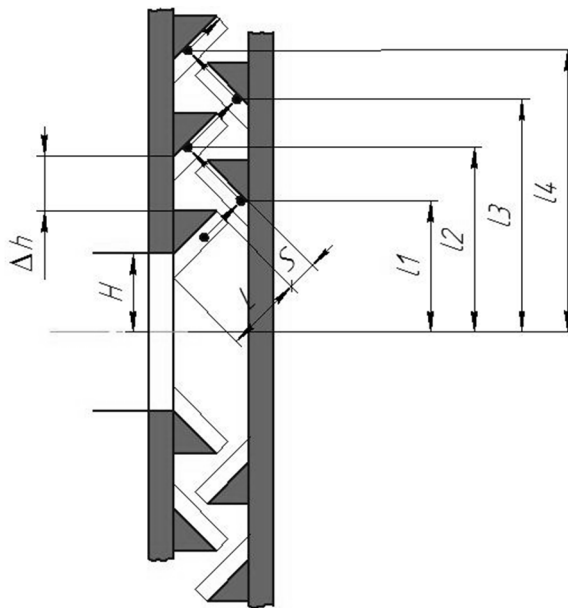


Рисунок 2.6 - Схема для определения скорости удара зерновки с рабочими элементами последующих ступеней измельчения

Найдем длину, на которой будет осуществляться 1 удар о зерновку:

$$l_1 = H + ((L + S) \cdot \cos\alpha), \quad (2.6)$$

$$l_{i+1} = l_i + (L \cdot \cos\alpha) + \Delta h_i = 1,2,3; \quad (2.7)$$

где  $H$  – длина вертикального участка, м,  $H=0,04$  м;

$L$  – длина зуба, м,  $L=0,02$  м;

$S$  – зазор, м,  $S=0,003$  м;

$\Delta h$  – расстояние между ножами, м,  $\Delta h = 0.005$  м;

$\alpha$  – угол наклона зуба ножа,  $\alpha=45^\circ$ ;

Скорость удара будет равна:

$$V_i = \omega_{\text{уд}} \cdot l_i. \quad (2.8)$$

Подставив все исходные данные в формулы (2.6, 2.7, 2.8) получим:

$$l_1 = 0,04 + ((0,02 + 0,003) * \cos 45^\circ) = 0,056 \text{ м};$$

$$V_1 = 544 * 0,056 = 30,6 \text{ м/с};$$

$$l_2 = 0,056 + ((0,02 + 0,003) * \cos 45^\circ) + 0,005 = 0,077 \text{ м};$$

$$V_2 = 544 * 0,077 = 42,03 \text{ м/с};$$

$$l_3 = 0,077 + ((0,02 + 0,003) * \cos 45^\circ) + 0,005 = 0,098 \text{ м};$$

$$V_3 = 544 * 0,098 = 53,3 \text{ м/с};$$



$$l_4 = 0,098 + ((0,02 + 0,003) * \cos 45^\circ) + 0,005 = 0,119 \text{ м};$$

$$V_4 = 544 * 0,119 = 65,7 \text{ м/с};$$

Полученные скорости удара изменяется в пределах от 30,6 м/с до 65,7 м/с, что является достаточным условием для разрушения зерновки ячменя [110].

## 2.2. Определение производительности УЦИ

Основными рабочими элементами УЦИ являются ножи, установленные в пазах диска. Они захватывают зерно которое поступает через загрузочные окна в центральную часть дробилки при этом разгоняя его и направляя под удар измельчающих элементов второго диска.

При многоступенчатом измельчения, производительность УЦИ равняется производительности первой ступени. В данной конструкции она определяется количеством зерна, проходящего по измельчающим элементам и конусам первого диска зависящая в большей степени от количества ножей и скорости движения зернового материала по ним.

Предположим, что зерновой материал движется по ножу и конусу диска одним слоем, то его количество в единицу времени можно определить из выражения:

$$q = \frac{3600 * \pi * d_s^2 * V}{4 * 1000} * \rho, \quad (2.9)$$

где  $q$  – производительность ножа, т/ч;

$d_s$  – эквивалентный диаметр зерна, м;

$V$  – скорость перемещения зерна по плоскости ножа, м/с;

$\rho$  – плотность измельчаемого материала кг/м<sup>3</sup>.

Производительность УЦИ определяется количеством ножей установленных на диске.

$$Q = \frac{3600 * \pi * d_s^2 * V}{4 * 1000} * \rho * z, \quad (2.10)$$

где  $Q$  – производительность измельчителя, т/ч;

$z$  – количество ножей на диске.

Производительность измельчителя будет зависеть и от диаметра загрузочного окна. (рисунок 2.7).

Допустим, что толщина ножа очень мала, то максимальную производительность УЦИ примет вид:

$$Q = \frac{3600 * \pi^2 * D_0 * d_3 * v * \rho}{1000}, \quad (2.11)$$

где  $D_0$  – диаметр приемной камеры, м.

Так как ножи УЦИ имеют определенную толщину, то с ее учетом выражение (2.11) примет вид:

$$Q = \frac{3600 * (\pi^2 * D_0 - z * \delta) * d_3 * v * \rho}{1000}, \quad (2.12)$$

где  $\delta$  – толщина ножа, м.

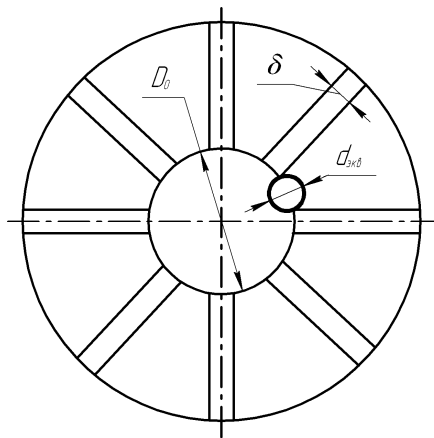


Рисунок 2.7 – Схема для определения производительности УЦИ

Исходя из того, что с увеличением количества ножей расстояние между ними будет уменьшаться, т.е. оно может стать менее размеров частицы зерна и УЦИ станет не работоспособным, количество лопаток будет ограничено:

$$z \leq \frac{\pi D_0}{d_3 + \delta}. \quad (2.13)$$

Исходя из формулы (2.13) выражение (2.10) примет вид:

$$Q = \frac{3600 * (\pi d_3)^2 D_0}{4 * 1000 * (d_3 + \delta)} \rho v. \quad (2.14)$$

Введем в формулу 2.14 экспериментально определяемый коэффициент заполнения межножевого пространства ( $K_3$ ), получим:

$$Q = K_3 * \frac{3600 * (\pi d_3)^2 D_0}{4 * 1000 * (d_3 + \delta)} \rho v. \quad (2.15)$$

Из уравнения (2.15) видно, что производительность УЦИ зависит от диаметра загрузочной камеры, скорости движения зернового материала по ножу, количества и толщины ножей и свойств измельчаемого материала.

При изменении частоты вращения в пределах от 500 об/мин до 900 об/мин зависимость производительности измельчителя от частоты вращения загрузочного диска представлен на рисунке 2.8. Исходные данные для построения графика представлены в таблице приложение 10.

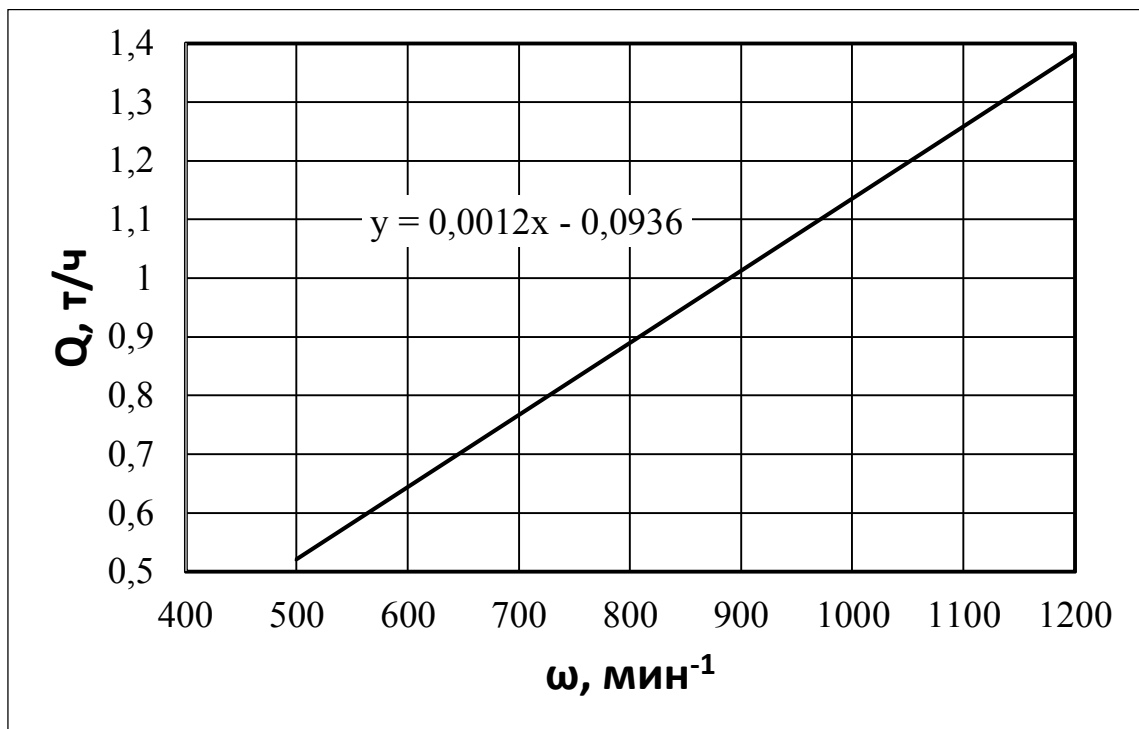


Рисунок 2.8 – Зависимости производительности от частоты вращения загрузочного диска

### 2.3. Определение параметров, влияющих на степень измельчения зерна

Степень измельчения зернового продукта при ударном воздействии зависит от относительного перемещения элемента массы по ножу УЦИ за промежуток времени между двумя соседними воздействиями ножей на него. Относительное перемещение элемента массы  $x$  определяется:

$$x = v_{отн} t, \quad (2.16)$$

где  $v_{отн}$  – скорость перемещения частицы по зубу ножа, м/с;

$t$  – время между соседними воздействиями ножей на частицу, с,

$$t = \frac{(l + \delta)}{\omega R}, \quad (2.17)$$

где  $l$  – длина дуги между соседними ножами, м;

$\delta$  – толщина ножа, м;

$\omega$  – угловая частота вращения, с<sup>-1</sup>;

$R$  – радиус вращения, м.

Исходя из рисунку 2.9, имеем:

$$(l + \delta) = \frac{2\pi R}{z}, \quad (2.18)$$

где  $z$  – количество лопаток.

Совместное решение выражения (2.17) и (2.18), дает нам время между ударами:

$$t = \frac{2\pi R}{z\omega R}. \quad (2.19)$$

При вращении измельчающих дисков в одном направлении с постоянной угловой скоростью  $\omega$  выражение (2.19) примет следующий вид:

$$t = \frac{\pi}{z\omega}. \quad (2.20)$$

Значение отсекаемой части зерновки будет равно:

$$x = \frac{\pi U_{отн.}}{z \omega} \quad (2.21)$$

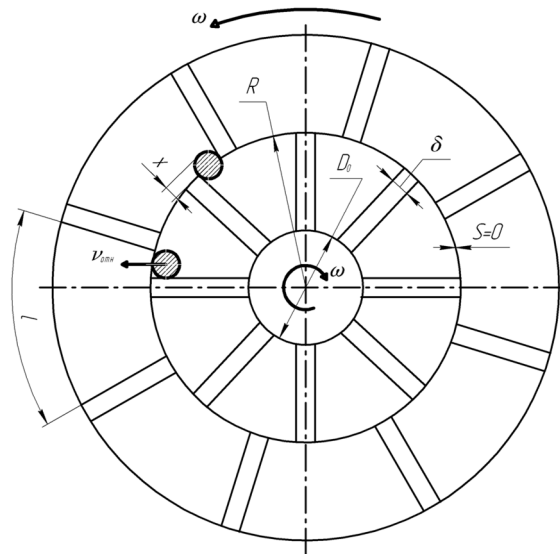


Рисунок 2.9 – Схема определения степени измельчения зерновки при минимальном зазоре

При увеличении зазора между ножами УЦИ скалывающаяся часть  $x$  тоже будет увеличиваться (рисунок 2.10):

$$x = \frac{\pi U_{отн.}}{z \omega} + S, \quad (2.22)$$

где  $S$  – величина зазора между ножами.

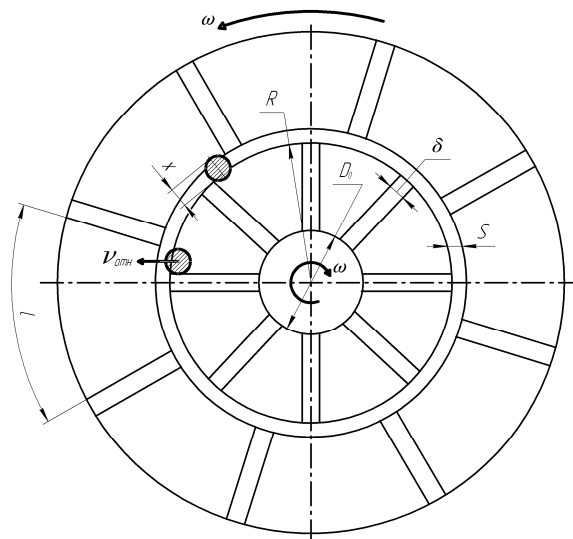


Рисунок 2.10 – Схема определения степени измельчения зерновки при зазоре не равном нулю

Анализируя выражение (2.22) видно, что величина скалываемой части зерновки зависит от количества измельчающих элементов и зазора.

При зазоре меньше чем эквивалентный диаметр частиц  $d_{\text{э}}$ , наблюдается скалывающее воздействие, а при достижении зазора равного эквивалентному диаметру зерновка раскалывается пополам. При дальнейшем движении зерновки она подвергается большему ударному воздействию ножей, которое зависит от окружной скорости измельчающих дисков.

На рисунке 2.11 представлена схема движение зерновки при зазоре  $S$  меньше, чем эквивалентный диаметр.

Введем обозначение:  $h$  – высота ножа,  $L$  – длина ножа,  $L_x$  – величина перемещения частицы по ножу,  $R_0$  – радиус первого конуса левого диска,  $R_1$  – радиус первого конуса правого диска.

При сходе с ножа левого диска зерновка движется перпендикулярно к конусу правого диска по прямолинейной траектории. Определим радиус  $R_1$ , на котором происходит контакт частицы со вторым диском.

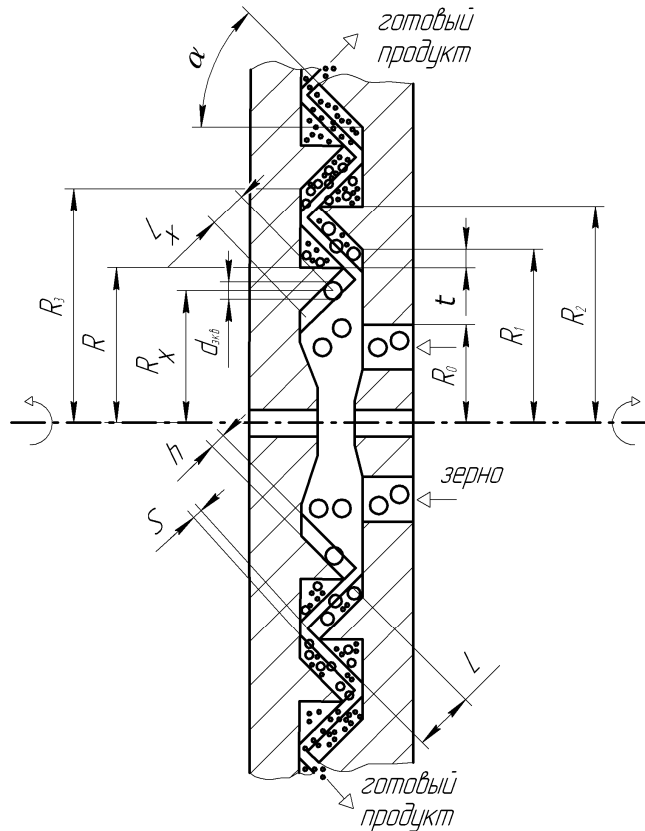


Рисунок 2.11 – Схема перемещения зернового материала в УЦИ при зазоре меньше эквивалентного диаметра зерновки

При зазоре  $S < d_3$

$$R_1 = R_0 + (L + h + d_3) \sin \alpha. \quad (2.23)$$

Определим перемещение зернового материала по измельчающим элементам  $L_x$ :

$$L_x = \frac{R_1 + L \sin \alpha - (R_0 + (L + h + d_3) \sin \alpha)}{\sin \alpha}. \quad (2.24)$$

В связи с тем что вершины конусов дисков смещены относительно друг друга, то:

$$R_1 = R + (h + S) \sin \alpha, \quad (2.25)$$

$$R_2 = R_1 + L \cos \alpha, \quad (2.26)$$

$$R_3 = R_2 + (h + S) \sin \alpha, \quad (2.27)$$

тогда:

$$L_x = \frac{R + L \sin \alpha - R_0 - (S + (L + h + d_3) \sin \alpha)}{\sin \alpha}. \quad (2.28)$$

Исходя из полученного выражения (2.28) можно сделать заключение, что с увеличением зазора между дисками уменьшается скорость схода материала с плоскости ножа, что в последствии приведет к переизмельчению готового продукта.

В заключении можно сделать вывод, что данная конструктивная разработка УЦИ позволяет в широком диапазоне варьировать зазорами между измельчающими элементами и окружной скоростью дисков не меняя конструктивных и кинематических параметров установки.

## 2.4. Выводы

1. Теоретический анализ работы ударно-центробежного измельчителя выявил возможность его работы в широком диапазоне изменения конструктивных параметров.

2. Получены теоретические зависимости скорости движения зерна по вертикальной поверхности диска и зубу ножа в ударно-центробежном измельчителе, зависящие от угловой частоты вращения дисков и от длины ножа.

3. Выявлены теоретические аспекты зависимостей производительности УЦИ, которые в своей основе принимают его конструктивные параметры и режимы, в частности к ним относятся: частота вращения измельчающих дисков, диаметр загрузочного окна, длина ножа, его количественное соотношение, толщину, а так же свойство и параметры зернового материала.

4. На основе анализа теоретической базы исследований нами выявлена возможность повышения качественных характеристик получаемых продуктов, а также производительность УЦИ на основе конструктивных изменений основных параметров ножей.

5. Определены ведущие значимые факторы, определяющие на качество измельчения материала.

6. Учитывая принятые допущения, теоретические предпосылки и основ рациональных режимов и конструкций УЦИ, которые являются ведущими в дробительном процессе, складывается необходимость проведения эксперимента по их практическому обоснованию.



### **3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

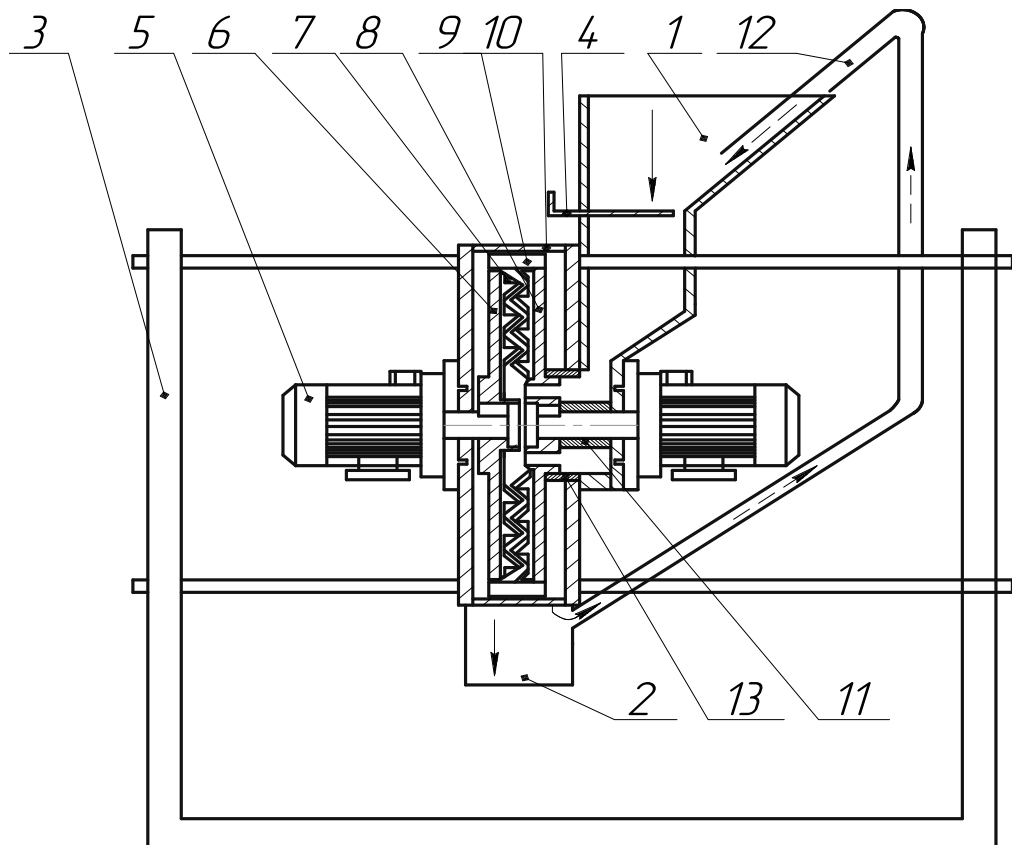
#### **3.1 Программа экспериментальных исследований**

Для проверки теоретических данных и выбора конструктивных и технологических параметров УЦИ была разработана программа экспериментальных исследований:

1. Проверить теоретические полученные производительности УЦИ экспериментально.
2. Определить конструктивные и технологические параметры влияющие на показатели работы УЦИ.
3. Провести сравнительные исследования нового конструктивного решения УЦИ и молотковой дробилки КДУ-2.

#### **3.2 Оборудование, материалы и приборы, применяемые при проведении исследований**

УЦИ (рисунок 3.1.) содержит загрузочное устройство 1, в корпусе которого соосно расположены диски 6 (левый) и 8 (правый) с кольцевыми канавками в виде выступов треугольной формы и впадин в форме трапеций, на которых установлены ножи 7, выгрузное устройство 2, цилиндрический корпус 10, раму 3, электродвигателя 5, разгонных лопаток 9, задвижки 4, патрубка 12. Ножи правого диска входят во впадины левого диска с образованием зазора  $S$ . Правый диск 8 имеет загрузочные отверстия с кольцевым направителем 13 для более точной загрузки зернового материала в УЦИ. Диски 6,8 закреплены на валах электродвигателя с возможностью вращения в противоположные стороны. Цилиндрический корпус измельчителя закрыт кожухом [119, 148, 151, 154].



1-загрузочное устройство, 2- выгрузное устройство, 3- рама, 4- заслонка, 5- электродвигатель, 6- диски (левый), 7- ножи, 8- диск (правый), 9- разгонные лопатки, 10-измельчитель с цилиндрическим корпусом, 11- втулка, 12- патрубок, 13- кольцевой направляющий.

Рисунок 3.1 – Схема УЦИ

Для оптимального протекания процесса измельчения в УЦИ, т.е. для обеспечения скалывающего воздействия и свободного движения измельчаемых частиц с выступа одного диска на выступ другого диска, впадины канавок могут быть выполнены в форме прямоугольной трапеции с острым углом  $45^{\circ}$ , что соответствует углу вершин треугольных выступов  $\alpha = 45^{\circ}$ . Диски имеют возможность перемещаться относительно друг друга в осевом направлении, изменяя при этом зазор между дисками и лопатками.

УЦИ работает следующим образом. Измельчаемый продукт подается в корпус 10 измельчителя через загрузочное устройство 1, за счет воздушного потока из патрубка 12 и разрежения создаваемого внутри измельчителя материал поступает в центр междискового пространства. Материал через окно правого дис-

ка 8 поступает в центральную часть измельчителя, где захватывается ножами левого диска 6 и движется по поверхности этих ножей и образующей конуса получая при этом некоторую скорость. Измельченное до некоторой величины зерно проходит через зазоры между ножами не переизмельчаясь. Варьируя зазором можно добиться различного модуля помола зернового материала. При сходе с последнего конуса левого диска 6 продукт попадает на дополнительные лопатки 9, которыми разгоняется и дополнительно измельчается. Создаваемый при этом воздушный поток способствует быстрому выведению продукта из зоны измельчения. Далее воздушно-продуктовая смесь выходит через выгрузное устройство 2, воздух по патрубку 12 направляется обратно в загрузочное устройство 1 измельчителя и способствует подаче материала в измельчитель. Выгрузное устройство позволяет отбирать пробы готового продукта в процессе работы. За счет циркуляции воздуха снижается энергоемкость процесса измельчения и затрачивается на 10 % меньше затрат на перемещение воздушно-продуктовой смеси.

Для проведения экспериментальной оценки технологических и конструктивных параметров УЦИ на кафедре «Механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции» ВГАУ был изготовлен экспериментальный УЦИ (рисунок 3.2) [119].



Рисунок 3.2 – Экспериментальная установка УЦИ



Рисунок 3.3 – Разборный вид УЦИ

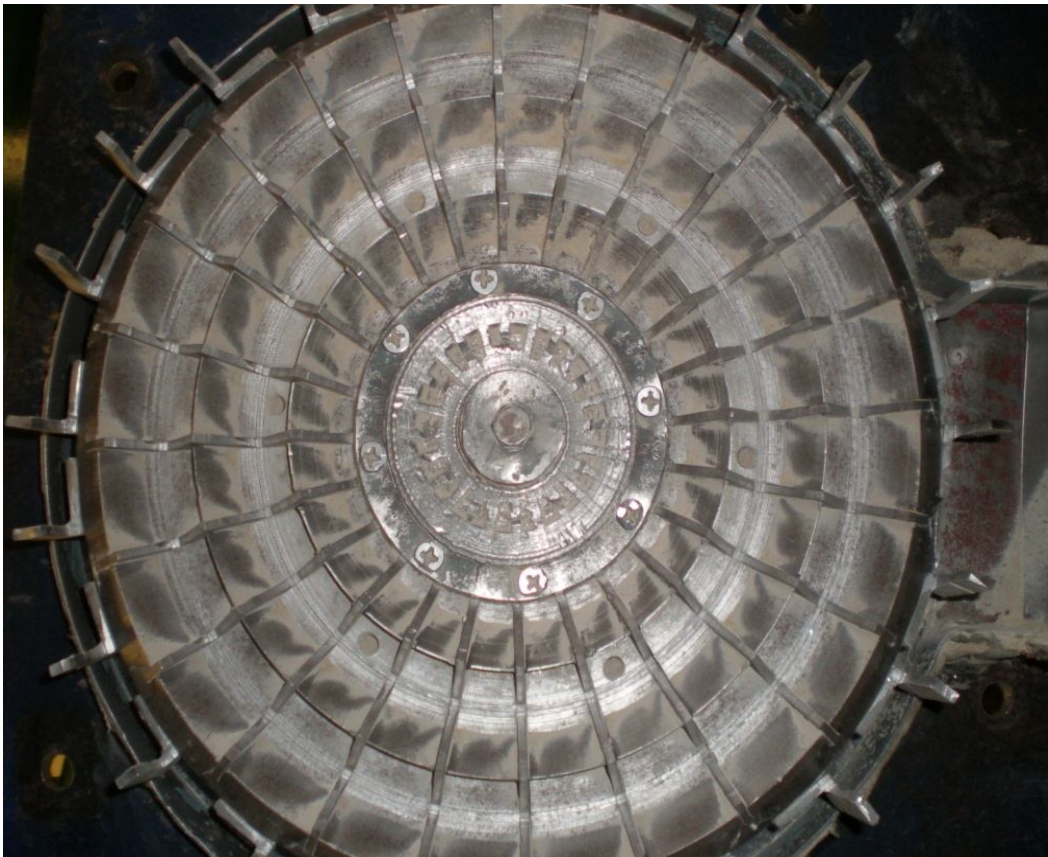


Рисунок 3.4 – Левая половина УЦИ



Рисунок 3.5 – Правая половина УЦИ с загрузочными окнами

Подача материала в УЦИ осуществлялась с помощью тарельчатого дозатора ДТК. Частоту вращения измельчающих дисков изменяли преобразователем частоты Altivar 31 с дальнейшим замером с помощью тахометра Т 410–Р ГОСТ 13082–71. Экспериментальная конструкция УЦИ позволяет легко изменять частоту вращения правого и левого дисков, зазор, количество измельчающих элементов и разгонных лопаток. На рисунке 3.2. представлен вид общий УЦИ. На рисунках 3.3., 3.4., 3.5. приведены основные узлы УЦИ. В таблице 3.1 показана техническая характеристика измельчителя фуражного зерна.

Таблица 3.1 –Техническая характеристика УЦИ

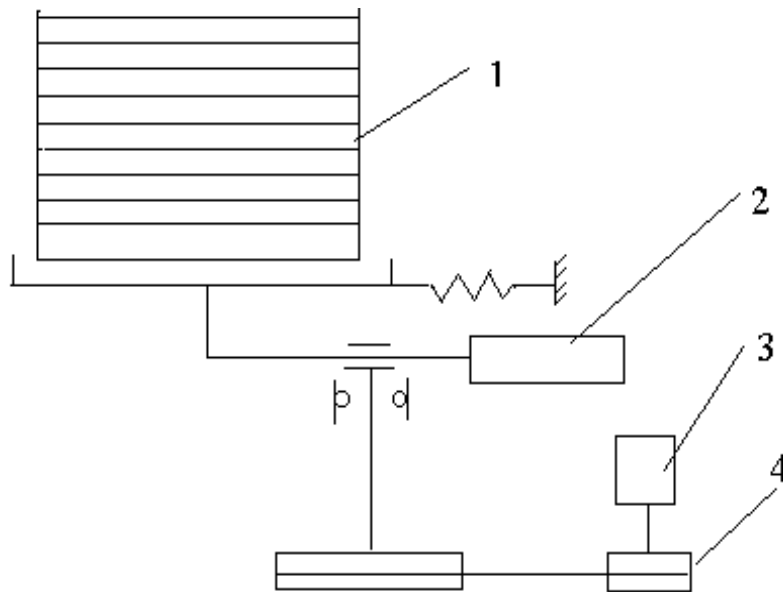
Показатели	Величина
Максимальный диаметр рабочей камеры, $D_{\max}$ , мм	320
Минимальный диаметр рабочей камеры, $D_{\min}$ , мм	100
Количество выступов (ступеней) на диске, шт.	4
Количество ножей и лопаток на диске, шт.	до 24
Величина зазора, мм	2,5 – 5
Частота вращения дисков, $\text{мин}^{-1}$	600 – 3000
Мощность электродвигателей, кВт	6

Для определения энергоемкости процесса измельчения использовали трехфазные электронные счетчики с погрешностью измерения не более 0,5 %.

Масса отобранных проб готового продукта взвешивалась на весах ВП–50, а остаток на ситах классификатора – на весах ВНУ.

Фракционный состав готового продукта определялся на ситовом классификаторе, схема которого представлена на рисунке 3.6. [61, 163].

Принцип работы классификатора заключается в передаче вращательного движения от электродвигателя 3 за счет клиноременной передачи 4 эксцентриковому механизму 2, который в свою очередь преобразует его в колебательное движение колонки с набором сит 1. Частота колебаний классификатора варьирует от 190 до 200 колебаний в минуту с амплитудой 35 мм. Время, отведенное на полное просеивание отобранных проб варьирует от 5 мин. до 8 мин..



1 – набор сит; 2 – противовес; 3 – электродвигатель; 4 – клиноременная передача.

Рисунок 3.6 – Схема лабораторного классификатора

Величина зазора изменялась с помощью установки дополнительных шайб в проставки между дисками и контролировалась с помощью штангенциркуля в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Исходным материалом в опытах выступал ячмень сорт Таловский 9 характеристика которого приведена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Краткая характеристика измельчаемого ячменя

Наименование показателей	Единицы измерения	Численная величина
Натурный вес	г/л	770
Сорная примесь	%	2,4
в том числе:		
минеральная	%	0,6
зерновая	%	1,9
Пленчатость	%	1,5
Влажность	%	13 – 15

### 3.3 Методика проведения экспериментальных исследований

#### 3.3.1 Определение основных показателей процесса измельчения

Производительность, энергоёмкость и выравненность гранулометрического состава готового продукта являются основными показателями характеризующими процесс дробления.

Производительность УЦИ изменялась с помощью дозатора ДТК с дальнейшим контролем проб готового продукта при стабильном режиме работы.

Производительность УЦИ определяли из выражения:

$$Q = 3600 \frac{M}{t}, \quad (3.1)$$

где Q – производительность измельчителя, кг/ч;

M – масса отобранной пробы, кг;

t – время отбора пробы, с.

Мощность, подводимая к УЦИ, замерялась электронными счетчиками трехфазного тока в стабильном режиме работы в момент отбора проб.

Мощность, расходуемая на привод дисков УЦИ, определялась по формуле:

$$N = (N_a + N_b + N_c) \times \eta, \quad (3.2)$$

где N – расходуемая на привод измельчителя мощность, кВт;

$N_a, N_b, N_c$  – показания счетчика по фазам А, В, С, кВт;

$\eta$  – к.п.д. электродвигателя.

Коэффициент полезного действия электродвигателя имеет разные значения при нагрузке ниже оптимальной, на основании этого была взята неполная характеристика к.п.д. электродвигателя от подводимой мощности, представленная на рисунке 3.7.

За критерий оценки при определении гранулометрического состава готового продукта принят модуль помола  $M$  и однородность.

Профессором А.В. Макаровым разработан ситовый метод, который был взят за основу при определении модуля помола [61].

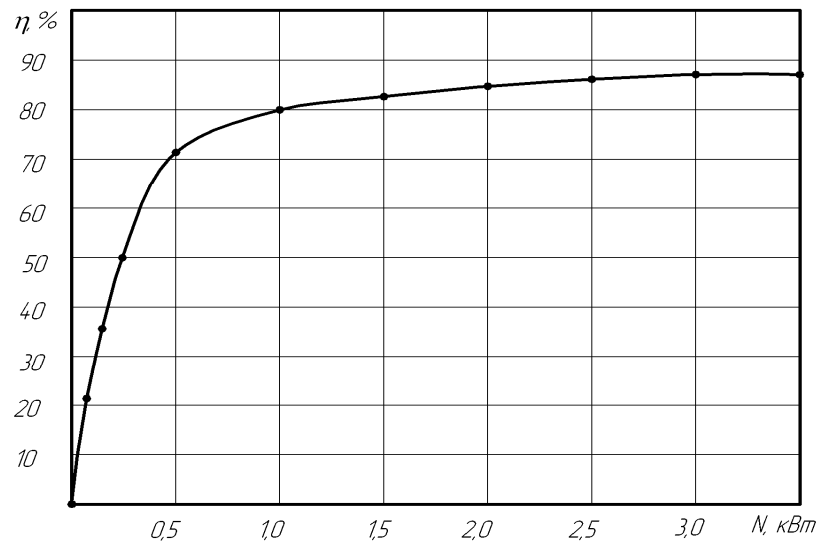


Рисунок 3.7 – Зависимость сумарной мощности от к.п.д. электродвигателя

Суть метода А.В. Макарова состоит в следующем. Навески фуражного зерна массой 100 г просеиваются в течение 5 минут через набор сит с диаметрами отверстий 3, 2 и 1 мм. Модуль помола определяется по формуле:

$$M = (3,5P_1 + 2,5P_2 + 1,5P_3 + 0,5P_0) / 100, \quad (3.3)$$

где  $M$  – модуль помола, мм;

$P_1, P_2, P_3$  – массовые остатки на ситах с диаметрами отверстий 3, 2 и 1 мм соответственно, г;

$P_0$  – масса остатка на дне, г.



Для получения более точных данных о дисперсности получаемого продукта использовали ситовой классификатор, состоящий из набора сит с размерами отверстий 3,0, 2,0, 1,6, 1,3, 1,0, 0,85, 0,2 мм. Масса навески при этом была увеличена до 1,5 – 2,5 кг.

Модуль помола определяли по формуле:

$$M = \frac{3,5P_1 + 2,5P_2 + 1,8P_3 + 1,45P_4 + 1,15P_5 + 0,925P_6 + 0,525P_7 + 0,1P_8}{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8}, \quad (3.4)$$

где  $P_1$ – $P_8$  – массы остатков на соответствующих ситах и дне, кг.

Однородность гранулометрического состава готового продукта оценивали статистическими методами, а качество измельченного ячменя сравнивали с требованиями к гранулометрическому составу измельченного продукта по ГОСТ 13496.8–72 (таблица 3.3.) [30].

Таблица 3.3 – Требования к гранулометрическому составу измельченного продукта

Группа	Остаток на сите, %, с отверстиями диаметром, мм			Содержание целых зерен, %
	2	3	4	
1	Не допускается	-	-	Не допускается
2	Не более 5	Не допускается	-	Не допускается
3	-	Не более 5	Не допускается	Не более 0,3
4	-	Не более 35	Не более 5	Не более 0,7

### 3.3.2 Определение скорости рабочих органов

Частоту вращения измельчающих дисков УЦИ меняли асинхронным преобразователем Altivar 31.

Окружную скорость измельчающих дисков УЦИ определяли:

$$V = \pi R n / 30, \quad (3.5)$$

где  $V$  – окружная скорость, м/с;

$R$  – расстояние от оси вращения диска до точки определения скорости, м;

$n$  – частота вращения диска,  $\text{мин}^{-1}$ .

При установившемся режиме работы УЦИ частоту вращения измельчающих дисков с помощью тахометра Т 410–Р ГОСТ 13082–71.

### 3.3.3 Определение зазора между лопатками

Зазор между измельчающими ножами регулировался перемещением дисков относительно друг друга в осевом направлении. Величина зазора контролировалась штангенциркулем по всей плоскости дисков.

### 3.3.4 Методика определения энергоемкости процесса измельчения

Основным показателем процесса измельчения зерна является энергоемкость процесса измельчения до определенной крупности.

Она состоит из трех основных элементов:

$$N = N_{x,x} + N_{изм} + N_{тр} \quad (3.6)$$

где  $N_{x,x}$  – энергия затрачиваемая на холостой ход измельчителя, кВт;

$N_{изм}$  – энергия затрачиваемая на измельчение продукта, кВт;

$N_{тр}$  – энергия затрачиваемая на перемещение продукта внутри измельчителя, кВт.

Удельными затратами энергии определяются как отношение затрат энергии к производительности установки:

$$Aуд. = (N_{xx} + N_{изм} + N_{тр}) / Q, \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}. \quad (3.7)$$

При учете энергопотерь электродвигателем в формулу 3.7 подставляется значение полной энергии, т.е.  $N_{xx} + N_{изм} + N_{тр}$ , для сравнения различных режимов работы УЦИ.

Сравнение режимов работы УЦИ по удельному энергорасходу можно проводить только лишь при одинаковой степени измельчения продукта, однако при различных режимах работы измельчителя это сравнение не корректно.

Объективным показателем эффективности работы УЦИ является удельная энергоемкость, определяемая отношением удельного расхода энергии к степени измельчения материала.

$$\mathcal{E}_u = \frac{A_{y\partial}}{\lambda} = \frac{N_{x.x} + N_{изм} + N_{тр}}{Q \times \lambda}, \quad \text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{т} \cdot \text{единиц степени измельчения}, \quad (3.8)$$

где  $\lambda$  – степень измельчения продукта, единиц степени измельчения.

$$\lambda = d_{\text{экв}} / M, \quad (3.9)$$

где  $d_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр зерновки измельчаемого продукта.

### 3.4 Методика оценки точности измерений

Системные ошибки способствуют искажению достоверности получаемых параметров. Для исключения системных ошибок проводят тарировку и проверку измерительных приборов после каждой серии опытов.

Погрешность приборов при измерении затрат энергии составляет 0,5 %.

Предельная относительная ошибка величины удельного расхода энергии составляет:

$$\frac{\Delta n(A_{y\partial})}{A_{y\partial}} = \pm \left[ \frac{\Delta n(A_{\text{эф}})}{A_{\text{эф}}} + \frac{\Delta n(Q)}{Q} \right] = \pm(0,5 + 1,55) = \pm 2,05\%. \quad (3.10)$$

При определении производительности величину предельной относительной ошибки определяли по формуле:

$$\frac{\Delta n}{Q} = \pm \left[ \frac{\Delta n(q)}{q} + \frac{\Delta n(t)}{t} \right], \quad (3.11)$$

где  $q$  – масса пробы за время опыта, кг;

$t$  – время опыта, с;

$\Delta n$  – отклонение измеряемой величины.

При замере времени опыта секундомером и взвешивании пробы на технических весах предельную ошибку в % принимали в соответствии с их техническими характеристиками:

$$\frac{\Delta n(q)}{q} = \pm 0,1\% \quad \text{и} \quad \frac{\Delta n(t)}{t} = \pm 0,55\%, \quad (3.12)$$

$$\frac{\Delta n(Q)}{Q} = \pm(1,0 + 0,55) = 1,55\%. \quad (3.13)$$

Остаток на ситах при взвешивании на весах принимали

$$\frac{\Delta n(P_i)}{P_i} = 0,15\% . \quad (3.14)$$

Предельная ошибка при расчете влажности зерна определяются:

$$\frac{\Delta n(B)}{B} = \pm \left[ \frac{\Delta n(I_{\text{сух}})}{I_{\text{сух}}} + \frac{\Delta n(I_{\text{вл}})}{I_{\text{вл}}} \right] = \pm(0,15 + 0,15) = \pm 0,3\%. \quad (3.15)$$

Исходя из выше изложенного можно сделать заключение о достаточной точности проводимых исследований.

Статистические ошибки измерений определялись методом математической статистики и теории ошибок. Среднеарифметическое значение измеряемых параметров равняется:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (3.16)$$

где  $y_i$  – величина значения  $i$ -го измерения;

$n$  – количество измерений.

Точность определения среднего арифметического значения при многократном измерении равняется среднему квадратическому отклонению:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}, \quad (3.17)$$

Коэффициент вариации определяли по формуле:

$$V = \frac{100\sigma}{\bar{y}}. \quad (3.18)$$

Ошибку среднего значения находили по формуле:

$$m = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (3.19)$$

При подборе оборудования их точность оценивалась по максимально возможной статистической ошибке. При подготовке к испытаниям экспериментального образца УЦИ были использованы методики различных исследователей в данной области [39, 55, 61, 102, 168, 169].

### 3.5 Выбор факторов

При анализе теоретических и экспериментальных исследований в области измельчения зерна можно сделать вывод, что правильный выбор параметров процесса измельчения при планировании эксперимента является наиважнейшей задачей, так как рационально выбранные параметры отражают все основные стороны технологического процесса и их минимальном количестве.

При оптимизации рабочего процесса выбираются наиболее значимые критерии исследуемых факторов. Основа исследования рабочего процесса УЦИ с учетом траекторий движения зерна и обоснования его конструктивно-кинематических параметров лежит анализ исследуемых критериев оптимизации, в качестве которых были приняты следующие показатели.

- а) Удельные затраты энергии  $A_{уд}$ , кВт \* ч/т., формула 3.7.
- б) Удельная энергоемкость процесса дробления с учетом степени измельчения материала ( $\lambda$ ) Э, кВт·ч/т·ед. степ. изм., формула 3.8.
- в) Модуль помола, М, формула 3.4.

Исходя из исследований С.В. Золотарева, С.В. Денисова, С.В. Мельникова, Н.С. Елисеева, Н.Е. Дорофеева и других авторов [61, 90, 113, 115, 128, 153], а так-

же на основе теоретические исследования, было выбрано 4 фактора наиболее значимо влияющие на протекание процесса измельчения.

1. Частота вращения правого диска  $N_1$ ,  $\text{мин}^{-1}$ ; 2. Частота вращения левого диска  $N_2$ ,  $\text{мин}^{-1}$ ; 3. Зазор,  $S$ , мм.; 4. Подача материала в дробилку  $Q$ , т/ч.

Уровни варьирования факторов и их кодированные обозначения представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Уровни варьирования факторов

Наименование фактора	Кодированное обозначение	Интервал варьирования	Уровни варьирования				
			$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
1. Частота вращения правого диска $N_1, \text{мин}^{-1}$	$X_1$	52	600	848	900	952	1200
2. Частота вращения левого диска $N_2, \text{мин}^{-1}$	$X_2$	43	2500	2707	2750	2793	3000
3. Зазор, мм	$X_3$	0,3	3	4,2	4,5	4,8	6
4. Подача материала в камеру дробилки, $Q$ , т/ч	$X_4$	35	400	565	600	635	800

Значения остальных факторов были приняты постоянными, согласно предварительно проведенным исследованиям, и на протяжении всего эксперимента не изменялись.

### 3.6 Методика планирования эксперимента

На основании предварительных исследований и анализа литературных источников сделано заключение, что в принятом факторном пространстве искомые функции отклика могут описываться полиномиальными уравнениями второго порядка [15, 39, 58, 168]. Для экспериментальных исследований использовалась методика планирования эксперимента с применением плана Хартли представляющий собой разновидность ортогональных планов, позволяющего получить модель процесса при наименьших затратах времени и средств на проведение эксперимента. Особенность этих планов является то, что ядром плана

служит дробный факторный эксперимент, в котором некоторые линейные эффекты коррелируют с линейными взаимодействиями и в дополнительных точках опыты ставятся в  $m$  повторностях, каждая из которых имеет право опыта.

При проведении опытов их порядок и регистрация исследуемых параметров и режимов работы проводилась по методике, приведенной в предыдущих разделах. Опыты проводились в трехкратной повторности с проведением рандомизации.

В таблице 3.5 приведен план для четырех факторов [61, 102]. Для сокращения площади повторяющиеся опыты (с 18 по 35) в таблицу не включены. Здесь общее число опытов  $N = 2^{4-1} + m(2 \cdot 4 + 1)$  и для трех повторностей  $N = 8 + 3 \cdot 9 = 35$ . Генерирующее соотношение примем  $X_4 = X_1 X_2$ , хотя можно принять и такие соотношения как  $X_4 = -X_1 X_2$ ,  $X_4 = X_1 X_3$ ,  $X_4 = -X_1 X_3$ ,  $X_4 = X_2 X_3$ ,  $X_4 = -X_2 X_3$ .

Таблица 3.5 – Уровни варьирования факторов

№ опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_1 X_4$	$X_2 X_3$	$X_2 X_4$	$X_3 X_4$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-
3	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+
4	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-
5	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-
6	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+
7	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-
8	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	$-\alpha$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	$+\alpha$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	$-\alpha$	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	$+\alpha$	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	$-\alpha$	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	$+\alpha$	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	$-\alpha$	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	$+\alpha$	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
...										
35	0	0	0	$+\alpha$	0	0	0	0	0	0

Для определения коэффициентов регрессии необходимо, прежде всего, разобраться какие факторы попарно коррелируют друг с другом. Так как определяющий контраст  $X_1 X_2 X_4$ , то помимо уже названной корреляции  $A_{12} \rightarrow A_4$ , можно

выделить еще две:  $A_{24} \rightarrow A_1$  и  $A_{14} \rightarrow A_2$ . Что касается коэффициентов, связанных с третьим фактором, т.е.  $A_3, A_{13}A_{23}$  и  $A_2$  то они ни с какими другими коэффициентами не коррелируют.

Тогда условие симметричности

$$2^K(1 - \hat{X}) - (2K - 1)m\hat{X} + 2m(\alpha^2 - \hat{X}), \quad (3.20)$$

а условие ортогональности

$$2^K(1 - \hat{X})^2 - 4\hat{X}m(\alpha^2 - \hat{X}) + (2K - 3)m\hat{X}^2 = 0. \quad (3.21)$$

В результате подстановка в (3.20) и (3.21) различных значений  $m$  от 1 до 6 и решения системы уравнений для различных  $K$  относительно  $\hat{X}$  и  $\alpha$  получены результаты, приведенные в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Значения расчетных параметров для планов Хартли [61, 102]

К		2	3	4	5	6	7	8
$N_{\text{я}}$		2	4	8	16	16	32	32
	N(без учета повторностей)	7	11	17	27	29	47	51
$\alpha$ для различных $m$	1	0,936	1,15	1,36	1,55	1,67	1,85	1,93
	2	0,853	1,065	1,27	1,47	1,58	1,78	
	3	0,8	1,0	1,21	1,41	1,51	1,72	
	4	0,736	1,956	1,16	1,37	1,46	1,67	
	5	0,733	0,923	1,12	1,33	1,41	1,63	
	6	0,708	0,895	1,09	1,3	1,38	1,6	
$\hat{X}$ для различных $m$	1	0,536	0,603	0,686	0,770	0,740	0,825	0,806
	2	0,409	0,473	0,556	0,650	0,618	0,720	
	3	0,343	0,400	0,479	0,571	0,540	0,646	
	4	0,302	0,354	0,425	0,516	0,486	0,590	
	5	0,273	0,32	0,389	0,475	0,444	0,547	
	6	0,250	0,296	0,365	0,442	0,413	0,514	
$\sum_{n=1}^N (X_{in}^2 - \hat{X})$ для различных $m$	1	1,52	3,49	6,79	11,5	15,5	23,0	28,0
	2	2,11	5,08	10,3	18,7	24,9	39,9	
	3	2,45	6,00	12,9	24,0	31,2	52,4	
	4	2,70	6,68	14,6	28,2	36,2	62,2	
	5	2,87	7,25	15,7	31,4	39,7	70,6	
	6	3,01	7,67	17,0	34,2	43,3	78,3	

Коэффициент регрессии  $A'_0$  и  $A_0$  как и для обычного ортогонального плана, можно получить по выражениям:

$$A'_0 = \frac{\sum_{n=1}^N y_n}{N}, \quad (3.22)$$



$$A_0 = A'_0 - \hat{X} \sum_{i=1}^K A_{ii}. \quad (3.23)$$

Коэффициент регрессии  $A_3$ , который не коррелирует с взаимодействием, определяется из выражения:

$$A_3 = \frac{\sum_{n=1}^N X_{3n} Y_n}{\sum_{n=1}^N X_{in}^2} = \frac{\sum_{n=1}^N X_{3n} Y_n}{N_0 + 2\alpha^2 m}. \quad (3.24)$$

Остальные линейные коэффициенты нетрудно определить, пользуясь только двумя опытами, отличающимися значениями лишь одного фактора:

$$A_1 = \frac{-Y_{10} + Y_{11}}{2\alpha}, \quad (3.25)$$

$$A_2 = \frac{-Y_{12} + Y_{13}}{2\alpha}, \quad (3.26)$$

$$A_4 = \frac{-Y_{16} + Y_{17}}{2\alpha}. \quad (3.27)$$

Коэффициенты регрессии, учитывающие взаимодействие с фактором  $X_3$ , т.е.  $A_{13}$ ,  $A_{23}$  и  $A_{34}$  определяются по обычным формулам для линейных взаимодействий, т.е.

$$A_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^{N_0} X_{in} X_{jn} Y_n}{N_0}. \quad (3.28)$$

Следует обратить внимание на то, что в знаменателе стоит не общее число опытов, а число опытов в ядре планирования. Это объясняется тем, что в остальных опытах  $X_{in} X_{jn} = 0$ . В частном случае  $A_{13}$ :

$$A_{13} = \frac{\sum_{n=1}^{N_0} X_{1n} X_{3n} Y_n}{N_0}. \quad (3.29)$$

При расчете остальных коэффициентов при линейных взаимодействиях с учетом корреляции можно записать:

$$A_{12} = -\frac{-Y_{16} + Y_{17}}{2\alpha} + \frac{\sum_{n=1}^{N_0} X_{1n} X_{2n} Y_n}{N_0}, \quad (3.30)$$

$$A_{14} = -\frac{-Y_{12} + Y_{13}}{2\alpha} + \frac{\sum_{n=1}^{N_0} X_{1n} X_{4n} Y_n}{N_0}, \quad (3.31)$$

$$A_{34} = -\frac{-Y_{10} + Y_{11}}{2\alpha} + \frac{\sum_{n=1}^{N_0} X_{2n} X_{4n} Y_n}{N_0}. \quad (3.32)$$

Коэффициенты при квадратичных членах  $A_{ij}$  для всех факторов рассчитываются по формуле:

$$A_{ii} = \frac{\sum_{n=1}^N y_n (X_{in}^2 - \bar{X})}{\sum_{n=1}^N (X_{in}^2 - \bar{X})^2}, \quad (3.33)$$

при том, что число опытов определяется из выражения:

$$N = 2^{K-1} + m(2K + 1). \quad (3.34)$$

Анализ данные экспериментальных исследований позволяет дополнить и расширить информацию, полученную в теоретических исследованиях.

### 3.7 Статистическая оценка результатов эксперимента и определение значимости коэффициентов регрессии

После проведения опытов вносим в таблицу его результаты  $y_1, y_2, y_3$  и т.д.. Обработку материалов проводим в следующей последовательности [61, 102, 168]:

1. Находим среднеарифметическое из  $m$  повторностей:

$$Y_{cp} = \frac{\sum_{n=1}^m Y_n}{m}. \quad (3.35)$$

2. Находим квадраты отклонений:  $(Y_1 - Y_{cp})^2, (Y_2 - Y_{cp})^2, (Y_3 - Y_{cp})^2$ .

3. По каждой строчке плана находим сумму квадратов отклонений:

$$\sum_{l=1}^m (Y_{ln} - Y_{cp.n})^2 = \sum_{l=1}^m \Delta Y^2, \quad (3.36)$$

где  $l$  – номер повторности опыта;

$n$  – номер строки.

4. Находим построчную дисперсию  $S_n^2$ :

$$S_n^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{l=1}^m Y_{ln} - Y_{cp.n}. \quad (3.37)$$

5. Определяется сумма построчных дисперсий:

$$\sum_{n=1}^N S_n^2. \quad (3.38)$$

6. Определяется расчетное значение критерия Кохрена:

$$G_{max} = \frac{S_{n.max}^2}{\sum_{n=1}^N S_n^2}, \quad (3.39)$$

здесь  $S_{n,max}^2$  - наибольшее значение  $S_n^2$  из всех строчек последнего столбца.

7. Полученное значение критерия Кохрена сравнивается с табличным. Если опыт воспроизводим, то

$$G_{\max \text{ расч}} \leq G_{\max \text{ табл}}. \quad (3.40)$$

Для определения табличного значения критерия Кохрена предварительно находим число степеней свободы  $\gamma_1 = m - 1$ , а  $\gamma_2 = N$ .

После того как определены коэффициенты регрессии (3.22 и 3.23) необходимо выявить их значимость.

8. Для этого находим оценку генеральной дисперсии:

$$S^2 = \frac{\sum_{n=1}^N S_n^2}{N}. \quad (3.41)$$

9. Дисперсия определения коэффициентов регрессии:

$$S_A^2 = \frac{S^2}{N * m}. \quad (3.42)$$

10. Коэффициент регрессии  $A$  значим в том случае, если

$$A > S_A t, \quad (3.43)$$

где  $t$  – критерий Стьюдента, определяемый в зависимости от числа степеней свободы  $\nu = N(m-1)$  и уровня значимости, который для инженерных расчетов принимается равным 5 %.

Таким образом, значимы лишь те коэффициенты регрессии, которые по абсолютной величине удовлетворяют условию (3.43).

11. Дисперсия неадекватности определяется по формуле:

$$\sigma_{\text{неад}}^2 = \frac{m}{N-C} \sum_{n=1}^N (y_{\text{ср}} - y_n)^2, \quad (3.44)$$

где  $C$  – количество значимых коэффициентов регрессии;

$y_n$  – теоретическое значение выходной величины.

12. Критерий Фишера:

$$F = \frac{\sigma_{\text{неад}}^2}{S^2}. \quad (3.45)$$

Полученное расчетное значение критерия Фишера сравнивается с табличным, полученным в зависимости от числа степеней свободы. Если  $F_{\text{расч}} \leq F_{\text{табл}}$ , то полученная математическая модель адекватно описывает процесс.

Для построения математических моделей исследуемого процесса был использован известный статистический пакет программ «STATISTICA 6» и в нем модуль «Multiple Regression» (множественная регрессия). Для детального рассмотрения различных моделей исследуемого процесса была использована процедура пошаговой регрессии «Forward stepwise» (вперед по шагам). Метод пошаговой регрессии состоит в том, что на каждом шаге в модель включается какая-то независимая переменная, т.е. выделяется множество «значимых» переменных. Метод пошаговой регрессии позволяет построить обычную регрессию для нескольких независимых переменных с качественным анализом на каждом шаге. Параллельно проводится проверка по критерию Фишера гипотез о незначимости и значимости полученных уравнений регрессии, а также проверка по критерию Стьюдента гипотез о незначимости и значимости отдельных коэффициентов уравнения регрессии [15, 39, 61, 102, 168].

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ (УЦИ)

Для получения различных уравнений регрессий предварительно к независимым переменным (S, N1, N2, Q) были добавлены факторы их взаимодействий SN1, SN2, SQ, N1N2, N1Q, N2Q и квадратичные эффекты SS, N1N1, N2N2, QQ.

Подробную процедуру пошаговой регрессии для получения адекватных уравнений описывающих изменение удельной энергии измельчения ( $A_{уд}$ ) проследим из полученных результатов.

##### 4.1. Зависимость удельных затрат энергии от скорости измельчающих дисков

Окно результатов при первом шаге имеет следующую структуру:

Regression Summary for Dependent Variable:  $A_{уд}$  (число опытов 51).

Суммарные результаты для зависимой переменной:  $A_{уд}$

$R = 0,86686262$  – коэффициент множественной корреляции;  $R^2 = 0,75145080$  – коэффициент детерминации (квадрат коэффициента множественной корреляции) показывает долю общего разброса параметра  $A_{уд}$ , которая объясняется построенной моделью; Adjusted  $R^2 = 0,74637837$  – скорректированный коэффициент детерминации на число степеней свободы;  $F(1,49)=148,14$  – значение критерия Фишера с числами степеней свободы (1,49). Здесь 1 – число степеней свободы выборочной дисперсии модели, 49 – число степеней свободы остаточной дисперсии (дисперсии ошибки опыта);  $p < 0,000001$  – уровень значимости F– критерия; Std. Error of estimate: 0,20744 – стандартная ошибка оценки свободного члена уравнения регрессии.

	Beta	Std.Err.	B	Std. Err.	t(49)	p-level
Intercept			6,0161149438	0,170631	35,25	0,000001
SQ	-0,8668	0,0712	-0,0007579656	0,000062	-12,17	0,000001

По результатам 1-го шага процедуры пошаговой регрессии получено уравнение регрессии (используется столбик В) которое показывает, что наиболее существенным фактором, влияющим на удельную энергоёмкость, является фактор взаимодействия зазора S и подачи материала Q, причем при уменьшении S\*Q значение параметра Aud возрастает.

$$\text{Aud} = 6,0161149438 - 0,0007579656\text{SQ}.$$

Так как значение  $R^2 = 0,75145080$  – коэффициента детерминации (квадрата коэффициента множественной корреляции) близко к единице, то построенная модель с большой вероятностью достаточно правильно описывает процесс и показывает 75 % общего разброса удельной энергоёмкости при измельчении зерна.

Так как уровень значимости F– критерия близок к нулю, то дополнительно можно сделать вывод о значимости найденного уравнения регрессии.

В столбце Std. Err. – вычислены стандартные ошибки оценок коэффициентов уравнения регрессии (они значительно меньше самих коэффициентов).

В столбце t(49) приведены отношения значений коэффициентов к стандартным ошибкам оценок коэффициентов – наблюдаемые значения Стьюдента для проверки гипотез о незначимости оценок теоретических коэффициентов уравнения регрессии.

В столбце p–level – уровни значимости отклонения этих гипотез. Так как значения p – level очень малы, то гипотезы о нулевом значении теоретических коэффициентов уравнения регрессии отклоняется, найденные коэффициенты уравнения регрессии следует признать значимыми.

Для решения задач по оптимизации процесса необходимо получить более сложные уравнения регрессии, включающие другие факторы.

Шаг 2. Окно результатов:

Regression Summary for Dependent Variable: A (51 опытов);  
 $R = 0,91827017$ ;  $R^2 = 0,84322011$ ; Adjusted  $R^2 = 0,83668761$ ;  
 $F(2,48) = 129,08$ ;  $p < 0,00001$ ; Std. Error of estimate: 0,16646.

	Beta	Std. Err.	B	Std. Err.	t(48)	p-level
Intercept			2,269370	0,7199	3,151	0,0027
SQ	-0,8668	0,0571	-0,000758	0,0000	-15,16	0,00001
N2	0,3029	0,0571	0,001362	0,0002	5,300	0,00001

По результатам 2-го шага процедуры пошаговой регрессии получено уравнение регрессии, из которого видно, что следующим по значимости влияния на удельную энергоёмкость является фактор числа оборотов N2. При этом значение коэффициента детерминации (квадрата коэффициента множественной корреляции) увеличилось до 0,84322011.

$$Aud = 2,269370 - 0,000758SQ + 0,001362N2.$$

В столбце Beta приведены коэффициенты уравнения регрессии для нормированных (преобразованных) факторов SQ и N2 средние которых равны нулю, а дисперсии – единице.

$$\frac{SQ - \text{среднее}SQ}{\sqrt{\text{дисперсия}SQ}}, \quad \frac{N2 - \text{среднее}N2}{\sqrt{\text{дисперсия}N2}}.$$

Для коэффициентов Beta стандартные ошибки оценок теоретических коэффициентов уравнения регрессии одинаковы и равны 0,05751. Так как нормированные (преобразованные) факторы SQ и N2 безразмерны, то по коэффициентам Beta удобно интерпретировать построенное уравнение регрессии. Из столбика Beta видно, что большим по значимости влияния на удельную энергоёмкость по-прежнему остается фактор SQ.

Находим более сложные модели, использующие другие факторы. На каждом шаге можно проследить динамику роста значения коэффициента детерминации R.

Шаг 3. Окно результатов: Regression Summary for Dependent Variable: A (51 опытов); R= 0,93517952; R<sup>2</sup>=0,87456074; Adjusted R<sup>2</sup>= 0,86655398; F(3,47)=109,23; p < 0,00001; Std. Error of estimate: 0,15047.

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(47)	p-level
Intercept			2,0305098605	0,6545	3,102	0,0032
SQ	-0,9713	0,059991	-0,0008493434	0,00005	-16,19	0,00001
N2	0,3029	0,051662	0,0013624528	0,0002	5,86	0,00001
SN1	0,2055	0,059991	0,0001198963	0,00003	3,4268	0,0012

Получено уравнение регрессии с включенным параметром SN1

$$Aud = 2,0305098605 - 0,0008493434SQ + 0,0013624528N2 + 0,0001198963SN1.$$

Значение  $R^2 = 0,87456074$  незначительно увеличилось на величину 0,031.

Шаг 4. Окно результатов: Regression Summary for Dependent Variable: A (51 опытов);  $R = 0,95079838$ ;  $R^2 = 0,90401756$ ; Adjusted  $R^2 = 0,89567127$ ;  $F(4,46) = 108,31$ ;  $p < 0,00001$ ; Std. Error of estimate: 0,13304.

	Beta	Std.Err.	B	Std. Err.	t(46)	p-level
Intercept			-24,624321014	7,1177	-3,459	0,0011
SQ	-0,971	0,0530	-0,000849343	0,0000	-18,31	0,00001
N2	4,617	1,1493	0,020768886	0,0051	4,017	0,0002
SN1	0,205	0,0530	0,000119896	0,0000	3,875	0,0003
N2N2	-4,318	1,1493	-0,000003528	0,0000	-3,75	0,0004

Получено уравнение регрессии с включенным параметром N2N2

$$Aud = -24,624321014 - 0,000849343SQ + 0,020768886N2 + 0,000119896SN1 - 0,000003528N2N2.$$

Значение  $R^2 = 0,90401756$  незначительно увеличилось.

Полученное уравнение регрессии можно использовать для дальнейшего исследования процесса, но для контроля полезно продолжить процедуру пошаговой регрессии, чтобы выявить остальные факторы, влияющие на изменение удельной энергии измельчения (Aud).

Шаг 5. Окно результатов: Regression Summary for Dependent Variable: A (51 опытов);  $R = 0,95542152$ ;  $R^2 = 0,91283029$ ; Adjusted  $R^2 = 0,90314476$ ;  $F(5,45) = 94,247$ ;  $p < 0,00001$ ; Std. Error of estimate: 0,12819.



	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(45)	p-level
Intercept			-25,124466156	6,8620	-3,661	0,0006
SQ	-1,04671	0,0621	- 0,000915221	0,0000	-16,84	0,00001
N2	4,71435	1,1083	0,021202881	0,0049	4,253	0,0001
SN1	0,35379	0,0862	0,000206334	0,0000	4,101	0,0001
N2N2	-4,41491	1,1083	- 0,000003607	0,0000	-3,983	0,0002
N1N1	-0,15848	0,0743	- 0,000000326	0,0000	-2,13	0,0384

Получено уравнение регрессии с включенным параметром N1N1

$$\text{Aud} = -25,124466156 - 0,000915221\text{SQ} + 0,021202881\text{N2} + 0,000206334\text{SN1} - 0,000003607\text{N2N2} - 0,000000326\text{N1N1}.$$

Размерности параметров N1N1 и N2N2 достаточно велики, поэтому натуральные коэффициенты уравнения регрессии при них оказались малыми. Удобней оценивать влияние факторов, используя столбик Beta. Наиболее значимым является фактор N2 и, конечно, квадратичный эффект N2N2.

Шаг 6. Окно результатов: Regression Summary for Dependent Variable: A (51 опытов);  $R = 0,97036134$ ;  $R^2 = 0,94160114$ ; Adjusted  $R^2 = 0,93363766$ ;  $F(6,44) = 118,24$ ;  $p < 0,00001$ ; Std. Error of estimate: 0,10611.

	Beta	Std.Err.	B	Std. Err.	t(44)	p-level
Intercept			-24,94686967	5,6801	-4,391	0,00007
SQ	-2,11662	0,2354	- 0,00185072	0,0002	-8,988	0,000001
N2	4,68023	0,9174	0,02104940	0,0041	5,101	0,000001
SN1	1,39796	0,2353	0,00081531	0,0001	5,939	0,000001
N2N2	-4,38076	0,9174	- 0,00000358	0,0000	-4,775	0,00002
N1N1	-0,87986	0,1667	- 0,00000181	0,0000	-5,278	0,00000
QQ	0,77693	0,1668	0,00000360	0,0000	4,655	0,00003

Получено уравнение регрессии с включенным параметром QQ

$$\text{Aud} = -24,94686967 - 0,00185072\text{SQ} + 0,02104940\text{N2} + 0,00081531\text{SN1} - 0,00000358\text{N2N2} - 0,00000181\text{N1N1} + 0,00000360\text{QQ}.$$

Значение  $R^2$  достигло величины 0,94160114, что составляет 0,06 % неучтенных факторов.

И последний возможный шаг, учитывая количество опытов.

Шаг 7. Окно результатов: Regression Summary for Dependent Variable: A (51 опытов);  $R = 0,97207888$ ;  $R^2 = 0,94493734$ ; Adjusted  $R^2 = 0,93597365$ ;  $F(7,43) = 105,42$ ;  $p < 0,00001$ ; Std. Error of estimate: 0,10422.

	Beta	Std. Err.	B	Std.Err.	t(43)	p-level
Intercept			-28,043049758	5,8998	-4,753	0,00002
SQ	-1,82780	0,2924	- 0,001598187	0,0002	-6,250	0,000001
N2	5,18431	0,9537	0,023316539	0,0042	5,435	0,000001
SN1	1,68643	0,2922	0,000983557	0,0001	5,771	0,000001
N2N2	-4,88524	0,9538	- 0,000003992	0,0000	-5,121	0,000001
N1N1	-1,08260	0,2063	- 0,000002229	0,0000	-5,246	0,000001
QQ	0,57385	0,2066	0,000002655	0,0000	2,777	0,00809
SS	-0,41741	0,2586	-0,033793343	0,0209	-1,614	0,11382

На последнем шаге получено уравнение регрессии [149]

$$Aud = -28,043049758 - 0,001598187SQ + 0,023316539N2 + 0,000983557SN1 - 0,000003992N2N2 - 0,000002229N1N1 + 0,000002655QQ - 0,033793343SS.$$

На рисунке 4.1 показано изменение параметра Aud в пределах от минимального значения 2,5 при значениях S= 3 и N1=600 до максимального значения 5 при значениях S= 2,5 и N1=1300 (см. столбик прямоугольников внизу справа от графика).

Одновременно получено двумерное уравнение регрессии зависимости удельной энергии измельчения Aud от параметров S и N1 при постоянных значениях других переменных (выражение E-6 означает умножение на 10 в степени -6)

$$Aud = -1,5129 + 0,949S + 0,009N1 - 0,0297 S^2 - 0,0012SN1 - 1,8218E-N1^2.$$

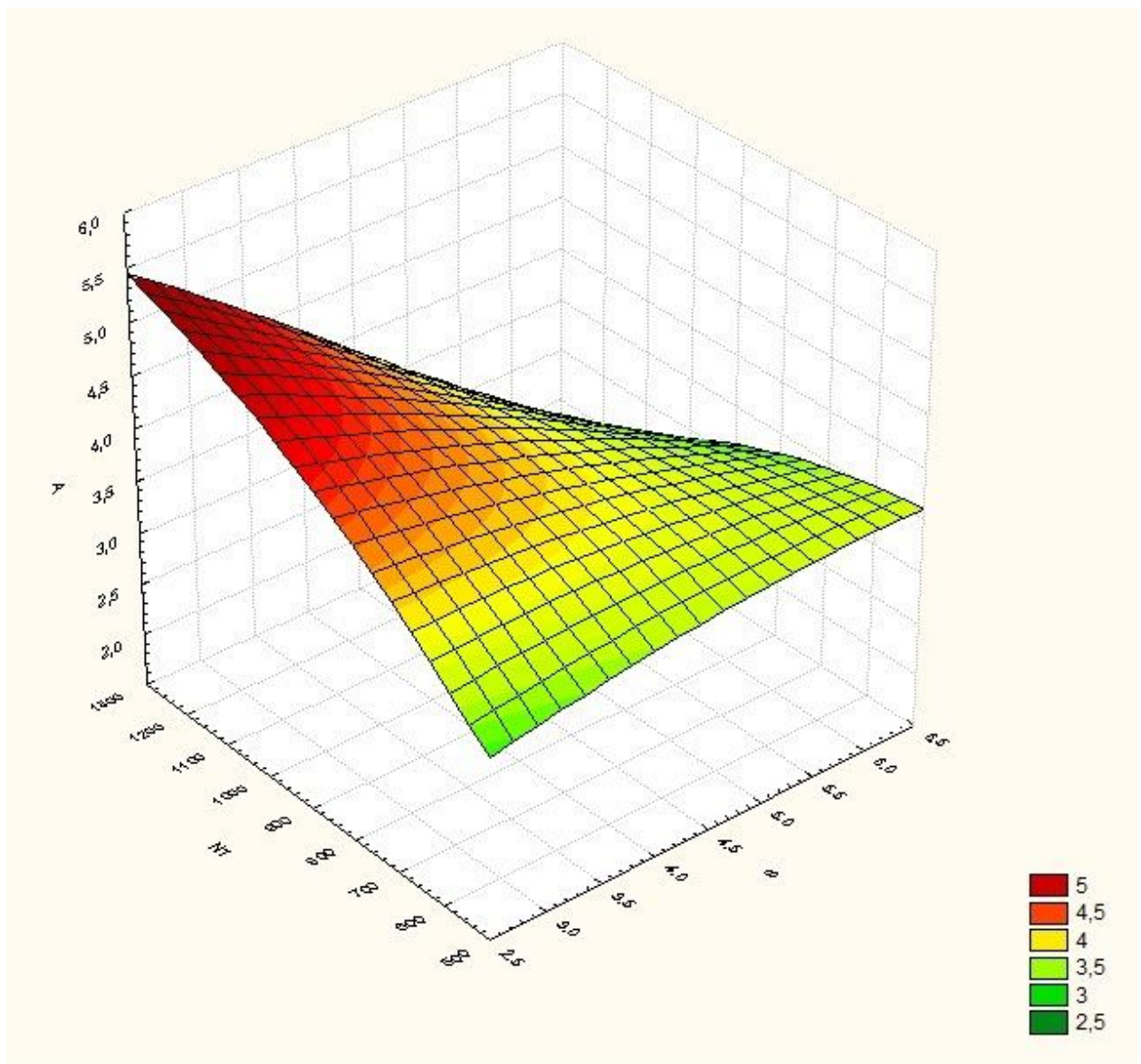


Рисунок 4.1 – Квадратичная зависимость удельной энергии измельчения ( $A_{уд}$ ) от зазора ( $S$ ) и оборотов первого диска ( $N_1$ )

Для подтверждения предварительного вывода используем компьютерный пакет программ «MathCad» и в нем модуль «minimize» нахождения минимума функции нескольких переменных.

Сначала вводим исходную функцию двух переменных в формате «MathCad», затем на независимые переменные накладываем ограничения и для работы программы вводим первоначальные значения независимых переменных.

Оператор «Given» является ключевым в данной программе.

В строке «minimize» получаем ответ.

$$\text{Aud}(S, N1) := -1.51 + 0.95 \cdot S + 0.01 \cdot N1 - 0.03 \cdot S^2 - 0.0012 \cdot N1 - 1.82 \cdot 10^{-6} \cdot N1^2$$

$$400 \leq Q \leq 800$$

$$2707 \leq N2 \leq 2793$$

$$S := 4$$

$$N1 := 800$$

$$N2 := 2750$$

$$Q := 600$$

$$\text{Given } 3 \leq S \leq 6 \quad 600 \leq N1 \leq 1200$$

$$\text{Minimize}(\text{Aud}, S, N1)^T = (3 \quad 600)$$

$$\text{Aud}(3, 600) = 3.264$$

$$\text{Aud}(3, 1200) = 4.177$$

Минимальное значение параметра Aud равно 3,264 при значениях S= 3 и N1=600 до максимального значения 4,177 при значениях S= 3 и N1=1200.

На рисунке 4.2 показано изменение параметра Aud в пределах от минимального значения 1,5 при значениях S= 6,5 и N2=2400 до максимального значения 5 при значениях S= 2,5 и N2=3100.

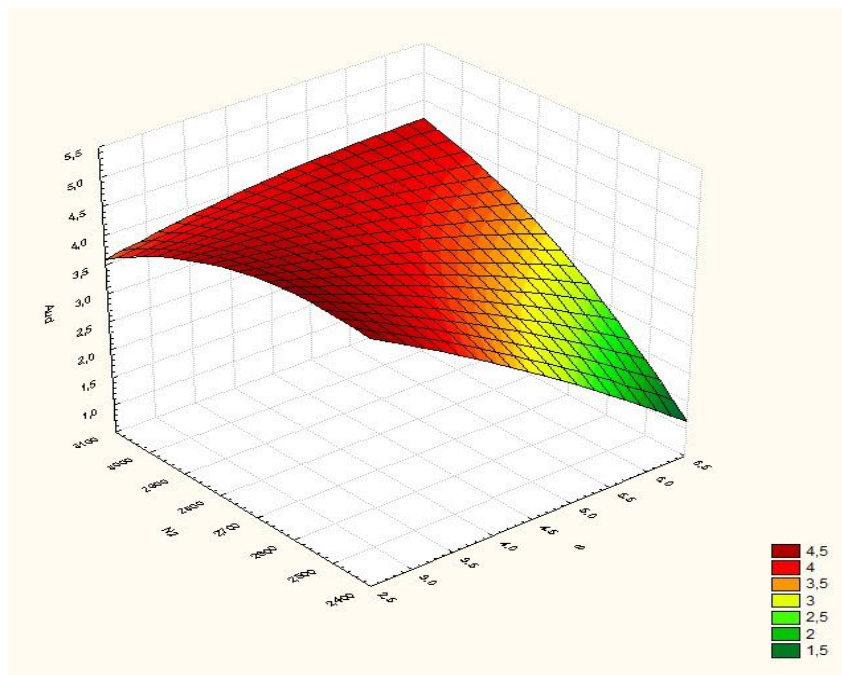


Рисунок 4.2 – Квадратичная зависимость удельной энергии измельчения (Aud) от зазора (S) и оборотов второго диска (N2)

Одновременно получено двумерное уравнение регрессии зависимости удельной энергии измельчения Aud от параметров S и N2 при постоянных значениях других переменных

$$\text{Aud} = -8,7038 - 4,1458 \cdot S + 0,0153 \cdot N2 - 0,0351 \cdot S^2 + 0,0015 \cdot S \cdot N2 - 3,7469 \cdot 10^{-6} \cdot N2^2$$

Минимальное значение параметра  $Aud$  равно 4,509 при значениях  $S = 3$  и  $N2 = 2707$  до максимального значения 5,412 при значениях  $S = 3$  и  $N2 = 2793$ .

На рисунке 4.3 показано изменение параметра  $Aud$  в пределах от минимального значения 3 при значениях  $S = 2,5$  и  $Q = 850$  до максимального значения 7 при значениях  $S = 2,5$  и  $Q = 350$ .

Одновременно получено двумерное уравнение регрессии зависимости удельной энергоёмкости процесса измельчения зерна  $Aud$  от параметров  $S$  и  $Q$  при постоянных значениях других переменных

$$Aud = 17,0119 - 1,9091S - 0,0224Q + 0,001S^2 + 0,0025SQ + 5,7948E-6Q^2$$

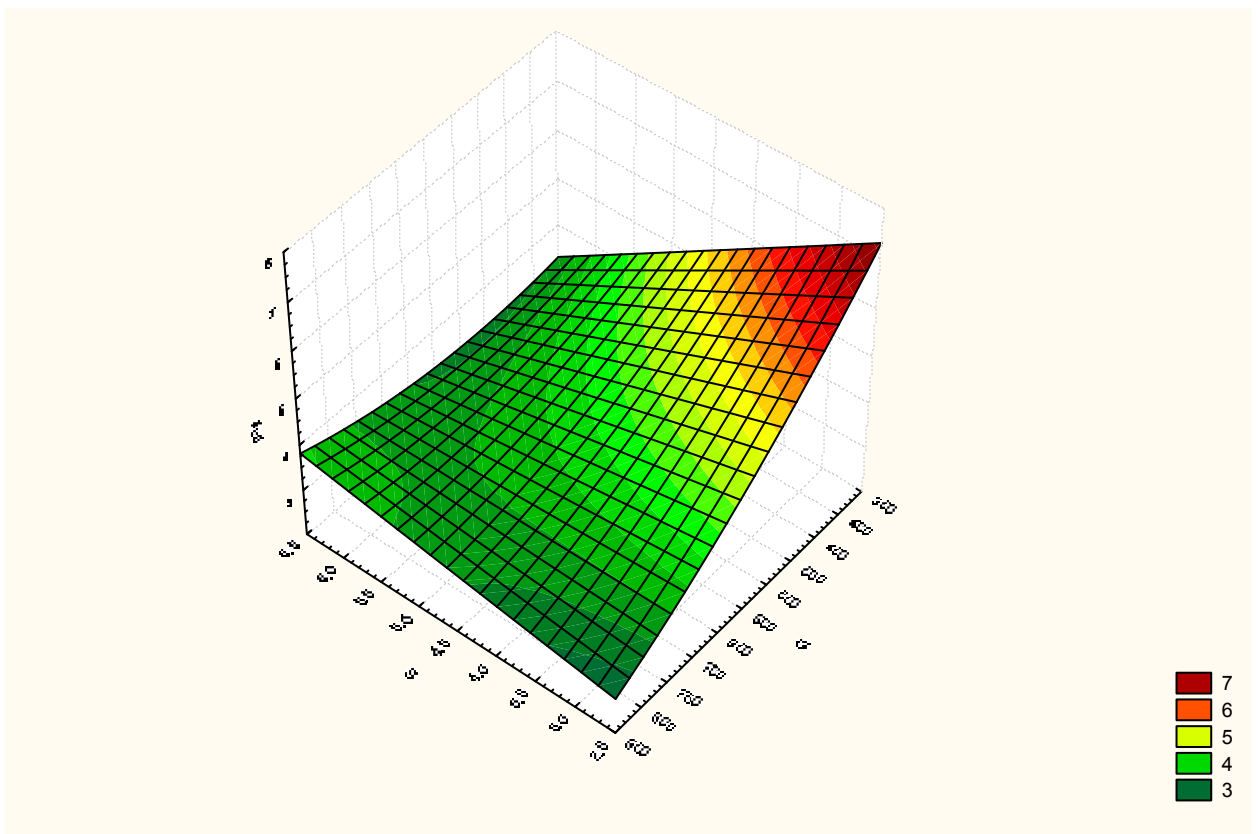


Рисунок 4.3 – Квадратичная зависимость удельной энергии измельчения ( $Aud$ ) от зазора ( $S$ ) и производительности ( $Q$ )

Анализ графика на рисунке 4.3 и полученного уравнения  $Aud$  свидетельствует об уменьшении удельной энергии измельчения при увеличении подачи и зазора между дисками.

Высказанные ранее суждения можно подтвердить результатами двумерных графических зависимостей полученных из результатов анализа уравнений регрессии приведенных в таблицах приложения 10.

Очень сложные по конфигурации графики  $A_{уд}$  от исследуемых параметров, воздействующих на процесс, свидетельствуют о необходимости исследования влияния каждого фактора на  $A_{уд}$  при значении других на нулевом уровне. На рисунках 4.4 и 4.5 показаны результаты расчетов  $A_{уд}$  от частоты вращения первого диска  $N1$  и второго диска  $N2$  полученные при использовании общего уравнения регрессии 7 при постоянном модуле помола ( $M=const$ ) (приложение 2).

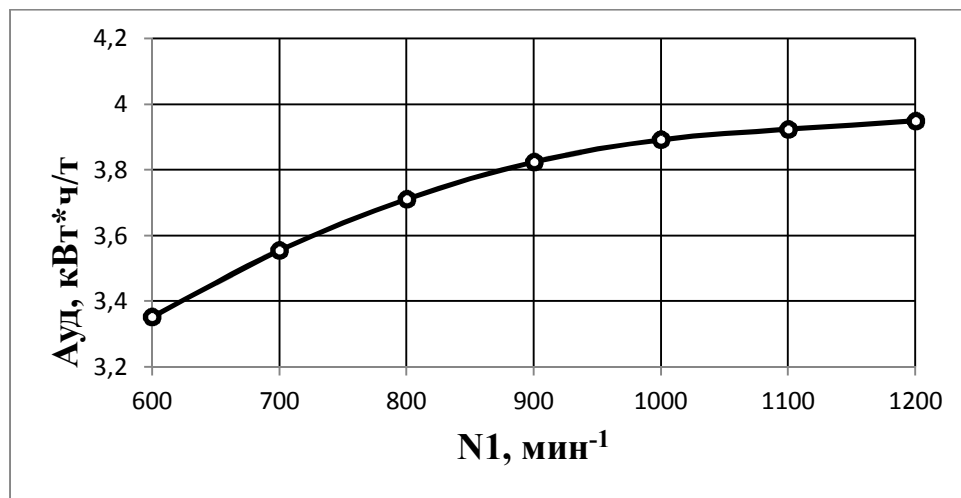


Рисунок 4.4 – Изменение удельной энергии измельчения ( $A_{уд}$ ) от оборотов первого диска ( $N1$ )

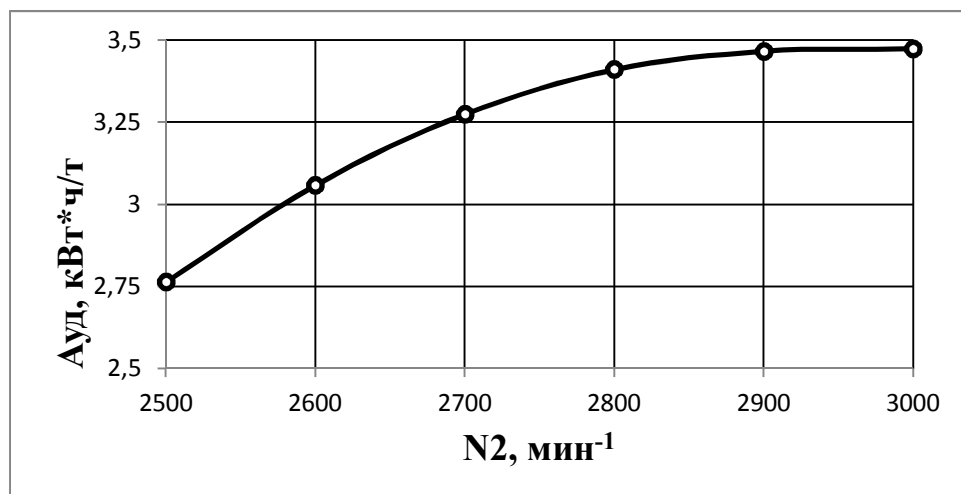


Рисунок 4.5 – Изменение удельной энергии измельчения ( $A_{уд}$ ) от оборотов второго диска ( $N2$ )

Они свидетельствуют о возрастании  $Aud$  с увеличением  $N1$  и  $N2$ . Понимая, что от  $N1$  и  $N2$  зависят другие показатели процесса связанные не только с энергетикой процесса, но и с качеством измельченного зерна, логично принять в дальнейших исследованиях обороты дисков не на минимальных значениях параметров  $N1$  и  $N2$ , гарантирующих минимальные значения  $Aud$ , а на более высоких, способствующих получению рациональных значений степени измельчения зерна и модуля помола. На наш взгляд обороты  $N1$  должны быть приближены к уровню  $N1=900 \text{ мин}^{-1}$ , а  $N2=2750 \text{ мин}^{-1}$ . Такой выбор позволяет не доходить до максимального значения уровня расхода удельной энергии измельчения и иметь возможность варьировать частотой вращения  $N1$  и  $N2$  при выборе рациональных значений производительности, модуля помола и зазора между дисками.

#### 4.2. Изменение удельной энергии измельчения от производительности, зазора между дисками и количества ножей

Проследим изменение  $Aud$  от производительности и изменения зазора, между измельчающими дисками полученные из приложения 10 рисунки 4.6 и 4.7

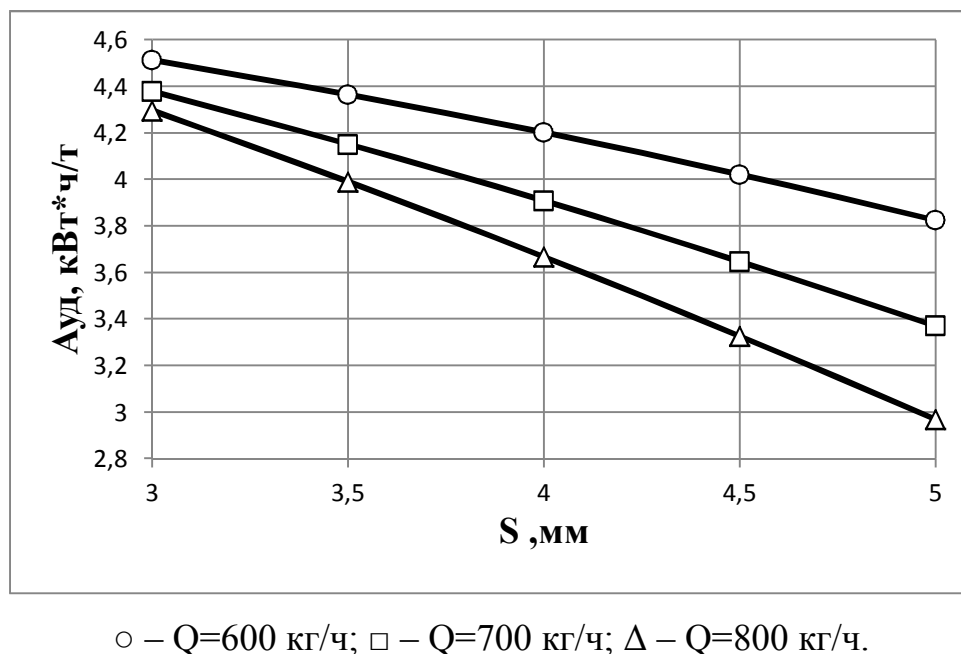
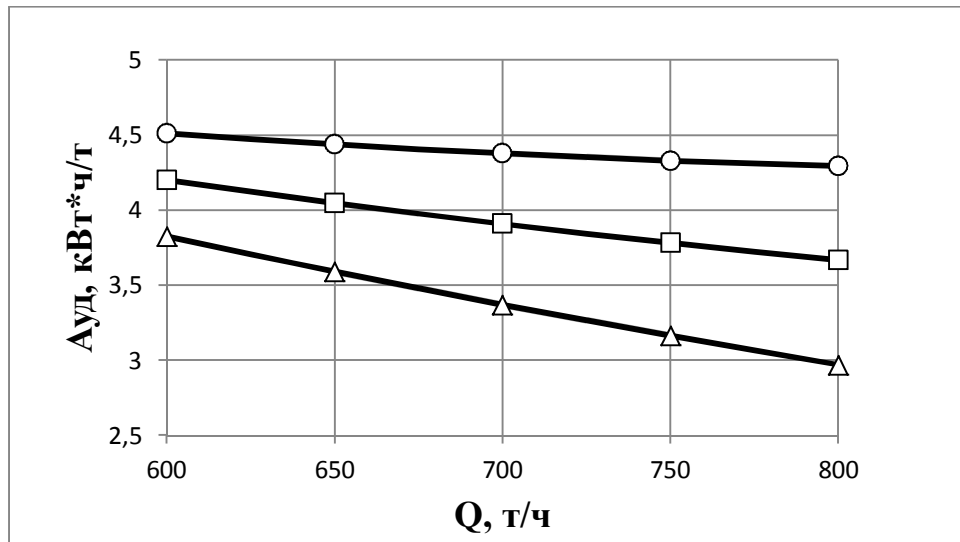


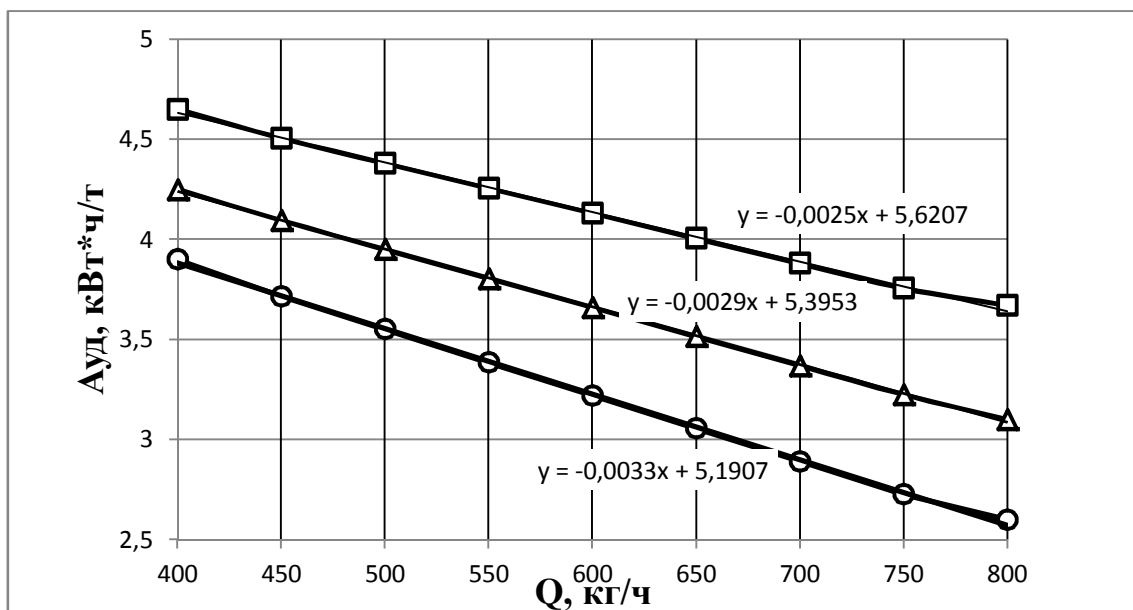
Рисунок 4.6 – Изменение удельной энергии измельчения ( $Aud$ ) от зазора ( $S$ )



○ – S=3 мм; □ – S=4 мм; Δ – S=5 мм.

Рисунок 4.7 – Изменение удельной энергии измельчения ( $A_{уд}$ ) от производительности ( $Q$ )

Полученные результаты свидетельствуют о снижении  $A_{уд}$  при увеличении не только зазора между дисками  $S$ , но и производительности  $Q$ . Раскрытие этого обстоятельства требует определения производительности в рамках отдельных исследований связанных с выбором количества измельчающих элементов. Влияние измельчающих элементов можно проследить по результатам, представленным в приложении 10 и на рисунке 4.8.



○ – Z=6 шт.; Δ – Z=12 шт.; □ – Z=24 шт.

Рисунок 4.8 – Изменение удельной энергии измельчения ( $A_{уд}$ ) от производительности ( $Q$ ) при разном количестве ножей ( $Z$ )



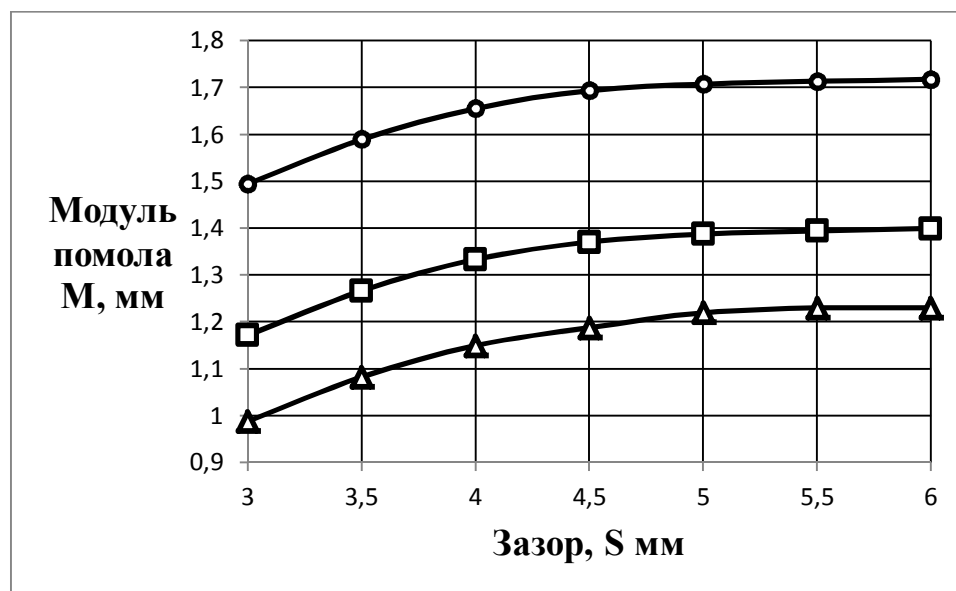
Из графика однозначно видно увеличение производительности УЦИ и расхода удельной энергии измельчения с ростом числа ножей ( $Z$ ).

Для дальнейших исследований принимаем максимальное число ножей равное 24 штук.

Естественное стремление увеличения производительности должно быть увязано не только с энергозатратами, но и с качеством измельченного зерна. В рамках исследуемых уравнений регрессии выявилось однозначное снижение  $A_{ud}$  при увеличении  $S$ , однако требуется решить вопрос в дальнейших исследованиях как скажется увеличение зазора и производительности на модуль помола.

#### 4.3. Зависимость модуля помола от зазора между дисками и величины подачи материала

На рисунке 4.9 и 4.10 представлены результаты этих исследований, они свидетельствуют о возрастании этого показателя с увеличением зазора  $S$  и подачи  $Q$  при увеличении частоты вращения  $N_1$  при постоянстве частоты вращения  $N_2$ .

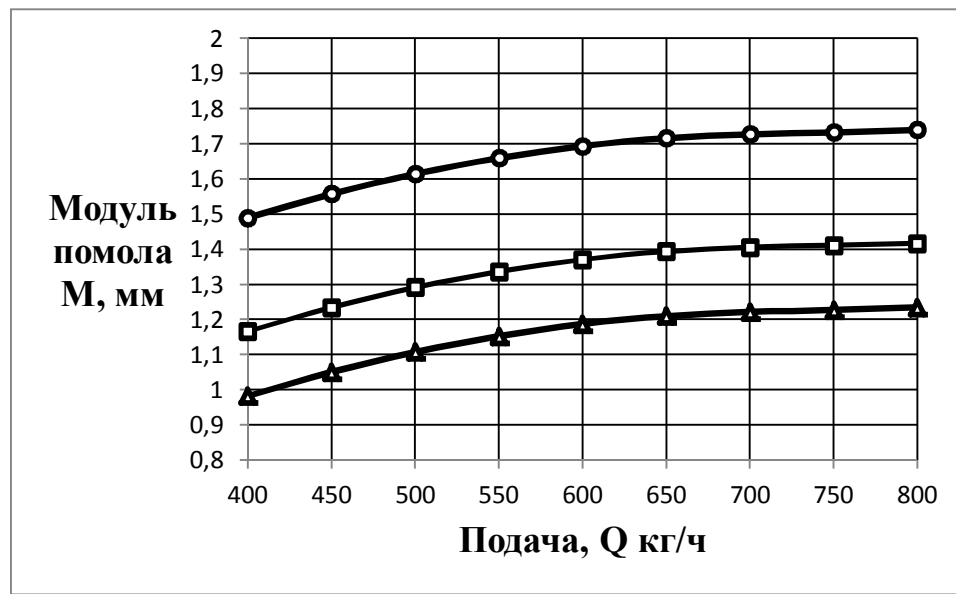


○ –  $N_1=600$  мин<sup>-1</sup>; □ –  $N_1=900$  мин<sup>-1</sup>; Δ –  $N_1=1200$  мин<sup>-1</sup>.

Рисунок 4.9 – Зависимость модуля помола ( $M$ ) от зазора ( $S$ ) между дисками

В диапазоне изменения частоты  $N_1$  от 600 до 1200 мин<sup>-1</sup> модуль помола изменяется в большую сторону и это изменение при зазоре между дисками 3,5 мм.

составило 1,1-1,6 мм. Однако изменение зазора до 3 мм. позволяет получить модуль помола менее 1 мм. Следует понимать, что уменьшение зазора до 2,0-2,5 мм. позволит получить мелкий помол. Также стоит отметить, что необходимый модуль помола можно получить за счет установки рекомендуемого зазора, проставками между измельчающими дисками и отказаться от использования сменных шкивов на привод.



○ – N1=600 мин<sup>-1</sup>; □ – N1=900 мин<sup>-1</sup>; △ – N1=1200 мин<sup>-1</sup>.

Рисунок 4.10 – Зависимость модуля помола (M) от величины подачи материала (Q)

Дальнейшего изучения требует зависимость Aud и Эиз от модуля помола.

#### 4.4. Изменение удельной энергии и энергоемкости процесса измельчения от модуля помола и зазора между дисками

При исследований молотковых дробилок и УЦИ этот вопрос заслуживает отдельного внимания, так как полученные результаты свидетельствуют о снижении Aud и Эиз при увеличении модуля помола. Значительное снижение энергозатрат на измельчение наблюдается за счет совокупного воздействия резания и удара, что имеет место в данной конструкции, а возможность регулирования степени воздействия на процесс измельчения позволяет получать продукт нужного каче-

ства. На рисунках 4.11 и 4.12 представлены результаты, подтверждающие прямое воздействие удара и скола-резания на энергетические показатели процесса измельчения зерна ( $Q=\text{const}$ ).

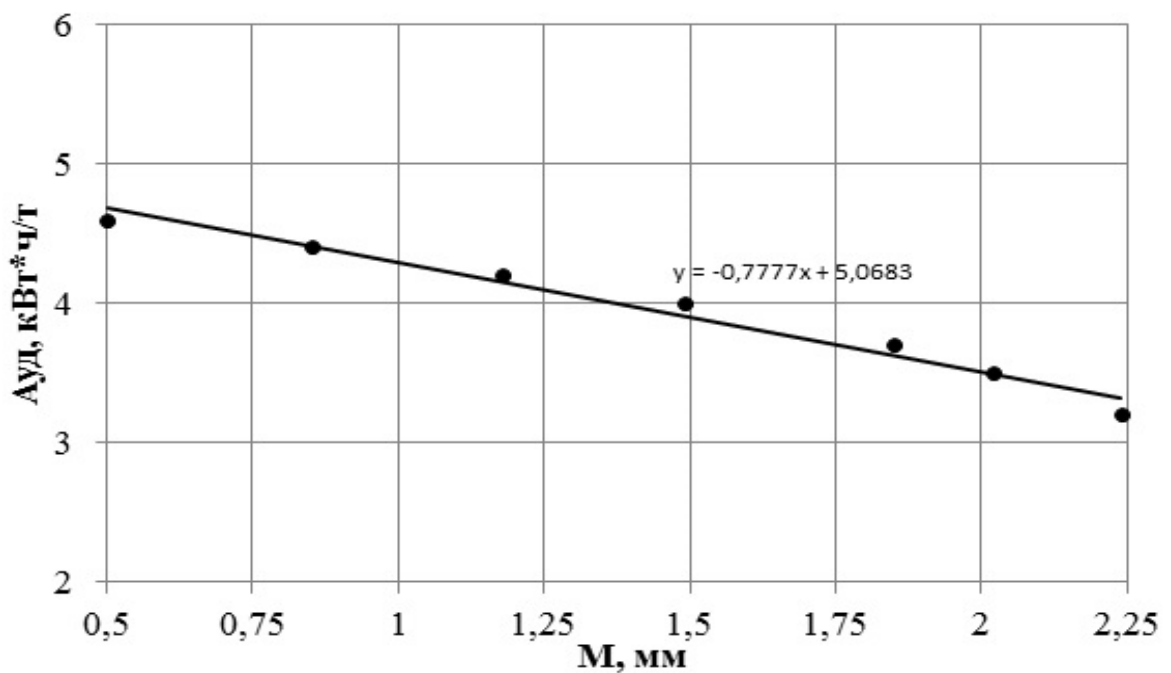


Рисунок 4.11 – Изменение удельной энергии измельчения ( $A_{уд}$ ) от модуля помола ( $M$ )

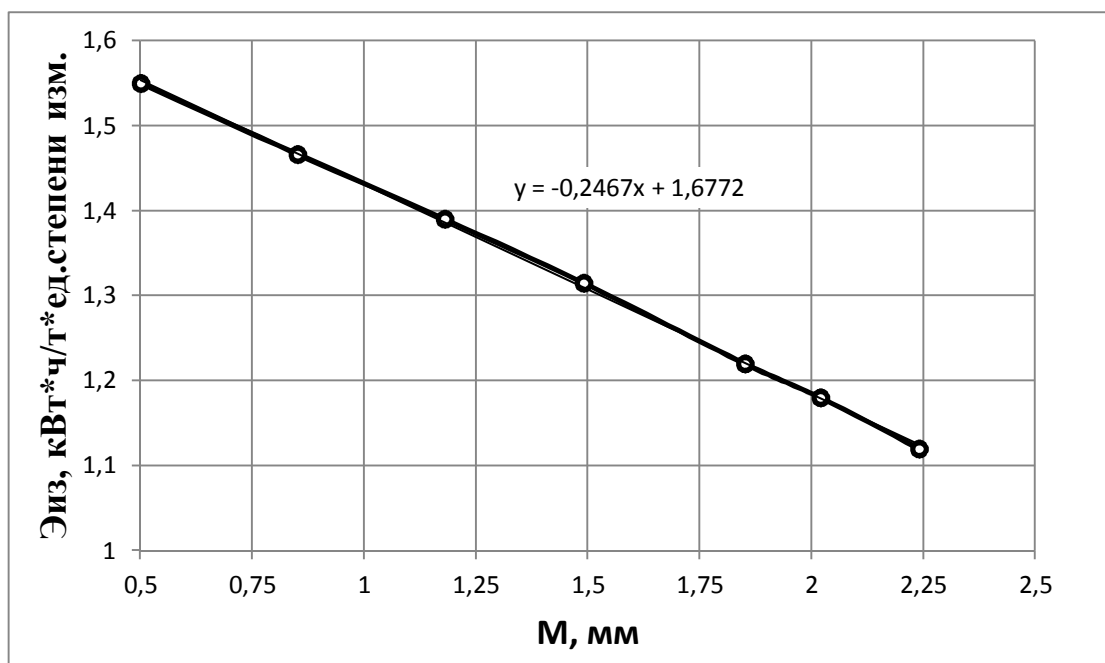


Рисунок 4.12 – Зависимость энергоёмкости процесса измельчения зерна ( $\text{Эиз}$ ) от модуля помола ( $M$ )

Так при таком воздействии рабочих элементов на зерно Aud при минимальном модуле помола не превышает 4,8 кВт·ч/т, а энергоемкость процесса сократилась до 1,55 кВт·ч/т·ед. степени измельчения.

Аналогичная картина наблюдается и при изменении зазора (S). На рисунке 4.13 представлены данные о снижении энергоемкости, так увеличение зазора с 3 мм. до 5 мм. позволяет снизить энергоемкость процесса с 1,55 до 1,17 кВт·ч/т·ед.ст.изм.

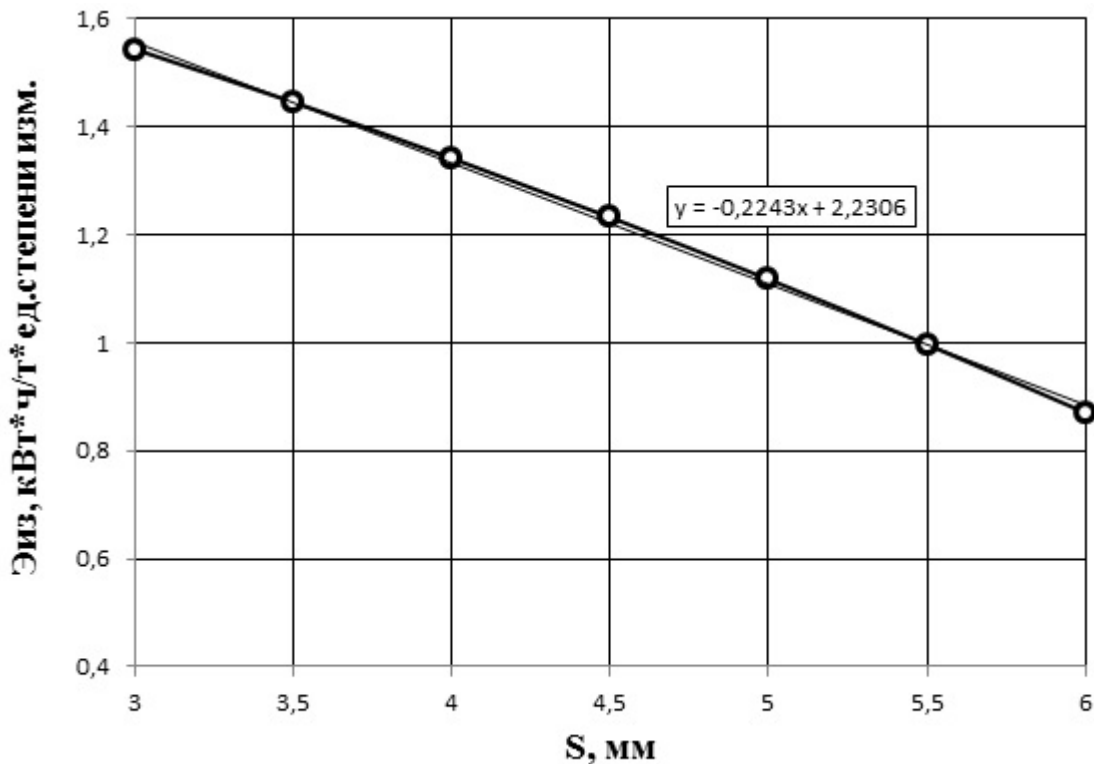


Рисунок 4.13 – Зависимость энергоемкости процесса измельчения зерна (Эиз) от зазора (S)

Уменьшение зазора до размера менее 2 мм. нецелесообразно, так как из-за неточности изготовления измельчителя и износа подшипниковых узлов возрастает опасность встречного удара ножей. Следовательно, минимальный зазор между ножами должен быть 3 мм.. При этом обеспечивается минимальный модуль измельчения до 0,5 мм..

#### 4.5. Сравнительная оценка результатов измельчения ячменя молотковой дробилкой КДУ-2 и ударно-центробежным измельчителем

Опыты по измельчению ячменя влажностью 13% проводили поочередно. Производительность УЦИ задавалась дозатором ТДК и была равной 900 кг/ч. Степень измельчения продукта варьировалась изменением зазора между измельчающими дисками. В молотковой дробилке степень измельчения и производительность изменялись последовательной установкой решет с диаметром отверстий 2,4,6,8 мм. при загрузке электродвигателя до номинальной мощности, контролируемой с помощью амперметра. Крупность получаемого продукта определялась по описанной ранее методике ситовым методом. На рисунке 4.14 представлены сравнительные результаты удельного расхода электроэнергии от модуля измельчения при измельчении ячменя сорта Таловский 9 в УЦИ и кормодробилке КДУ-2.

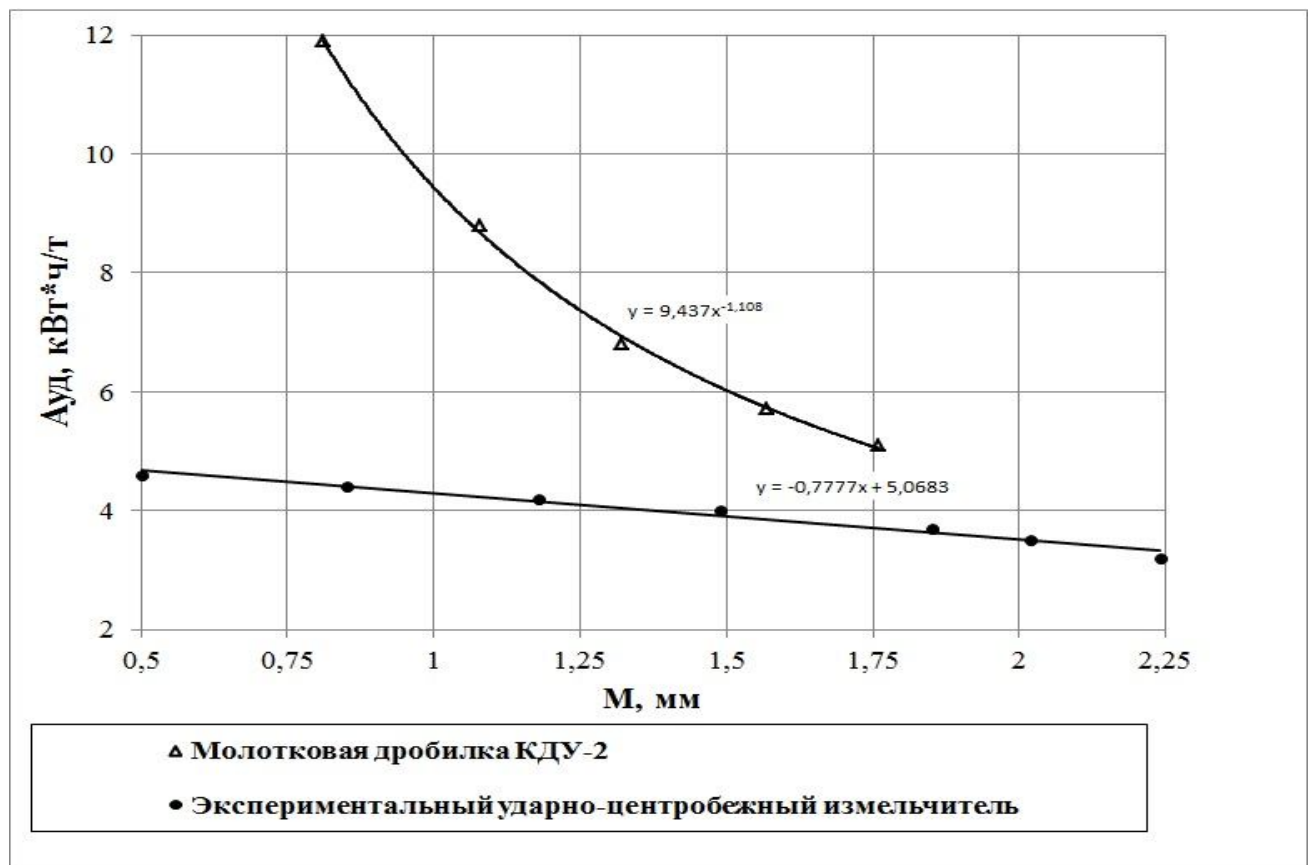


Рисунок 4.14 – Сравнительные результаты удельного расхода электроэнергии от модуля помола

При одинаковом модуле помола 0,81 (мелкий), 1,18 (средний) и 2,2 (крупный) наблюдается тенденция большого расхода удельной энергии при использовании молотковой дробилки, причем при мелком измельчении затрачивается удельной энергии в 2,69 раза больше. При среднем измельчении разница расхода энергии на процесс уменьшается до величины 1,9, но остается существенной для процесса измельчения зерна для КРС.

Анализ гранулометрического состава получаемого продукта показал большую его выровненность.[25, 30, 90, 163]

Следовательно, показатели расхода энергии и выровненность гранулометрического состава свидетельствуют о значительных преимуществах работы ударно-центробежного измельчителя перед молотковой дробилкой.

#### **4.6. Выбор рациональных значений факторов при анализе функций отклика**

При анализе критериев оптимизации использовались уравнения регрессии, полученные математической обработкой результатов многофакторного эксперимента. При анализе результатов активного эксперимента (приложение 1), полученных уравнений регрессии и аппроксимирующих их поверхностей отклика (приложения 2, 4, 6, 8) выяснилось, что все факторы значимо влияют на показатели эффективности процесса.

Таблица 1 – Итоговые уравнения регрессии удельной энергоемкости ( $A_{уд}$ ), энергии процесса измельчения зерна ( $\text{Эиз}$ ), модуля помола ( $M$ ), степени измельчения зерна ( $\lambda$ )

1. $A_{уд} = -28,043049758 - 0,001598187 * SQ + 0,023316539 * N2 + 0,000983557 * SN1 - 0,000003992 * N2N2 - 0,000002229 * N1N1 + 0,000002655 * QQ - 0,033793343 * SS;$ $R^2 = 0,94493734.$
2. $\text{Эиз} = 1,42979 - 0,00001 * N1Q - 0,00272 * SQ - 0,0000015 * N2Q - 0,05879 * SS + 0,00822 * N1 - 1,16927 * S;$ $R^2 = 0,83442697.$
3. $M = 8,19483918 - 0,000000813 * N1N2 + 0,000000773 * N1N1 - 0,00000226 * QQ + 0,0026984127 * SQ - 0,0574611620 * SS - 0,0099929634 * Q - 1,0551538661 * S;$ $R^2 = 0,83685166.$
4. $\lambda = -0,1904097899 + 0,0000006518 * N1N2 + 0,0000017588 * N2Q - 0,00245 * SQ + 0,1506368317 * SS + 0,0000064324 * QQ;$ $R^2 = 0,82070636.$

При выборе оборотов второго диска ( $N_2$ ) останавливаемся на значении  $N_2=2750 \text{ мин}^{-1}$  в диапазоне  $2700-2800 \text{ мин}^{-1}$ . Обороты загружающего диска ( $N_1$ ) принимаем  $N_1=900 \text{ мин}^{-1}$ . Такой выбор сделан в пользу модуля измельчения (М) так как учитывались не только энергетические показатели процесса, но и решалась компромиссная задача методом последовательного анализа влияния этого фактора на все показатели эффективности. Такой выбор позволяет влиять в лучшую сторону на показатели модуля помола и производительности установки.

Аналогично решался вопрос по выбору зазора между измельчающими дисками (S). По результатам исследований величина зазора среднего значения модуля помола для КРС должна находиться в пределах  $S=4-4,5 \text{ мм.}$ , хотя уменьшение зазора скажется на затраты энергии. Оптимальной загрузкой можно считать  $Q=700-800 \text{ кг/ч.}$

В рамках выбранных значений факторов  $N_1$ ,  $N_2$ , S дополнительно выполнены исследования по определению максимальной производительности и степени соответствия ее расчетным параметрам, выполненным в теории.

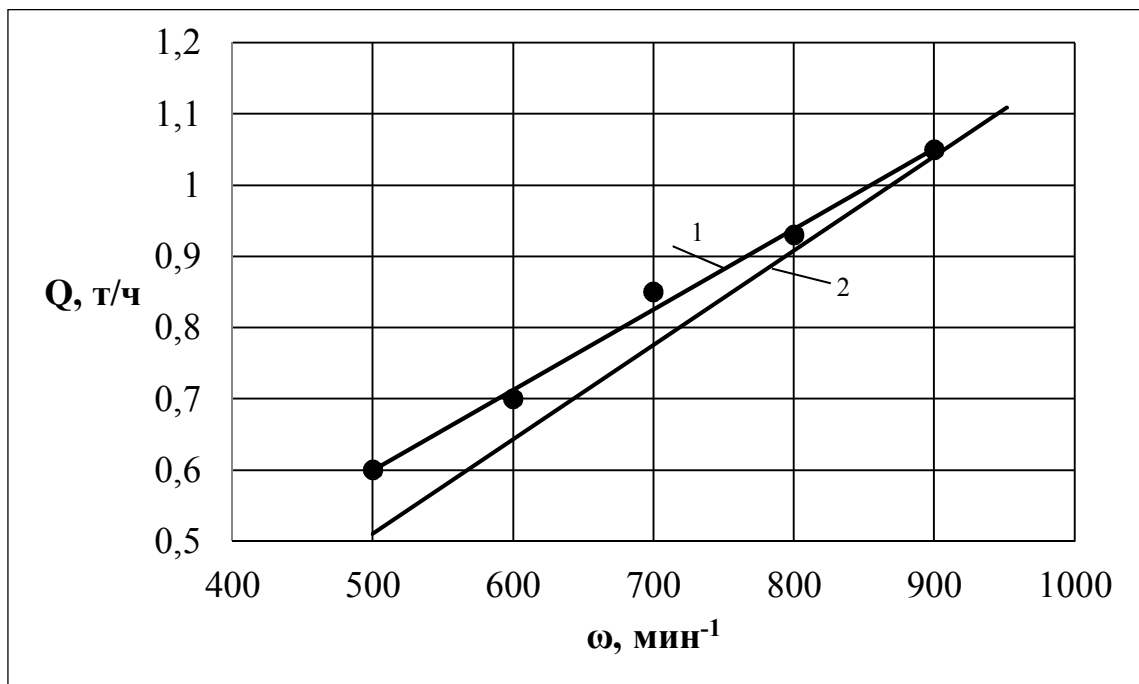
Данные для определения рациональных значений исследуемых факторов приведены таблице 2.

Таблица 2 – Данные для определения рациональных значений исследуемых факторов

Факторы	Оптимальные значения факторов по исследуемым функциям			Решение
	Aud	Эиз	М	
$X_1$	-1,21	-1,21	0	-1
$N_1, \text{ мин}^{-1}$	600-800	600-800	800-900	900
$X_2$	0	0	0	0
$N_2, \text{ мин}^{-1}$	2700-2800	2700-2800	2700-2800	2700-2800
$X_3$	+1,21	+1,21	0	0
$S, \text{ мм}$	5-6	5-6	4-4,5	4-4,5
$X_4$	+1,21	+1,21	+1,21	+1,21
$Q, \text{ кг/ч}$	700-800	700-800	700-800	700-800

#### 4.7. Зависимости производительности (Q) УЦИ от скорости измельчающих дисков

Исследования, выполненные на лабораторной установке (см. рисунок 3.1), представлены на рисунке 4.15. Условия проведения опытов соответствовали программе разработанной в главе 3. Подача зерна в УЦИ изменялась с помощью тарельчатого дозатора в диапазоне от 0,6 т/ч до 1,05 т/ч и контролировалась отбором проб при установившемся режиме работы. Максимальное значение подаваемого зерна соответствовало началу самоограничения загрузки УЦИ. На графике совмещены зависимости теоретической и фактической производительности от оборотов загрузочного диска. Графики построены по результатам представленных в приложении 10.



1 – экспериментальная; 2 – теоретическая

Рисунок 4.15 – Влияние частоты вращения загрузочного диска на производительность УЦИ

Анализируя полученные результаты можно сделать заключение о существенном влиянии окружной скорости на производительность, которая изменяться в пределах от 600 кг/ч до 1050 кг/ч. Расхождение в полученных результатах экспериментальным и теоретическим путем не превышает более 8 % при малой



производительности, а при достижении максимальной производительности отклонение составило менее 1 %. При этом характер изменения соответствует прямолинейной зависимости и наличие отклонения теоретических и практических результатов можно объяснить изменчивость коэффициента заполнения зерном междискового пространства. При частоте вращения загрузочного диска до  $900 \text{ мин}^{-1}$  фактическое значение производительности больше теоретической.

#### 4.8. Выводы

Исходя из результатов экспериментальных исследований сформулированы основные выводы:

1. С уменьшением модуля помола удельный расход энергии и энергоёмкость процесса измельчения зерна возрастают, однако при совместном влиянии удара и скола-резания на энергетические показатели процесса измельчения зерна УЦИ, при минимальном модуле помола не превышают  $4,8 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ , а энергоёмкость процесса сокращается до  $1,55 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}\cdot\text{ед.степени}$  измельчения. Увеличение рабочего зазора между измельчающими дисками до  $5 \text{ мм}$ . приводит к снижению энергоёмкости до  $1,17 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}\cdot\text{ед.степени}$  измельчения.

2. По результатам экспериментальных исследований выбраны оптимальные значения исследуемых параметров, при которых обеспечиваются тонкий, средний и крупный помол. Так при тонком помоле ( $M=0,6-0,8 \text{ мм.}$ ) необходимо устанавливать зазор в пределах  $S=3 \text{ мм.}$ , а при среднем помоле ( $M=1,0-1,8 \text{ мм.}$ ) величина зазора  $S=4 \text{ мм.}$ , при крупном помоле ( $M=1,8-2,2 \text{ мм.}$ ) величина зазора  $S=5 \text{ мм.}$ . Частота вращения загрузочного диска  $N_1=900 \text{ мин}^{-1}$  и отбойного  $N_2=2750 \text{ мин}^{-1}$  позволяют вести процесс измельчения с содержанием пылевидных частиц не более 5 %, исключив из полученной массы целые зерна.

3. Экспериментальный УЦИ обеспечивает высокие показатели качества измельчения, низкую энергоёмкость процесса, достигаемые за счет обоснованного выбора рациональных, режимных и конструктивных параметров, а именно: количество ножей – 24 шт.; максимальный диаметр дисков – 320 мм.; диаметр загрузочного

зочной камеры – 100 мм.; частота вращения загрузочного диска – 900 мин<sup>-1</sup>; частота вращения отбойного диска – 2750 мин<sup>-1</sup>; зазор между ножами дисков при тонком помоле – 3 мм., среднем помоле – 4мм., крупном помоле – 5 мм..

4. На совмещенных графиках теоретической и фактической производительности (см. рисунок 4.15) видно, что фактическая производительность существенно зависит от частоты вращения загрузочного диска и при частоте 900 мин<sup>-1</sup> достигает максимального значения 1050 кг/ч. Расхождение в полученных результатах экспериментальным и теоретическим путем не превышает 8 %, а при достижении максимальной производительности разница в результатах составила менее 1 процента.

5. Готовый продукт имеет более выравненную структуру гранулометрического состава в отличие от серийной дробилки, а также соответствует ГОСТу на комбикорма. При одинаковом модуле помола 0,81 (мелкий), 1,18 (средний) и 2,2 (крупный) наблюдается тенденция большого расхода удельной энергии при использовании молотковой дробилки, причем при мелком измельчении затрачивается удельной энергии в 2,69 раза больше. При среднем измельчении разница расхода энергии на процесс уменьшается до величины 1,9, но остается существенной.

## **5 ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРОВЕРКА И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДАРНО - ЦЕНТРОБЕЖНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ**

### **5.1. Результаты производственной проверки опытного образца УЦИ**

Проверка работоспособности УЦИ в условиях производства проводилась в дробильном цехе КФХ ИП «Смоляков Г.А.» Хохольского района Воронежской области.



Рисунок 5.1 – Опытный образец УЦИ в цехе по производству концентрированных кормов КФХ ИП «Смоляков Г.А.»

Измельчению подвергали ячмень сорта Таловский 9: засоренность примесями 3 %, влажность зерна 13–14 %. В качестве образца для сравнения использовалась серийная дробилка КДУ-2, применяемая в хозяйстве для дробления зерна. На дробилке КДУ–2 для сравнительных испытаний были установлены новые молотки и решето. В таблице 5.1 представлены технико-экономические показатели сравниваемых измельчителей.

Таблица 5.1 – Техничко-экономические показатели производственной проверки УЦИ

Показатели	КДУ-2	УЦИ
Производительность при измельчении зерна, т/ч	3	1,2
Удельная энергоемкость, кВт*ч/т	12,5	5
Средневзвешенный размер готового продукта, мм	1,2	1,0

По итогам предварительных испытаний УЦИ и КДУ-2 видно, что его показатели экспериментального измельчителя по сравнению с молотковой дробилкой намного лучше, в связи с тем, что удельные энергозатраты в два раза ниже при сравнительно одинаковых размерах готового продукта.

## 5.2. Расчет экономической эффективности УЦИ

В таблице 5.2 приведены исходные данные для расчета. Годовой объем продукции взят как среднее количество фуражного зерна, измельчаемое для кормления скота в КФХ ИП «Смоляков Г.А.» за последние три года (2011,2012,2013).

Таблица 5.2 – Исходные данные для оценки проекта усовершенствования УЦИ

Показатели	Варианты	
	Базовый	Проект
	КДУ-2	УЦИ
Срок эксплуатации, лет	8	8
Количество машин	1	
Годовая загрузка, ч	500	500
Выработка (по сырью), т/ч	3,0	3,6
Объем переработки за год, т	1500,0	1500,0
Установленная мощность, кВт	30	18
Коэффициент использования электрической мощности двигателей, %	88	95
Количество обслуживающего персонала, чел	1	1
Стоимость установки, тыс. руб.	250,0	70,9
Норма амортизационных отчислений, %	12,5	12,5
Норма отчислений на ТО, ремонт, замену шин, %	6	6
Уровень оплаты труда с начислениями, руб./ч	122,1	122,1
Цена электроэнергии, руб./кВт-ч	5,81	5,81

При анализе экономической эффективности работы УЦИ использовались методики, изложенные в трудах С.А. Горланова и Е.В. Злобина [29, 31, 46]. Базовым вариантом является молотковая дробилка КДУ-2.

При использовании УЦИ и КДУ-2 объем перерабатываемого сырья и годовая загрузка машин в часах остается неизменной. В тоже время установленная мощность УЦИ сокращается в 1,7 раза, его часовая выработка по сырью возрастает на 20 %, а коэффициент использования мощности электродвигателя повышается на 7 %. Стоимость трех установок УЦИ по сравнению с КДУ-2 снижается на 37,3 тыс. руб.

Таблица 5.3 – Расчет стоимости электроэнергии

Показатели	Базовый вариант	По проекту
Годовая загрузка, ч	500	500
Выработка (по сырью), т/ч	3	3,6
Объем переработанного сырья за год, т	1500	1500
Количество машин для выполнения годового объема работ	1,0	3,0
Установленная мощность, кВт	30,0	18,0
Коэффициент использования электрической мощности двигателей, %	88	95
Количество часов машин в работе	500	1250
Потребность в электроэнергии за год, кВт-ч	13200	7125
Цена электроэнергии, руб./кВт-ч	5,81	5,81
Стоимость электроэнергии за год, тыс. руб.	76,6	41,4
Удельная энергоемкость, кВт-ч/т	8,8	4,8
Экономия (+), перерасход (-) электроэнергии, кВт-ч		
в расчете на 1 т		4,05
всего за год		6075,0
Стоимость электроэнергии, руб./т	51,09	27,58
Экономия (+), перерасход (-) затрат на электроэнергию		
в расчете на 1 т, руб.		23,51
всего за год, тыс. руб.		35,27

Для замены устаревшего КДУ-2 по проекту требуется для переработки базового объема сырья три проектируемых УЦИ. Количество машино-часов в работе возрастает с 500 до 1250 ч., т.е. в 2,5 раза. Это связано с тем, что часовая выработка (по сырью) по базовому варианту составляет 3 т/ч, а по проекту 3,6 т/ч, т.е.

часовая выработка по трем проектируемым УЦИ возрастает на 20 % по сравнению с КДУ-2. Потребность в электроэнергии за год сокращается в 1,85 раза за счет снижения мощности электродвигателей по проекту на 12 кВт, что приводит к экономии электроэнергии в расчете на 1 т. на 23,51 руб. или за год на 35270 руб.

Таблица 5.4 – Экономия живого труда и фонда оплаты труда

Показатели	Варианты	
	Базовый	Проект
	КДУ-2	УЦИ
Количество работников, чел	1	1
Время работ по переработке, ч	500	417
Затраты труда, чел.-ч	500	416,6667
Уровень оплаты труда, руб./ч	122,06	122,06
Фонд оплаты труда, тыс. руб.	61,03	50,86
Объем переработки сырья за год, т	1500	1500
Экономия (перерасход) рабочего времени		
Трудоемкость переработки, чел.-ч/т	0,333	0,278
Экономия (+), перерасход (-) рабочего времени, чел.-ч		
в расчете на 1 т		0,056
за год		83,33333
Экономия (перерасход) фонда оплаты труда		
Фонд оплаты труда в расчете на 1 т, руб.	40,69	33,91
Экономия (+), перерасход (-) фонда оплаты труда		
руб. в расчете на 1 т		6,78
тыс. руб. за год		10,17

Внедрение трех проектируемых УЦИ приводит к экономии рабочего времени на 0,056 чел.-часов на тонну или на 83,33 чел.-часов в год. Экономия рабочего времени на 1 тонну зерна дает экономию фонда оплаты труда 6,78 руб., и в целом за год экономия оплаты труда составит 10170 руб.

Снижение размера стоимости вложений в три проектируемых УЦИ до 212,7 тыс. руб. по сравнению со стоимостью базовой машины КДУ-2 на 17,5 %, рост часовой переработки сырья на 20 % и снижение перерасхода потребляемой электроэнергии приводит при неизменной численности обслуживающего персонала к экономии эксплуатационных расходов при измельчении зерна в размере 52340 руб. и получению годового экономического эффекта 53 тыс. руб.

Таблица 5.5 – Эксплуатационные издержки в расчете на 3 УЦИ

Показатели	Базовый вариант	По проекту
Объем переработки за год, т	1500,0	1500,0
Эксплуатационные издержки, тыс. руб.	183,9	131,6
Оплата труда с начислениями	61,03	50,86
Амортизация	31,25	26,59
Затраты на ремонт	15,00	12,76
Электроэнергия	76,63	41,36
Эксплуатационные издержки в расчете на 1 т, руб.	122,61	87,72
Экономия (+), перерасход (-) фонда эксплуатационных затрат в расчете на 1 т, руб.		34,89
всего за год, тыс. руб.		52,34
Инвестиционный эффект за год, руб.		
Инвестиционный эффект за год, тыс. руб.		52
Экономия (+), перерасход (-) фонда эксплуатационных затрат за год		52
Инвестиционный эффект:		
Инвестиционный эффект в расчете на 1 т, руб.		34,89

Если все затраты на изготовление трех УЦИ считать капитальными вложениями и они будут окупаться только за счет экономии эксплуатационных издержек, то мы получим следующие показатели экономической эффективности проектной разработки

Таблица 5.6 – Экономическая эффективность усовершенствования рабочего процесса, при применении проектируемого ударно-центробежного измельчителя

Показатели	КДУ-2	УЦИ
Ставка банковского процента	16	16
Срок эксплуатации, лет	8	8
Капитальные вложения, тыс. руб.	250,0	212,7
Установленная мощность, кВт	30	18
Количество обслуживающего персонала, чел.	1	1
Выработка (по сырью), т/ч	3,0	3,6
Удельная энергоемкость кВт-ч.	12,5	4,8
Трудоемкость переработки, чел-ч/т	0,333	0,278
Эксплуатационные издержки, руб./т	122,61	87,72
Годовой экономический эффект, тыс. руб.	×	78,93
Экономический эффект за срок реализации проекта, тыс. руб.	×	1617,0
Цена спроса на комплекс ресурсов для реализации проекта, тыс. руб.	×	493,0
Коэффициент эффективности капитальных вложений	×	0,29
Срок окупаемости, год	×	3,8

В условиях рынка важное значение для увеличения производства животноводческой продукции имеет не только применение для кормоприготовления более производительных, но и более дешевых систем машин и технологий. Предлагаемая нами разработка показала достаточно высокий экономический эффект замены дробилки КДУ-2 на более дешевый и менее энергозатратный ударно-центробежный измельчитель. Его внедрение приведет к росту производительности труда, сокращению эксплуатационных издержек по всем статьям затрат. Годовой экономический эффект составит 78,93 тыс. руб., коэффициент эффективности вложений будет значительно выше действующей ставки процента банка, а проект окупится за 3,8 года.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Эффективность скармливания можно повысить за счет оптимизации размеров частиц измельченного зерна для каждого вида животных в соответствии с зоотехническими требованиями. Переизмельчение корма негативно сказывается на здоровье и продуктивность животных, увеличивает энергоемкость процесса, ухудшает условия труда человека. Процесс измельчения зерна сложное и недостаточно изученное явление. Сложившиеся полученные знания не позволяют однозначно ответить на многие принципиальные вопросы, например о числе и скорости удара, необходимых для полного разрушения зерновки.

2. Ударные центробежные измельчители фуражного зерна являются новым типом измельчающего оборудования. Они обладают низким удельным расходом энергии затрачиваемой на процесс и меньшей металлоемкостью, чем молотковые дробилки. Их внедрение в производство сдерживается отсутствием методик инженерного расчета и проектирования данных конструкций.

3. Разработана математическая модель процесса измельчения зерна, позволяющая определить скорость движения зерна по вертикальной поверхности загрузочной камеры измельчителя и основанию зуба ножа, в большей степени зависящая от угловой частоты вращения дисков и от величины перемещения зерновки. В дальнейших расчетах скорость при сходе с зуба ножа была принята равной  $V_{\text{кон}} = 4,2$  м/с. Скорости удара зерновки с рабочими элементами последующих ступеней измельчителя на выходе из измельчителя равняется 65,7 м/с.

4. Установлена аналитическая зависимость производительности измельчителя, учитывающая его конструктивные и режимные параметры: диаметр приемной камеры ( $D_0$ , м), частоту вращения дисков ( $\omega$ ,  $\text{с}^{-1}$ ), длину ножа ( $L$ , м), их количество ( $Z$ , шт) и толщину ( $\delta$ , м), а также степень заполнения междискового пространства ( $K_3$ ) и свойства измельчаемого материала.

5. По результатам экспериментальных исследований определены рациональные значения исследуемых параметров, при которых обеспечиваются тонкий, средний и крупный помол. Так при тонком помоле ( $M=0,6-0,8$  мм.) необходимо устанавливать зазор в пределах  $S=3$  мм., а при среднем помоле ( $M=1,0-1,8$  мм.) величина зазора  $S=4$  мм., при крупном помоле ( $M=1,8-2,2$  мм.) величина зазора  $S=5$  мм.. Частота вращения загрузочного диска  $N_1=900$  мин<sup>-1</sup> и отбойного  $N_2=2750$  мин<sup>-1</sup> позволяют вести процесс измельчения с содержанием пылевидных частиц не более 5 %, исключив из полученной массы целые зерна.

6. Предложена новая конструкция УЦИ (патент РФ № 2438782) обеспечивает высокие показатели качества измельчения, низкую энергоемкость процесса, достигаемые за счет обоснованного выбора рациональных, режимных и конструктивных параметров, а именно: количество ножей – 24 шт.; максимальный диаметр дисков – 320 мм.; диаметр загрузочной камеры – 100 мм.; частота вращения загрузочного диска – 900 мин<sup>-1</sup>; частота вращения отбойного диска – 2750 мин<sup>-1</sup>; зазор между ножами дисков при тонком помоле – 3 мм., среднем помоле – 4 мм., крупном помоле – 5 мм..

7. На совмещенных графиках теоретической и фактической производительности (см. рисунок 4.15) видно, что фактическая производительность существенно зависит от частоты вращения загрузочного диска и при частоте 900 мин<sup>-1</sup> достигает максимального значения 1050 кг/ч. Расхождение в полученных результатах экспериментальным и теоретическим путем не превышает 8 %, а при достижении максимальной производительности разница в результатах составила менее 1 процента.

8. Готовый продукт имеет более выравненную структуру гранулометрического состава в отличие от серийной дробилки, а также соответствует ГОСТу на комбикорма. При одинаковом модуле помола 0,81 (мелкий), 1,18 (средний) и 2,2 (крупный) наблюдается тенденция большого расхода удельной энергии при использовании молотковой дробилки, причем при мелком измельчении затрачивается удельной энергии в 2,69 раза больше. При среднем измельчении разница рас-

хода энергии на процесс уменьшается до величины 1,9, но остается существенной.

9. Экономический эффект от внедрения УЦИ составляет 78,93 тысяч рублей, размер экономического эффекта за срок службы составляет 1617 тысяч рублей, коэффициент эффективности вложений будет значительно выше действующей ставки процента банка, а проект окупится за 3,8 года.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. А.С. 1727895 СССР, МКИ В02С13/22. Дезинтегратор [Текст] / С.В. Золотарев, В.А. Садовая. №4820419/33; заяв. 13.02.90; опубл. 23.04.92. Бюл. № 15. – 3 с.
2. А.С. 1782655 СССР, МКИ В02С13/22. Ударно-центробежная мельница [Текст] / В.И. Ивашов, Ш.К. Тлегенов, Б.Н. Дуйденко, И.К. Искаков. №4905217/33; заяв. 25.01.91; опубл. 23.10.92; Бюл. № 47. – 3 с.
3. А.С. 2129466 РФ, МКИ В02С13/14, А 01 F 29/02. Центробежная дробилка [Текст] / В.М. Абросимов, В.А. Денисов, С.Г. Карташев, и др. № 96111041/13; заяв. 06.06.96; опубл. 27.04.99; Бюл. № 27. – 3 с.
4. Авдеев, Н.Е. Снижение энергоемкости инерционного сепарирования [Текст] / Н.Е. Авдеев, Ю.А. Саликов, Ю.В.Чернухин. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1999. – № 1. С.25-27.
5. Алёшкин, В.Р. Механизация животноводства [Текст] / В.Р.Алёшкин, П.М. Рощин. – М.: Колос, 1993. – 319 с.
6. Амелянц, А. Улучшаем конструкцию дробилки [Текст] / А. Амелянц, Г. Матыцын // Комбикормовая промышленность. – № 2, 1997. – С.17-19.
7. Антипов, С.Т. Машины и аппараты пищевых производств [Текст] / С.Т. Антипов, И.Т. Кретов, А.Н. Остриков и др.. – М.: Высш. школа, 2001. – 703 с.
8. Афанасьев, В.А. Эффективность двухстадийного измельчения сырья при производстве комбикормов для животноводческих комплексов [Текст] / В.А. Афанасьев, А.Н. Плаксина// Тр. ВНИИКП ВНПО «Комбикорм» – 1987. – Вып. 30. –61 с.
9. Бабич, А.А. Животноводство: проблема кормов [Текст] / А.А. Бабич. – М.: Знание, 1991. – 64 с.
10. Балданов, М.Б. Исследование процесса измельчения фуражного зерна в молотковых дробилках [Текст] / М.Б. Балданов // Сб. тр. Бурятской с.-х. академии . – Вып.38. – 1995. – С.11-14.

11. Баловнев, В.И. Универсальные мельницы [Текст] / В.И. Баловнев, К.Г. Пучин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1993. – № 7.– С. 17-19.
12. Белянчиков, Н.Н. Механизация животноводства и кормоприготовления [Текст] / Н.Н. Белянчиков, А.И. Смирнов. – М.: Агропромиздат, 1990. – 432 с.
13. Баранов, Ю. Н Совершенствование рабочего процесса молотковой дробилки с перефирийным подводом зерна: автореф. дис.... канд. тех. наук [Текст] /Ю.Н. Баранов; Ворон. СХИ–Воронеж. – 1976. – 24 с.
14. Берязев, А. Центробежно-роторный измельчитель [Текст] / А. Берязев // Сельский механизатор. – 2002. – № 11. – С.21.
15. Боровиков, В.П. STATISTIC A ® Статистический анализ и обработка данных в среде Windows® [Текст] / В.П. Боровиков, И.П.Боровиков. – М.: «Филинь», 1998. – 608 с.
16. Богородский, А.В. Разработка конструкций и методов расчета интенсивных измельчителей дезинтеграторного типа: дис.... канд. техн. наук [Текст] / А.В. Богородский. – Иваново, 1982. – 171 с.
17. Борщев, В.Я. Оборудование для измельчения материалов дробилки и мельницы[сайт] [Электронный ресурс] / В.Я. Борщев. – электронная книга. –Режим доступа: <http://www.hosting.tambov.ru>. / (дата обращения: 05.09.2013).
18. Босой, Е.С. Теория, конструкция и расчет сельскохозяйственных машин [Текст] / Е.С. Босой, О.В. Верняев, И.И. Смирнови др.. – М.: «Машиностроение», 1978. – 568 с.
19. Будыка, А.М. Повышать отдачу отрасли [Текст] / А.М. Будыка // Вестник Агропрома. – 1988. – № 5. – С.2-3.
20. Бунин, С.М. Справочник инженера-механика сельскохозяйственного производства [Текст] / С.М. Бунин, В.Ф. Федоренко, Л.С. Орсик: Учебное пособие.–М.: ФГНУ. Росинформагротех. – ч.2. – 2003. – 368 с.

21. Бутковский, В.А. Технология мукомольного, крупяного и комбикормового производства (с основами экологии) [Текст] / В.А. Бутковский, С.В. Мельников. – М.: Агропромиздат, 1989. – 464 с.

22. Василенко, П.М. Теория движения частиц по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин [Текст] /П.М. Василенко. – Киев: Изд-во УСХА, 1960. – 175 с.

23. Ветцель, В. Новый этап развития технологий комбикормового производства [Текст] // В. Ветцель/ Комбикормовая промышленность. – 1997. – № 5. – С.17.

24. Гафнер, Л.А Основы технологии приема, хранения и переработки зерна [Текст] /Л.А. Гафнер, В.А. Бутковский, А.М. Родюкова. – М.: Колос, 1979.– 400 с.

25. Глебов, Л.А Гранулометрический состав измельченного зерна [Текст] /Л.А. Глебов, Г.В. Газмаев // Комбикормовая промышленность. –1997. – № 8. – С.15.

26. Глебов, Л.А. Повышение эффективности измельчителя компонентов комбикормов [Текст] / Л.А. Глебов. – М.: ЦНИИТЭИ. 1984. – 28 с.

27. Глебов, Л.А. Бесситовый измельчитель ударного действия [Текст] / Л.А. Глебов // Комбикормовая промышленность. – 1996. – № 4. – С.19-20.

28. Глебов, Л.А. Молотковые дробилки фирмы «Ван-Арсен» [Текст] / Л.А. Глебов // Комбикормовая промышленность. – 1997. – № 7. – С.28-30.

29. Горланов, С.А. Экономическая оценка проектных разработок в АПК [Текст] / С.А. Горланов, Е.В. Злобин // Воронеж. гос. аграр. ун-т – Воронеж, 2002. – 66 с.

30. ГОСТ 13496.8-72. Комбикорма. Методы определения крупности размола и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений [Текст]; введ. 1972-27-06. – М.: Издательство стандартов, 1972. – 2 с.

31. ГОСТ 53056-2008. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки [Текст]; введ. 2009-01-01. – М.: Стандартинформ, 2009. – 20 с.

32. Горячкин, В.П. Собрание сочинений в трёх томах [Текст] / В.П. Горячкин. – М.: Колос, 1968. – Т. I. – 508 с.

33. Грушевой, С.Б. К вопросу о дроблении зерна комбикормовой промышленности на молотковой дробилке: Дис. канд. техн. наук. [Текст] / С.Б. Грушевой. – М., 1958. – 210 с.

34. Демидов, П.Г. Технология комбикормового производства [Текст] / П.Г. Демидов. – М.: Колос, 1968. – 224 с.

35. Демский, А.Б. Совершенствование комбикормового оборудования промышленных предприятий [Текст] / А.Б. Демский, В.Ф. Веденьев. – М.: Колос, 1982. – 127 с.

36. Демский, А.Б. Справочник по оборудованию зерноперерабатывающих предприятий [Текст] / А.Б. Демский, М.А. Борискин, Е.В. Тамаров и др. – М.: Колос, 1970. – 432 с.

37. Денисов, В.А. Исследование процесса измельчения фуражного зерна в высокоскоростной центробежной дробилке и обоснование режимов ее работы: Дис. канд. техн. наук [Текст] // В.А. Денисов. – М., 1979. – 215 с.

38. Денисов, В.А. Расчет потребной мощности дробилки центробежно-ударного действия [Текст] / В.А. Денисов // Научные труды. Том 66. Механизация и автоматизация приготовления кормов. – М.: ВИЭСХ, 1986. С. 106 – 122.

39. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных [Текст] / Н. Джонсон, Ф. Лион. М. – Мир, 1980. – 610 с.

40. Дорофеев, Н.С. Новые технологические схемы измельчения зерна [Текст] / Н.С. Дорофеев // Совершенствование эксплуатации машин. Механизация земледелия и животноводства. Материалы в помощь сельскохозяйственному производству. – Воронеж, 1981. – Вып. 6, ч. 2 – С. 38-41.

41. Дорофеев, Н.С. Обслуживание и наладка оборудования цехов. Справочник. [Текст] / Н.С. Дорофеев. – Воронеж: Центрально-черноземное книжное издательство, 1989. – 190 с.

42. Дорофеев, Н.С. Совершенствование технологических схем и параметров измельчителей фуражного зерна [Текст] / Н.С. Дорофеев // Механизация подготовки кормов в животноводстве: Сб. науч. тр. – Воронеж, 1984. – С.25-33.

43. Дробилка центробежная ДЦ [сайт] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.uralomega.ru/products/centrifugal\\_crushers\\_dc](http://www.uralomega.ru/products/centrifugal_crushers_dc) / (дата обращения: 10.03.2014).

44. Центробежно-ударная дробилка [сайт] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://maxi-exkavator.ru/articles/crusher/~id=1311> / (дата обращения: 23.09.2014).

45. Дробилки зерновые [сайт] [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.remz.ru/drobilki.htm>. (дата обращения: 27.03.2014).

46. Дрогайцева, В.И. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники [Текст] / В.И. Дрогайцева, П.Ф. Тулапина, Т.Я. Бутенко. – Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства, – 1998. – С.345.

47. Елисеев, В.А. Влияние диаметра рабочей камеры на эффективность работы молотковой дробилки [Текст] / В.А. Елисеев, А.П. Барбицкий, А.А. Сундеев // Мукомольная и элеваторная промышленность. – 1966. – № 8. – С.23-25.

48. Елисеев, В.А. Влияние диаметра ротора и окружной скорости молотков на мощность электропривода молотковой дробилки [Текст] / В.А. Елисеев, А.П. Барбицкий // Зап. Воронежского СХИ. – Воронеж, 1970. –Т.44. – С.55-63.

49. Елисеев, В.А. Влияние зазора между молотками и ситом на работу молотковой дробилки [Текст] / В.А. Елисеев, А.М. Тарасенко, М.Н. Изюмцева // Зап. Воронежского СХИ. – Воронеж, 1972. – С.144-150.

50. Елисеев, В.А. Влияние окружной скорости молотков на эффективность работы молотковой дробилки [Текст] / В.А. Елисеев, А.П. Барбицкий, А.А. Сундеев // Зап. Воронежского СХИ. – Воронеж, 1968. – Т. 35. – С.290-297.

51. Елисеев, В.А. Исследование процесса разрушения зерна ударом: автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст] / В.А. Елисеев. – Воронеж, 1962. – 25 с.

52. Елисеев, В.А. К вопросу определения энергии, затрачиваемой в процессе размола зерна [Текст] / В.А. Елисеев // Зап. Воронежского СХИ. – Воронеж, 1959. – Т. 21, вып.2. – С.271-274.



53. Елисеев, В.А. О работе сита молотковой дробилки [Текст] / В.А. Елисеев, А.М. Тарасенко // Механизация сельскохозяйственных процессов. Сельскохозяйственные машины и оборудование животноводческих ферм: Зап. Воронежского СХИ. – Воронеж, 1970. – Т.44. – С.64-71.

54. Елисеев, В.А. О роли сита в процессе измельчения кормов молотковой дробилкой [Текст] / В.А. Елисеев, А.М. Тарасенко // Механизация животноводческих ферм: Тр. Саратовского ин-та мех. с.-х. им. Калинина. – Саратов, 1970. – Вып. 46. – С.9-13.

55. Завалишин, Ф.С. Методы исследований по механизации сельскохозяйственного производства [Текст] / Ф.С. Завалишин, М.Г. Мацнев. – М.: Колос, 1982. – 230 с.

56. Завражнов, А.И. Механизация приготовления и хранения кормов [Текст] / А.И. Завражнов, Д.И. Николаев. – М.: Агропромиздат, 1990. – 336 с.

57. Зверев С.В. Повышение ресурса работы комплекта молотков дробилок [Текст] / С.В. Зверев, Г.А. Глебов, Б.А. Ляшенко – М., 1988. – 150 с.

58. Зенков, Р.С. Механика насыпных грузов [Текст] / Р.С. Зенков. – М.: Машиностроение, 1964. - 251 с.

59. Золоторёв, С.В. Методика расчета основных конструктивных параметров ударно-центробежной дробилки [Текст] // Технология и механизация производственных процессов в животноводстве: Сб. науч. тр. – Челябинск, 1983.– С.47-53.

60. Золотарев, С.В. Обоснование основных параметров рабочих органов ударно-центробежной дробилки фуражного зерна: автореф. дис.... канд. техн. наук [Текст] / С.В. Золотарев; – Челябинск, 1985. – 17 с.

61. Золотарев, С.В. Ударно-центробежные измельчители фуражного зерна (основы теории и расчета) [Текст] / С.В. Золотарев; –Барнаул: ГИПП «Алтай», 2001. – 200 с.

62. Золотарев, С.В. Механико-технологические основы создания ударно центробежных измельчителей фуражного зерна: автореф. дис....д-ра техн. наук [Текст] / С.В. Золотарев – Барнаул, 2002. – 50 с.

63. Зуев, В.М. Повышение эффективности кормопроизводства [Текст] / В.М. Зуев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1998. – № 3.– С.7-8.
64. Иванов, А.В. Исследование процесса измельчения единичных зерен [Текст] / А.В. Иванов, Ж.В. Арбузова, Е.Ю. Сеница // Хранение и переработка сельхозсырья. 1999. – № 5.–С. 13 - 14.
65. Ишков, В.И. Исследование влияния основных параметров безрешетной молотковой дробилки на производительность зерна: автореф. дис.... канд. техн. наук [Текст] / В.И Ишков; Ворон. СХИ – Воронеж, 1982. – 20 с.
66. Карташов, Л.П. Механизация и электрификация животноводства [Текст] / Л.П. Карташов, А.А. Аверкиев, А.И. Чугунов и др. – М.: Агропромиздат, 1987. – 480 с.
67. Карташов, Л.П. Механизация, электрификация и автоматизация животноводства [Текст] / Л.П. Карташов, А.И. Чугунов, А.А. Аверкиев – М.: Колос, 1997. – 368 с.
68. Карташов, Б.В. Обоснование основных параметров измельчителя фуражного зерна роторно-ножевого типа: автореф. дис.... канд. техн. наук [Текст] / Б.В. Карташов – Челябинск. СХИ, 1996. –23 с.
69. Кирпичников, Ф.С. Анализ конструктивно-технологических схем ударно-центробежных дробилок для измельчения зерна и пути их совершенствования [Текст] / Ф.С. Кирпичников, В.Е. Храпач // Совершенствование технологических средств механизации кормоприготовления на фермах и комплексах: Сб. науч. тр. / ЛСХИ. – Л., 1987. – С.50-54.
70. Князев, А.Ф. Механизация и автоматизация животноводства [Текст] / А.Ф.Князев. – М.: КолосС. – 2004. – 374 с.
71. Коба, В.Г. Механизация производства продукции животноводства [Текст] / В.Г.Коба, Н.В.Брагинец, Д.Н.Мурусидзе, – М.: КолосС. – 2000. – 528 с.
72. Колобов, М.Ю. Установка для приготовления комбикормов [Текст] / М.Ю. Колобов // Техника в сельском хозяйстве. – 2008. – № 3. – С.14-15.
73. Корнев, А.С. Совершенствование конструкции дискового измельчителя фуражного зерна [Текст] / А.С. Корнев, Р.А. Дружинин // Инновационные

технологии и технические средства для АПК: Материалы всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященные 100-летию Воронежского государственного аграрного университета им. императора Петра I. – Ч.IV. – Воронеж: ФГБОУ ВПО ВГАУ, 2012. – С. 140-143.

74. Коротков, В.Г. Распределение окружных скоростей в измельчителе ударно-стирающего действия [Текст] / В.Г. Коротков, В.Ю. Полищук // Техника в сельском хозяйстве. – 2001. – № 1. – С.34-35.

75. Косилов, А.Н. Обоснование конструктивно-технологической схемы центробежного измельчителя фуражного зерна [Текст] // Совершенствование технологии и средств механизации в животноводстве: Сб. науч. тр./ЧИМЭСХ. – 1989. – С.47-50.

76. Коузов, П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов [Текст] / П.А. Коузов. – Л.: Химия, 1974. – 280 с.

77. Краснокутский, Ю.В. Практикум по машинам и оборудованию для животноводческих комплексов [Текст] / Ю.В. Краснокутский, С.В. Рыжов – М.: Агропромиздат, 1987. – 351 с.

78. Кретов, И.Т. Технологическое оборудование предприятий пищекоцентрационной промышленности [Текст] / И.Т. Кретов, А.Н. Остриков, В.М. Кравченко // Учебник. – Воронеж: Изд. Воронежского университета, 1996. – 448 с.

79. Кукта, Г.М. Машины и оборудование для приготовления кормов [Текст] / Г.М. Кукта. – М.: Агропромиздат, 1987. – 303 с.

80. Кукта, Г.М. Технология переработки и приготовления кормов [Текст] / Г.М. Кукта // Кормопроизводство. – 1992. – № 3. – С.6-7.

81. Кулаковский, И.В. Машины и оборудование для приготовления кормов [Текст] / И.В. Кулаковский, Ф.С. Кирпичников, Е.И. Резник. – М.: Россельхозиздат, 1987. – Ч.1. Справочник. – 285 с.

82. Куприц, Я.Н. Технология переработки зерна [Текст] / Я.Н. Куприц, Г.А. Егоров, М.Е. Гинзбург и др. // 2-е изд., перераб и доп. – М.: Колос, 1977. – 375 с.

83. Левин, Я.С. Исследование факторов, влияющих на дробление зерна [Текст] / Я.С. Левин // Тр. ВИСХОМ. – М., 1961. – Вып. 31. – 41 с.

84. Леонтьев, П.И. Определение качества режущих элементов дезинтегратора / П.И. Леонтьев, Б.В. Карташов, Н.С. Сергеев //Корма и кормление сельскохозяйственных животных. – 1985. – № 3. – С-15.

85. Леонтьев, П.И. Определение частоты вращения роторов измельчителя зерна [Текст] / П.И. Леонтьев, Б.В. Карташов, Н.С. Сергеев //Тр.ЧИЭМСХ. – М.,1989. – 41с.

86. Леонтьев, Л.И., Технологическое оборудование кормоцехов [Текст] / Л.И. Леонтьев, В.И. Земсков, В.М. Потемкин. – М.: Колос, 1984. – 165 с.

87. Листопад И.А. Планирование эксперимента в исследованиях по механизации сельскохозяйственного производства [Текст] / И.А. Листопад. – М.: Агропромиздат, 1989. – 88 с.

88. Лоскутов, А. Дробильное оборудование [Текст] /А. Лоскутов// Комбикорма. – 2000. – № 4 – С.18.

89. Ляпин, В.В. Измельчитель фуражного зерна ударно-центробежного типа [Текст] / В.В. Ляпин и др. // Природопользование: ресурсы, техническое обеспечение: Межвузовский сборник науч. тр. – Вып. 3. – Воронеж, 2007. – С. 258-260.

90. Ляпин, В.В. Оценка качества продукта при измельчении в ударно-центробежном измельчителе [Текст] / В.В. Ляпин // Достижения молодых ученых – будущее в развитии АПК: Материалы межрегиональной научно-практической конференции молодых ученых. – Ч. II. – Воронеж: ФГОУ ВПО ВГАУ, 2007. – С. 107-110.

91. Макаров, А.П. Энергетика процесса дробления фуражного зерна [Текст] / А.П. Макаров // Науч. тр. ВИЭСХ. – 1959. – Т. 4. – С. 11-12.

92. Малаховцев, В.П. Исследование упругих свойств и сил при ударном нагружении зерна пшеницы: автореф. дис...канд. техн. наук [Текст] /В.П. Малаховцев; Одесс., 1964. – 23с.

93. Мамедов, Ф. Измельчитель на базе торцевого асинхронного двигателя [Текст] / Ф. Мамедов, В. Литвин, А. Сафонов // Сельский механизатор. – 2003. – № 5. – С.27.

94. Марченко, О.С. Основные проблемы механизации кормопроизводства и пути их решения [Текст] / О.С. Марченко // Техника в сельском хозяйстве. – 1990. – № 3. – С. 3-5.
95. Мацупа, В. Увеличение производительности молотковых дробилок [Текст] / В. Мацупа // Техника в сельском хозяйстве. – 1971. – № 1 – С. 82-83.
96. Мельников, С.В. Аэродинамический режим молотковой дробилки КДМ [Текст] / С.В. Мельников, Ф.С. Кирпичников // Зап. ЛСХИ. – Ленинград – Пушкин, 1974. – Т.230. – С.3-9.
97. Мельников, С.В. Измельчение зерна на молотковых дробилках [Текст] / С.В. Мельников // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1957. – № 1. – С.24-29.
98. Мельников, С.В. К вопросу об измельчении ударом [Текст] / С.В. Мельников // Науч.-техн. бюл. по электрификации сел. хоз-ва. – М., 1968. – Вып. 1(4). – С. 24-32.
99. Мельников, С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм [Текст] / С.В. Мельников. – Л.: Колос, 1978. – 560 с.
100. Мельников, С.В. Механизация технологических процессов [Текст] / С.В. Мельников, П.В. Андреев. – М.: Агропромиздат, 1990. – 287с.
101. Мельников, С.В. Оптимизация работы молотковой дробилки, работающей в замкнутой воздушной системе [Текст] / С.В. Мельников, Ф.С. Кирпичников // Механизация производственных процессов в животноводстве: Зап. Ленинградского с.-х. ин-та. – Ленинград – Пушкин, 1974. – Т. 260. – С. 36-39.
102. Мельников, С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов [Текст] / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рощин. - Л.: Колос, 1972. – 200 с.
103. Мельников, С.В. Рабочий процесс молотковой дробилки замкнутого типа [Текст] / С.В. Мельников // Земледельческая механика. – М., 1964. – Т VIII. – С. 110-117.

104. Мельников, С.В. Ускоренный метод определения крупности частиц травяной муки [Текст] / С.В. Мельников // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1967. – № 1. – С.26-28.

105. Механизация приготовления кормов: Справочник [Текст] / В.И. Сыроватка, А.В. Демин, А.Х. Джанилов и др; Под общ. ред. В.И. Сыроватка. – М.: Агропромиздат, 1985. – 386с.

106. Морозов, Н.М. Приоритетные направления создания техники для механизации животноводства [Текст] /Н.М. Морозов// Техника в сельском хозяйстве. – 1988. – № 2. – С.5-7.

107. Мяндр, А.Э. Кормоприготовительные машины и агрегаты [Текст] / А.Э. Мяндр. – М.: Машиностроение, 1970. – 255 с.

108. Мякишев, Н.Ф. Изменение степени измельчения зерна на дезинтеграторе [Текст] / Н.Ф. Мякишев, К.М. Иыги // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1987. –№ 9. – С.41 -43.

109. Ненецкий, Э.К. К обоснованию оптимальных параметров электропривода универсальных кормодробилок [Текст] /Э.К. Ненецкий// Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1967. – № 3. – С.36-42.

110. Определение скорости перемещения зерна по вертикальной поверхности диска и зубу ножа в ударно-центробежном измельчителе [Текст] / В.В. Труфанов, Р.А. Дружинин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика // Материалы международной заочной научно-практической конференции. – Воронеж, 2014.– С. 490-494.

111. Опрышко, В.М. Влияние конструктивных и технологических параметров на процесс измельчения зерна в ударно-центробежном измельчителе [Текст] / В.М. Опрышко, А.А. Сундеев // Природопользование: ресурсы, техническое обеспечение: Межвузовский сб. науч. тр./,Воронеж, 2000. – с.167-169.

112. Опрышко, В.М. Обоснование основных параметров ударно-центробежного измельчителя фуражного зерна: дис. канд. ... техн. наук [Текст] / В.М. Опрышко. – Воронеж, 2001. – 119 с.

113. Опрышко, В.М. Сравнительная оценка качества продукта при измельчении в молотковой дробилке и ударно-центробежном измельчителе [Текст] / В.М. Опрышко, В.В. Труфанов, В.В. Ляпин / Природопользование: ресурсы, техническое обеспечение: Межвузовский сборник науч. тр. – Вып. 3. – Воронеж, 2007. – С. 267-269.

114. Опрышко, В.М. Ударно-центробежный измельчитель фуражного зерна [Текст] //Совершенствование технологий и технических средств производства продукции растениеводства и животноводства: Сб. науч. тр./ВГАУ.Воронеж,1998. – с.182-185.

115. Опрышко, В.М. Экспериментально-теоретическое обоснование параметров измельчителя фуражного зерна [Текст] //Теория постановка и результаты агроинженерного эксперимента: Сб. науч. тр./ВГАУ. Воронеж,1999. – с.177-181.

116. Пат. №2127035 РФ, МКИ А01F29/00, В02С 7/02 Измельчитель кормов [Текст] / Сундеев А.А., Опрышко В.М. и др.– №97110334/13, заяв.17.06.97. опубл. 10.03.97. Бюл. № 7. – 5 с.

117. Пат. №2137547 РФ, МКИ А01F29/00, В02С 7/02 Центробежный измельчитель [Текст] / Сундеев А.А., Опрышко В.М.– №98117719/13; заяв. 21.09.98. опубл. 20.09.99. Бюл. № 13. – 4 с.

118. Пат. 2350388 РФ, МПК В02С7/02. Ударно-центробежный измельчитель [Текст] / Труфанов В.В., Опрышко В.М., Ляпин В.В. – Опубл. 27.03.2009. – Бюл. № 3. – 4 с.

119. Пат. 2438782 РФ, МПК В02С7/02. Устройство для измельчения сыпучих материалов [Текст] / Труфанов В.В., Опрышко В.М., Дружинин Р.А. и др. – опубл. 10.01.2012. – Бюл. № 1. – 3 с.

120. Пилипенко, А.Н. Механизация переработки и приготовления кормов в личных подсобных хозяйствах [Текст] / А.Н. Пилипенко, А.В. Тимановский – М.: Росагропромиздат, 1989. – 144 с.

121. Прощак, В.М. Высокоскоростные кормоизмельчительные машины [Текст] / В.М. Прощак // Высокоскоростные машины для животноводства. – М., 1964. – Ч. II. – С.29-37.

122. Прощак, В.М. Исследование дробления грубого корма молотковой дробилкой на повышенных скоростях [Текст] / В.М. Прощак // Всесоюзная научно-техническая конференция по применению высокоскоростных машин с электроприводом повышенной частоты тока в народном хозяйстве: Сб. докладов и сообщений. – Краснодар, 1967. – С.164-168.

123. Ревенко, И.И. О влиянии скорости молотков на эффективность процесса измельчения кормовых материалов [Текст] / И.И. Ревенко // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1971. – С.31-33.

124. Ревенко, И.И. О повышении качества работы молотковых дробилок [Текст] / И.И. Ревенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1980. – № 8. – С.18-21.

125. Резник, Е.Н. Кормоизмельчители для малых ферм [Текст] / Е.Н. Резник // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1992. – № 7. – С.8-11.

126. Сергеев, Н.С. Центробежно-роторные измельчители «ИЛС» для переработки фуражного зерна и семян рапса [Текст] / Н.С. Сергеев // Зоотехния. – 2007. – № 5. – С.27-28.

127. Сидашенко, А.И. Теоретическое исследование повышения износостойкости сит молотковых дробилок [Текст] / А.И Сидашенко, И.Г. Бойко // Технология повышения долговечности восстановленных деталей: Сб. науч. тр. МИИСП. – М., 1985. – С.78-83.

128. Скороходов, И.М. К вопросу определения скорости, необходимой для измельчения зерна одним ударом влет [Текст] / И.М. Скороходов // Тр. УСХА. – Киев, 1978. – Вып. 198. – С.45-52.

129. Соколов, А.Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна [Текст] / А.Я. Соколов. – М.: Колос, 1967. – 495 с.

130. Спорыхин, В.В. Влияние подачи материала в камеру на эффективность работы молотковых дробилок [Текст] / В.В. Спорыхин, А.М. Тарасенко, М.Н.



Изюмцева // Механизация животноводческих ферм: Тр. Саратовского ин-та механизации сельского хозяйства им. М.И. Калинина. – Саратов, 1970. – Вып. 46. – С.34-39.

131. Спорыхин, В.В. Влияние способа подачи материала в камеру на эффективность работы молотковой дробилки [Текст] / В.В. Спорыхин, А.М. Тарасенко, М.Н. Изюмцева // Зап. Воронежского СХИ. – Воронеж, 1972. – Т. 53. – С.158-162.

132. Спорыхин, В.В. Исследование взаимосвязи скоростного режима и диаметра рабочей камеры с мощностью электропривода дробилки с радиальной загрузкой: автореф. дис.... канд. техн. наук [Текст] / В.В. Спорыхин; Ворон. СХИ. – Воронеж, 1976. – 24с.

133. Сундеев, А.А. Исследование технологического процесса измельчения зерновых кормов: автореф. дис.... канд. техн. наук [Текст] / А.А. Сундеев. – Воронеж, 1968. – 25 с.

134. Сундеев, А.А. Процесс измельчения зерна и его развитие [Текст] / А.А. Сундеев// Механизация подготовки кормов в животноводстве: Сб. науч. тр. – Воронеж, 1984. – С.3-17.

135. Сундеев, А.А. Работа молотковой дробилки в замкнутом цикле [Текст] / А.А. Сундеев, А.П. Барбицкий, С.В. Мерчалов // Совершенствование средств механизации в животноводстве: Сб. науч. тр. – Воронеж, 1987. – С. 30-40.

136. Сундеев, А.А. Экспериментальные исследования работы сепаратора с эластичными рабочими органами [Текст] // Совершенствование технологий и технических средств для механизации процессов в растениеводстве: Сб. науч. тр./ВГАУ. Воронеж, 1994. – С.169-172.

137. Сыроватка, В.И. Исследование основных закономерностей процесса измельчения зерна в молотковых дробилках кормов: дис.... канд. техн. наук [Текст] / В.И. Сыроватка. – М., 1963. – 129 с.

138. Сыроватка, В.И. Исследование процесса измельчения зерна ударом [Текст] / В.И. Сыроватка // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1962. – № 11. – С.27-29.

139. Сыроватка, В.И. Исследование рабочих органов измельчителей семян рапса и фуражного зерна [Текст] / В.И. Сыроватка, Н.С. Сергеев // Техника в сельском хозяйстве. – 2008. – № 2. – С.43-45.

140. Сыроватка, В.И. Механизация приготовления кормов: Справочник [Текст] / В.И. Сыроватка, А.В. Дёмин, А.Х. Джалилов и др. – М.: Агропромиздат, 1985.– 386 с.

141. Сыроватка, В.И. О движении материала, измельчаемого на молотковой дробилке [Текст] / В.И. Сыроватка // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1964. – № 4. – С.38-39.

142. Сыроватка, В.И. Оборудование и технические средства для приготовления комбикормов [Текст] / В.И. Сыроватка, С. Рыжов // Комбикормовая промышленность. – 1996.– № 5. – С.12-15.

143. Сыроватка, В.И. Основные закономерности процесса измельчения зерна в молотковых дробилках [Текст] / В.И. Сыроватка // Науч. тр. ВИЭСХ. – М., 1964. – Т.ХIV. – С.89-97.

144. Сыроватка, В.И. Теория измельчения зерна в разгонном диске измельчителя [Текст] / В.И. Сыроватка, В.А. Денисов // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1981. – № 1. – С.20-24.

145. Сыроватка, В.И. Эффективное измельчение фуражного зерна в дробилках [Текст] / В.И. Сыроватка // Зоотехния. – 1991. – №11. – С.67-70.

146. Сысуев В. Оборудование для переработки зерна [Текст] / В.Сысуев // Комбикормовая промышленность. – 1997. – № 5. – С.13-14.

147. Тарасенко, А.М. Исследование влияния конструктивных параметров молотковой дробилки на эффективность измельчения зерновых кормов. автореф. дис.... канд. техн. наук [Текст] /А.М. Тарасенко; Ворон. СХИ–Воронеж, 1976.–24с.

148. Труфанов, В.В. Исследование влияния конструктивных и технологических параметров на процесс измельчения в измельчителе ударно-центробежного типа [Текст] / В.В. Труфанов, В.М. Опрышко, Р.А. Дружинин // Вестник Мичуринского филиала Российского университета кооперации: научно-производственный журнал. – Мичуринск: 2011. – С.62-67.

149. Труфанов, В.В. Математическая модель удельной энергоёмкости процесса измельчения зерна [Текст] / В.В.Труфанов, Н.Ф. Скурятин, Р.А. Дружинин // Вестник Воронежского государственного аграрного университета: теоретический и научно-практический журнал.–Воронеж:ВГАУ, 2012.–С.129-131.

150. Труфанов, В.В. Повышение эффективности дисковой мельницы [Текст] / В.В. Труфанов, М.Н Яровой, Р.А. Дружинин // Техника в сельском хозяйстве. – 2012. – №4. – С.6-8.

151. Труфанов, В.В. Совершенствование устройства для измельчения сыпучих материалов ударно-центробежного типа [Текст] / В.В. Труфанов, В.М. Опрышко, Р.А. Дружинин // Вестник Воронежского аграрного университета: Науч. докл. и сообщения. – Воронеж: ВГАУ, 2011. – С.39-42.

152. Труфанов, В.В. Теоретические зависимости сепарации измельченного зерна по конусной перфорированной поверхности [Текст] / В.В.Труфанов, Е.А. Андрианов, Р.А. Дружинин // Лесотехнический журнал.–Воронеж: ВГЛТА, 2013. – № 3 – С.164-170.

153. Труфанов, В.В. Ударно-центробежный измельчитель фуражного зерна [Текст] / В.В. Труфанов, В.М. Опрышко, В.В. Ляпин // Мировой опыт и перспективы развития сельского хозяйства: Материалы международной конференции, посвященной 95-летию Воронежского государственного аграрного университета. – Ч. I. – Воронеж: ФГОУ ВПО ВГАУ, 2008. – С. 157-159.

154. Труфанов, В.В. Устройство для измельчения сыпучих материалов [Текст] // В.В. Труфанов, В.М. Опрышко, Р.А. Дружинин // Вестник Мичуринского филиала Российского университета кооперации: научно-производственный журнал. – Мичуринск: 2011. – С.75-78.

155. Труфанов, В.В. Центробежный измельчитель [Текст] / В.В. Труфанов, В.М. Опрышко, В.В. Ляпин // Сельский механизатор. – 2008. – № 4. – С. 40.

156. Федоренко, И.Я. Переработка сельскохозяйственного сырья на малогабаритном оборудовании: Учебное пособие [Текст] / И.Я. Федоренко, С.В. Золотарев. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 1998. – 317 с.

157. Федоренко, И.Я. Энергетические соотношения при ударном измельчении зерна [Текст] / И.Я. Федоренко, А.М. Левин // Механизация и электрификация. – 2002. – № 11. – С.31-32.

158. Федоренко, И.Я. Влияние числа ударов, необходимых для разрушения зерна, на энергетику процесса измельчения [Текст] / И.Я.Федоренко, С.В.Золотарев, А.А. Смышляев // Хранение и переработка сельхоз.сырья. 2001. №6. С.53-54.

159. Федоренко, И.Я. Особенности механического удара в измельчителях фуражного зерна [Текст] / И.Я.Федоренко, С.В.Золотарев, А.А. Смышляев // Вестник Алтайской науки. Вып. 1. Т.2. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2001. – С. 126-129.

160. Федоренко, И.Я. Экспериментальные предпосылки к разработке ударно-центробежного измельчителя фуражного зерна [Текст] / И.Я.Федоренко, С.В.Золотарев, А.А. Смышляев и др. // Вестник Алтайской науки. Вып. 2. Т.2. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2002. – С. 126-129.

161. Федоров, В.А. Разработка и обоснование параметров центробежного дискового измельчителя фуражного зерна. автореф. дис.... канд. техн. наук. [Текст] / В.А. Федоров. – Челябинск, 2000. – 21с.

162. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов [Текст] / В.И. Феодосьев – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. –560 с.

163. Ходаков, Г.С. Физико-химическая механика измельчения [Текст] / Г.С. Ходаков М.: Наука, 1972. – 240 с.

164. Хорощенко, Г.С. Современная концепция измельчения с использованием техники завтрашнего дня [Текст] /Г.С. Хорощенко// Комбикорма. –2002. – № 1. – С.26-28.

165. Черепанов, С. Современные технологии дробления [Текст] /С. Черепанов, В. Карпушенко, М. Архипова // Комбикорма. – 2003. – № 8. – С.28-29.

166. Черняев, Н.П. Производство комбикормов [Текст] / Н.П. Черняев.– М.: Агропромиздат, 1989. – 224 с.

167. Черняев, Н.П. Технология комбикормового производства [Текст] / Н.П. Черняев// 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Колос, 1992. – 255 с.

168. Ширяев, А. Н. Статистический последовательный анализ. Оптимальные правила остановки [Текст] / А.Н. Ширяев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 1976. – 272 с.
169. Яблонский, А.П. Курс теоритической механики [Текст] /А.П. Яблонский. – М.: Высш. Школа, 1971. – 488 с.
170. Якименко, А.В. О коэффициенте полезного действия измельчителей зерна [Текст] / А.В. Якименко, А.В. Варакин // Техника в сельском хозяйстве. – 2007. – № 6. – С.17-18.
171. Hendrix A.T. Desing and Perfomans of asmall automatic Hammer mill [Текст] / А.Т. Hendrix // Agricultural Engineering. – 1977. – № 10. – P.6-7.
172. Herdenson S.M. Исследование дробления кормов [Текст] / S.M. Herdenson // Сельскохозяйственная техника. – 1961. – №7. – С.18-21.
173. Kruger W.S. Basic Principles involved in design of the feed grinder [Текст] / W.S. Kruger // Agricultural Engineering. – 1927. – С. 25-26.
174. Lasher R.E. Hammer mill [Текст] / R.E. Lasher // Amerikan miller. – 1959. – №3. – P.18.
175. Silver E.A. A simple system for terting graund feeds [Текст] / E.A.Silver // Agricultural Engineering. – 1959. – №3. – P.18.
176. Stockman K. Technologie der Mischfutter Herstellung [Текст] / K. Stockman. – Hannover, 1960. – 210 с.
177. Van Aarsen. Передовая технология для комбикормовой индустрии [Текст] / Van Aarsen // Комбикорма. – 1999. – №7. – С. 25-27.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1 – РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПЛАНУ ХАРТЛИ ДЛЯ ЧЕТЫРЕХ ФАКТОРОВ**

Таблица П1 – Опытные данные проведения многофакторного эксперимента.

№	S	n1 загр.		n2		Q, кг/ч	W1, Вт	W2, Вт	Wсум, Вт	Ауд, кВт*ч/т	Остаток на решетках					M	λ	Эи, кВт*ч/т*ед.ст.изм.
		частота	обороты	частота	обороты						дно	0,2	1,2	2	3			
1	4,8	16	952	47	2793	635	715	2272	2538,95	4	160	112	256	120	29	1,34	3,13	1,28
1	4,8	16	952	47	2793	635	725	2250	2528,75	3,98	150	105	262	121	31	1,37	3,07	1,3
1	4,8	16	952	47	2793	635	740	2230	2524,5	3,98	148	110	276	125	31	1,38	3,04	1,31
2	4,8	14	848	47	2793	565	600	2100	2295	4,06	153	108	223	101	33	1,32	3,18	1,28
2	4,8	14	848	47	2793	565	606	2080	2283,1	4,04	167	109	245	114	34	1,33	3,16	1,28
2	4,8	14	848	47	2793	565	586	2106	2288,2	4,05	145	95	230	110	30	1,36	3,09	1,31
3	4,8	14	848	45	2707	635	630	2160	2371,5	3,73	120	91	240	140	60	1,57	2,68	1,39
3	4,8	14	848	45	2707	635	640	2150	2371,5	3,73	137	104	237	151	58	1,52	2,76	1,35
3	4,8	14	848	45	2707	635	635	2160	2375,75	3,74	135	102	223	167	66	1,57	2,68	1,4
4	4,8	16	952	45	2707	565	620	2050	2269,5	4,02	141	95	230	114	35	1,39	3,02	1,33
4	4,8	16	952	45	2707	565	637	2000	2241,45	3,97	134	98	251	120	45	1,45	2,9	1,37
4	4,8	16	952	45	2707	565	617	1950	2181,95	3,86	134	104	254	113	33	1,4	3	1,29
5	4,2	16	952	47	2793	635	770	2250	2567	4,04	210	132	268	109	22	1,2	3,5	1,16
5	4,2	16	952	47	2793	635	794	2400	2714,9	4,28	204	136	262	88	17	1,15	3,65	1,17
5	4,2	16	952	47	2793	635	720	2210	2490,5	3,92	238	161	311	105	24	1,17	3,59	1,09
6	4,2	14	848	47	2793	565	655	2242	2462,45	4,36	175	125	309	131	30	1,34	3,13	1,39
6	4,2	14	848	47	2793	565	598	2100	2293,3	4,06	162	129	279	121	28	1,33	3,16	1,28
6	4,2	14	848	47	2793	565	581	2152	2323,05	4,11	174	132	251	140	29	1,33	3,16	1,3
7	4,2	14	848	45	2707	635	586	2289	2443,75	3,85	154	112	281	123	32	1,37	3,07	1,25
7	4,2	14	848	45	2707	635	585	2210	2375,75	3,74	150	113	271	133	38	1,41	2,98	1,26
7	4,2	14	848	45	2707	635	620	2295	2477,75	3,9	153	110	269	131	35	1,39	3,02	1,29
8	4,2	16	952	45	2707	565	680	2080	2346	4,15	207	142	314	122	30	1,27	3,31	1,25
8	4,2	16	952	45	2707	565	720	2130	2422,5	4,29	163	104	222	116	31	1,33	3,16	1,36
8	4,2	16	952	45	2707	565	715	2104	2396,15	4,24	173	119	240	103	29	1,27	3,31	1,28

Продолжение таблицы П1

№	S	n1 загр.		n2		Q, кг/ч	W1.Вт	W2.Вт	Wсум, Вт	Ауд, кВт*ч/т	Остаток на решетках					M	λ	Эи, кВт*ч/ т*ед.ст.изм.
		частота	обороты	частота	обороты						дно	0,2	1,2	2	3			
9	4,5	15	900	46	2750	600	650	2150	2380	3,97	118	86	220	109	24	1,4	3	1,32
9	4,5	15	900	46	2750	600	671	2200	2440,35	4,07	122	92	230	120	20	1,39	3,02	1,35
9	4,5	15	900	46	2750	600	660	2212	2441,2	4,07	149	112	255	123	38	1,39	3,02	1,35
10	4,5	10	600	46	2750	600	511	2200	2304,35	3,84	124	98	243	203	74	1,67	2,51	1,53
10	4,5	10	600	46	2750	600	504	2100	2213,4	3,69	124	86	247	202	68	1,67	2,51	1,47
10	4,5	10	600	46	2750	600	511	2084	2205,75	3,68	91	76	215	151	70	1,71	2,46	1,49
11	4,5	20	1200	46	2750	600	760	2000	2346	3,91	152	98	201	75	14	1,19	3,53	1,11
11	4,5	20	1200	46	2750	600	780	1980	2346	3,91	194	140	254	112	15	1,2	3,5	1,12
11	4,5	20	1200	46	2750	600	773	2034	2385,95	3,98	223	134	283	92	20	1,16	3,62	1,1
12	4,5	15	900	42	2500	600	610	1850	2091	3,49	131	104	294	170	68	1,59	2,64	1,32
12	4,5	15	900	42	2500	600	630	1839	2098,65	3,5	138	115	286	203	62	1,59	2,64	1,32
12	4,5	15	900	42	2500	600	580	1780	2006	3,34	164	132	293	207	65	1,54	2,73	1,22
13	4,5	15	900	50	3000	600	650	2200	2422,5	4,04	211	137	338	96	13	1,19	3,53	1,14
13	4,5	15	900	50	3000	600	650	2250	2465	4,11	183	137	304	103	22	1,25	3,36	1,22
13	4,5	15	900	50	3000	600	630	2320	2507,5	4,18	184	155	341	113	14	1,24	3,39	1,23
14	3	15	900	46	2750	600	794	2350	2672,4	4,45	241	159	356	132	27	1,23	3,41	1,31
14	3	15	900	46	2750	600	770	2460	2745,5	4,58	247	174	352	122	21	1,19	3,53	1,3
14	3	15	900	46	2750	600	760	2450	2728,5	4,55	231	163	353	118	21	1,21	3,47	1,31
15	6	15	900	46	2750	600	560	1800	2006	3,34	253	160	365	127	29	1,22	3,44	0,97
15	6	15	900	46	2750	600	563	1860	2059,55	3,43	196	141	272	147	31	1,31	3,21	1,07
15	6	15	900	46	2750	600	510	1780	1946,5	3,24	198	142	258	141	35	1,3	3,23	1
16	4,5	15	900	46	2750	400	552	1780	1982,2	4,96	201	156	289	141	23	1,27	3,31	1,5
16	4,5	15	900	46	2750	400	550	1805	2001,75	5	150	113	309	162	49	1,49	2,82	1,77
16	4,5	15	900	46	2750	400	554	1816	2014,5	5,04	152	116	310	166	56	1,5	2,8	1,8
17	4,5	15	900	46	2750	800	760	2380	2669	3,34	211	134	266	84	16	1,13	3,72	0,9
17	4,5	15	900	46	2750	800	730	2350	2618	3,27	220	128	254	118	23	1,2	3,5	0,94
17	4,5	15	900	46	2750	800	750	2422	2696,2	3,37	224	132	262	80	13	1,1	3,82	0,88



Таблица П2 - Опытные данные получения тах производительности.

№	S	n1 заг		n2		Q.кг/ч	Wсум, кВт	Ауд, кВт*ч/т	Остаток на решетках					M	Σ остат- ков на решетках	λ	Эи, кВт*ч/ т*ед.ст.изм.
		частота	обороты	частота	обороты				дно	0,2	1,2	2	3				
1	3	10	600	50	3000	650	3485	5,36	278	168	266	56	7	0,95	775	4,42	1,21
2	3	15	900	50	3000	1100	2975	2,7	260	157	299	94	19	1,1	829	3,82	0,71
3	3	15	900	50	3000	1050	2890	2,75	280	184	322	149	22	1,17	957	3,59	0,77
4	3	10	600	50	3000	700	3595,5	5,14	316	176	273	66	10	0,94	841	4,47	1,15

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2 – УРАВНЕНИЯ ПОШАГОВОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ  
ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКО-  
СТИ (AUD).**

1.  $Aud = 6,0161149438 - 0,0007579656 * SQ; R^2 = 0,75145080.$
2.  $Aud = 2,269370 - 0,000758 * SQ + 0,001362 * N2; R^2 = 0,84322011.$
3.  $Aud = 2,0305098605 - 0,0008493434 * SQ + 0,0013624528 * N2 + 0,0001198963 * SN1; R^2 = 0,87456074.$
4.  $Aud = -24,624321014 - 0,000849343 * SQ + 0,020768886 * N2 + 0,000119896 * SN1 - 0,000003528 * N2N2; R^2 = 0,90401756.$
5.  $Aud = -25,124466156 - 0,000915221 * SQ + 0,021202881 * N2 + 0,000206334 * SN1 - 0,000003607 * N2N2 - 0,000000326 * N1N1; R^2 = 0,91283029.$
6.  $Aud = -24,94686967 - 0,00185072 * SQ + 0,02104940 * N2 + 0,00081531 * SN1 - 0,00000358 * N2N2 - 0,00000181 * N1N1 + 0,00000360 * QQ; R^2 = 0,94160114.$
7.  $Aud = -28,043049758 - 0,001598187 * SQ + 0,023316539 * N2 + 0,000983557 * SN1 - 0,00000399 * N2N2 - 0,00000222 * N1N1 + 0,00000265 * QQ - 0,03379334 * SS; R^2 = 0,94493734.$

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3 – КВАДРАТИЧНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ И КОНТУР-  
НЫЕ ГРАФИКИ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ (AUD) ПРОЦЕССА  
ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА ОТ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ**

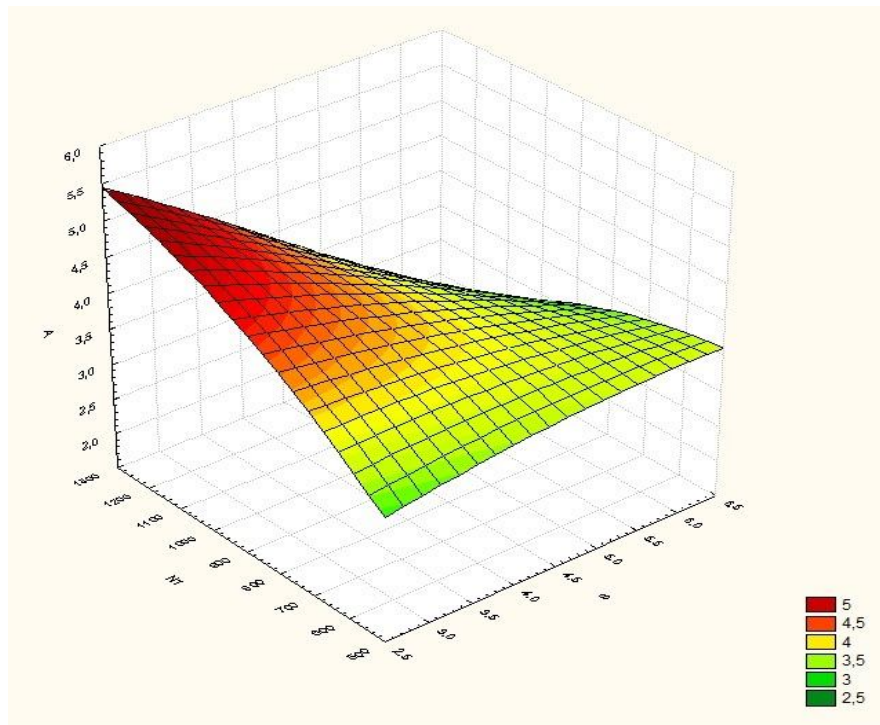


Рисунок 1 – Квадратичная зависимость удельной энергоемкости (Aud) процесса измельчения зерна от зазора (S) и оборотов первого диска (N1)

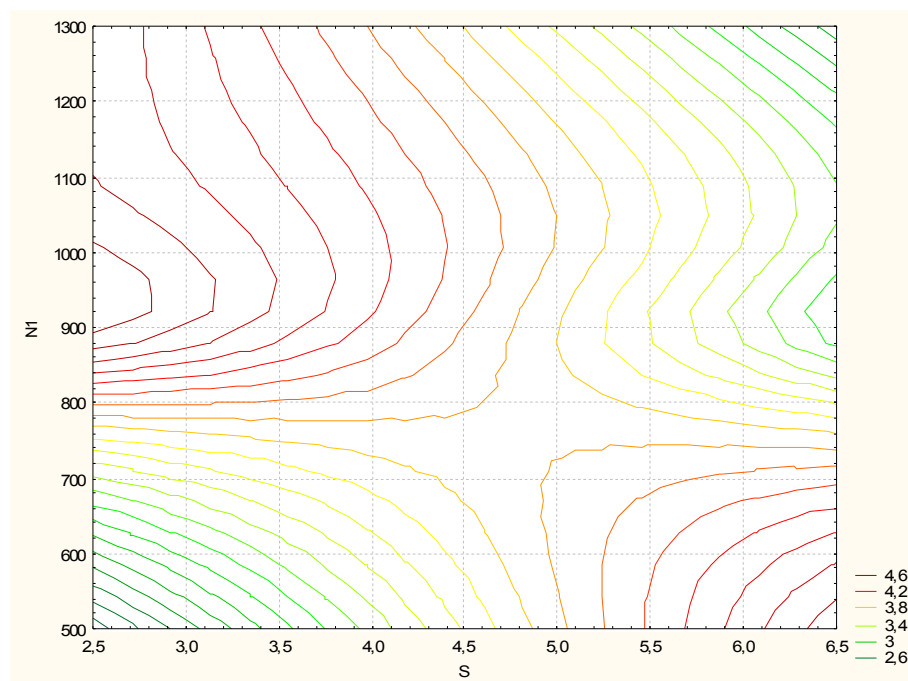


Рисунок 2 – Контурный график зависимости удельной энергоемкости (Aud) от зазора (S) и оборотов первого диска (N1)

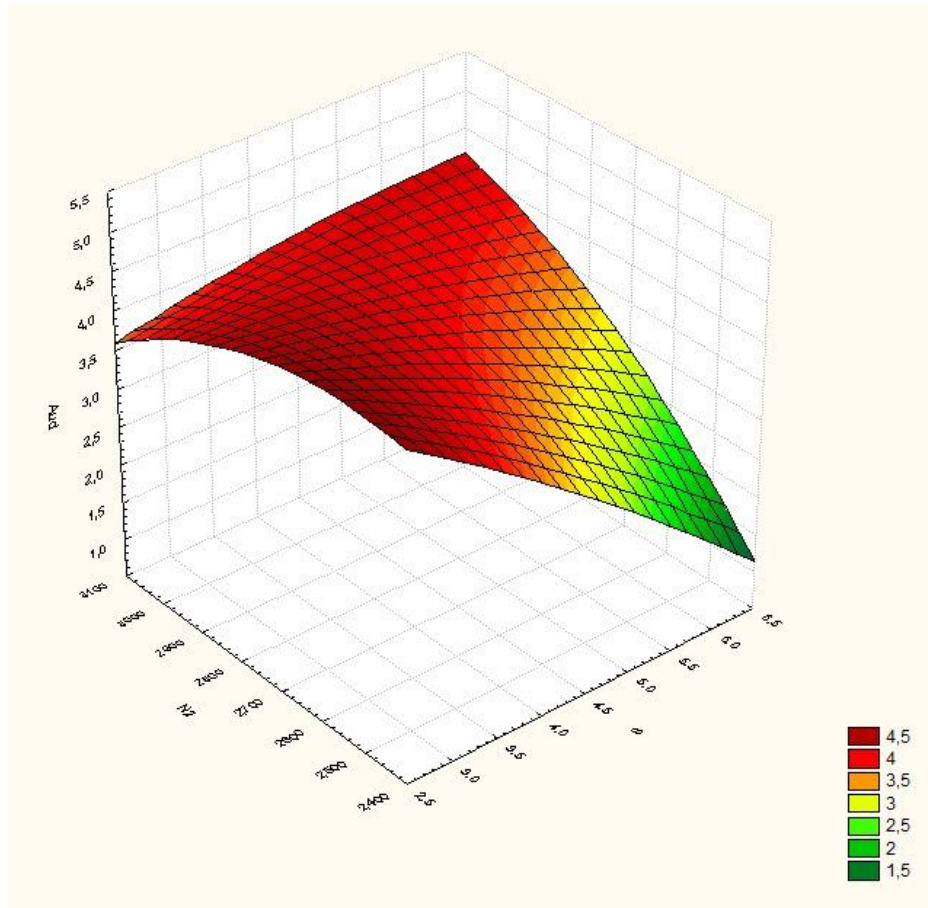


Рисунок 3 – Квадратичная зависимость удельной энергоёмкости ( $A_{ud}$ ) процесса измельчения зерна от зазора ( $S$ ) и оборотов второго диска ( $N_2$ )

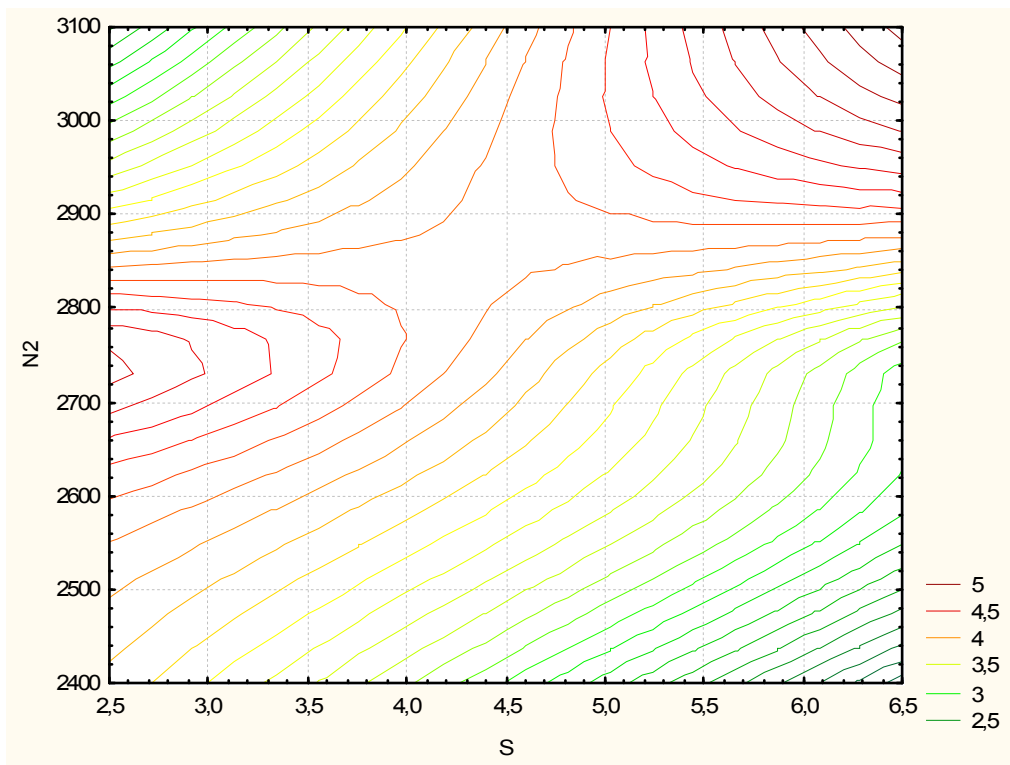


Рисунок 4 – Контурный график зависимости удельной энергоёмкости ( $A_{ud}$ ) от зазора ( $S$ ) и оборотов второго диска ( $N_2$ )

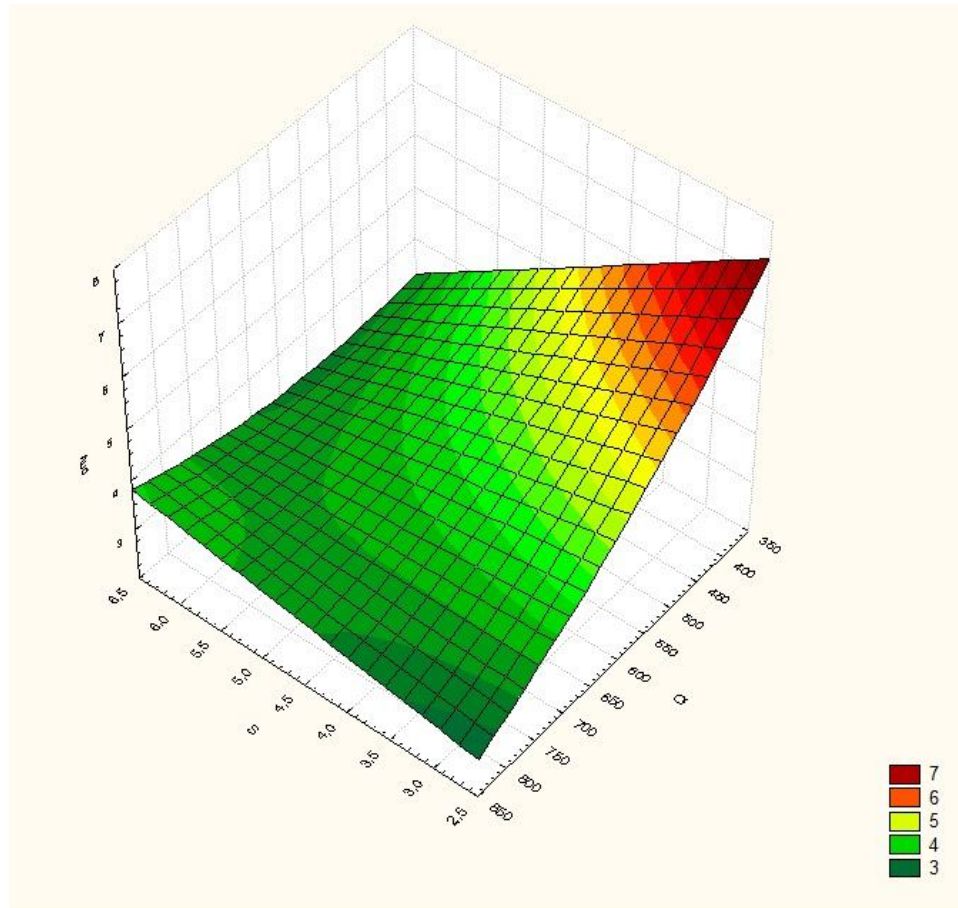


Рисунок 5 – Квадратичная зависимость удельной энергоёмкости ( $A_{ud}$ ) процесса измельчения зерна от зазора ( $S$ ) и производительности ( $Q$ )

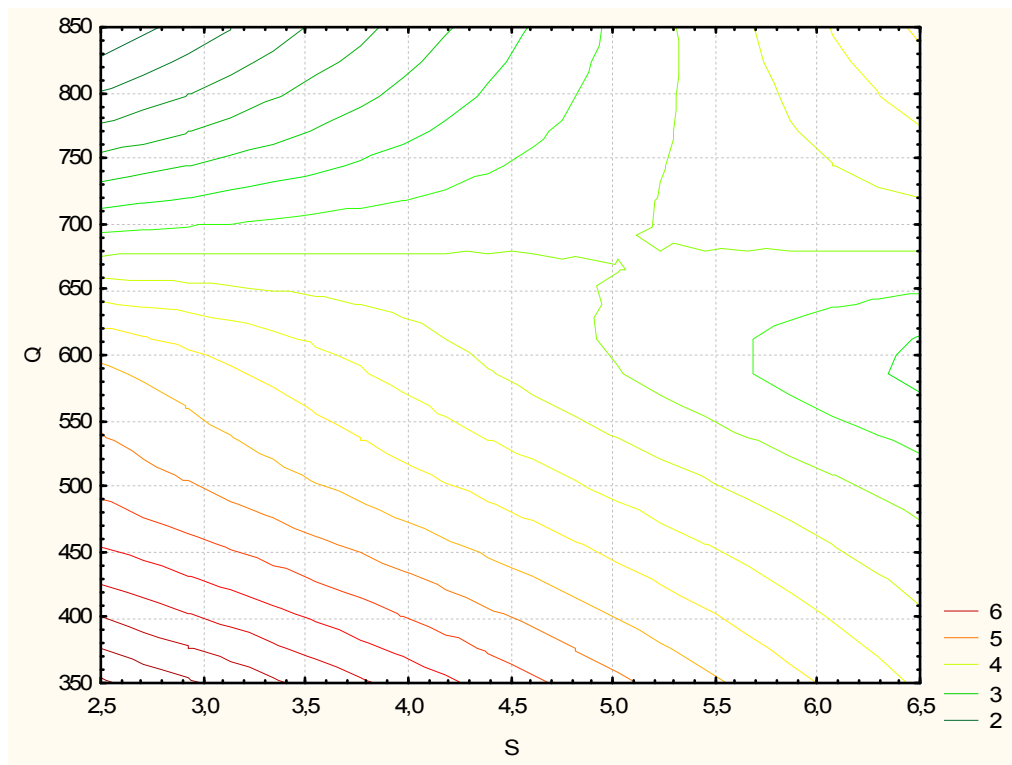


Рисунок 6 – Контурный график зависимости удельной энергоёмкости ( $A_{ud}$ ) от зазора ( $S$ ) и производительности ( $Q$ )

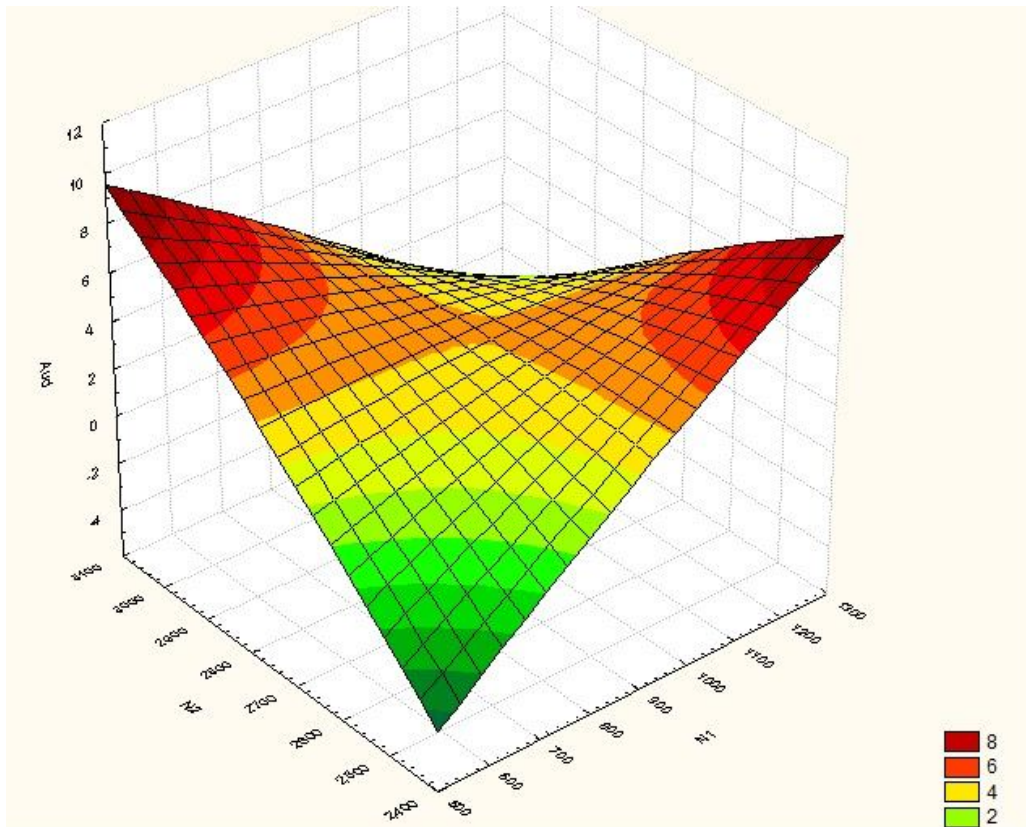


Рисунок 7 – Квадратичная зависимость удельной энергоемкости ( $A_{ud}$ ) процесса измельчения зерна от оборотов первого диска ( $N_1$ ) и оборотов второго диска ( $N_2$ )

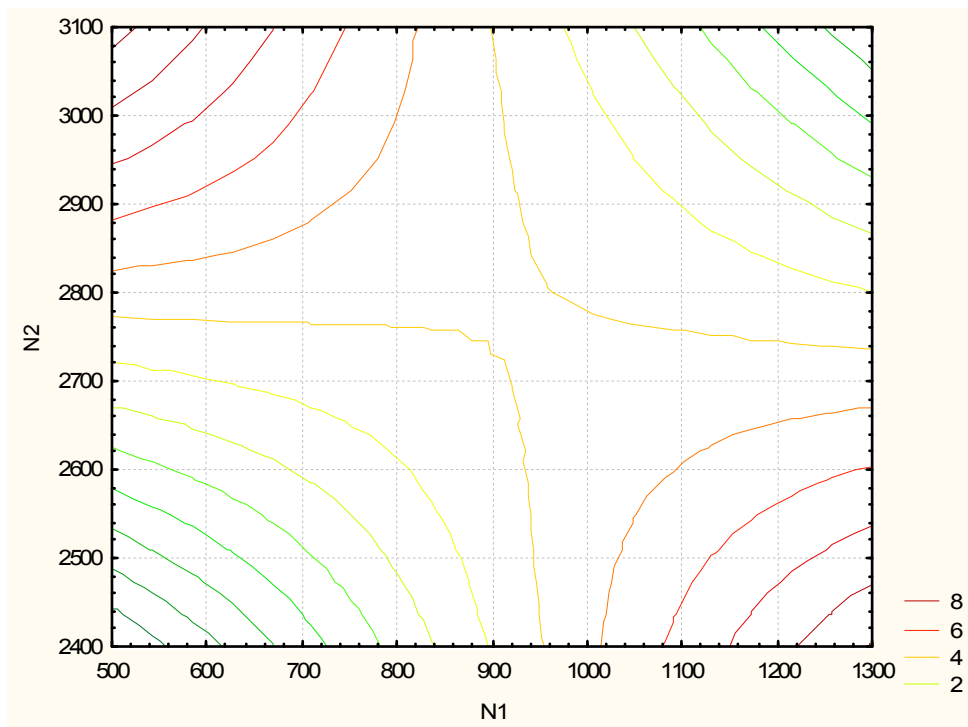


Рисунок 8 – Контурный график зависимости удельной энергоемкости ( $A_{ud}$ ) от оборотов первого диска ( $N_1$ ) и оборотов второго диска ( $N_2$ )

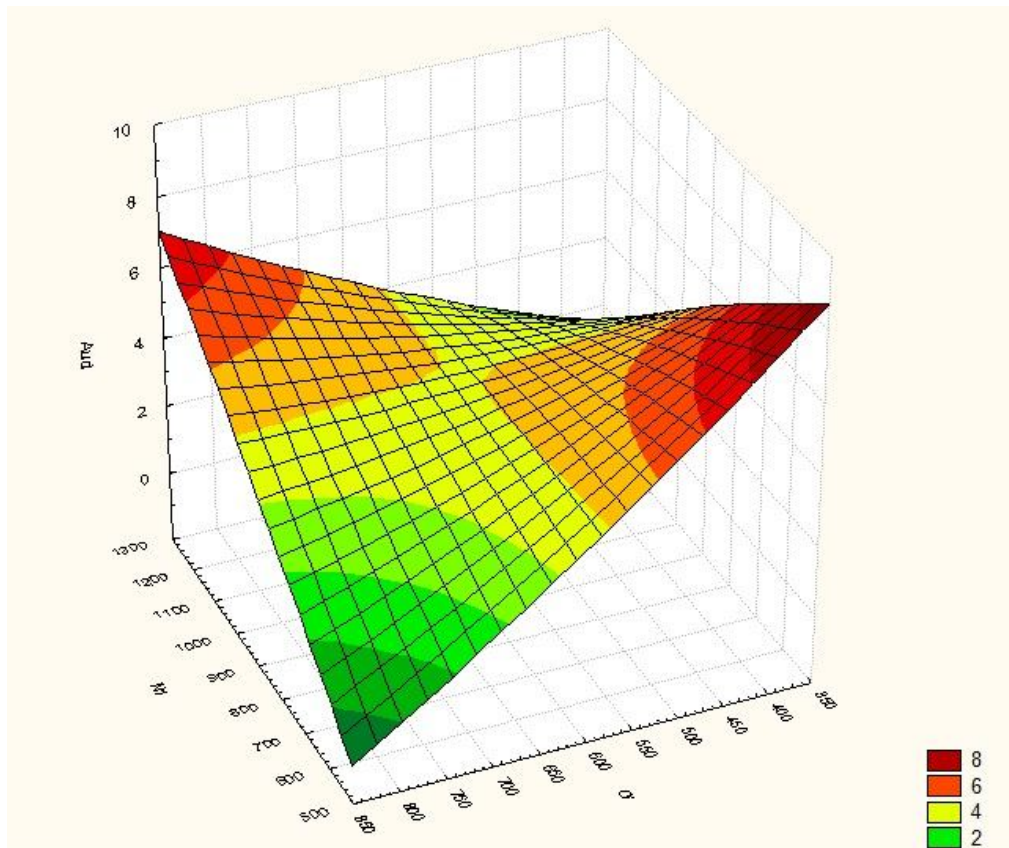


Рисунок 9 – Квадратичная зависимость удельной энергоёмкости ( $A_{ud}$ ) процесса измельчения зерна от оборотов первого диска ( $N_1$ ) и производительности ( $Q$ )

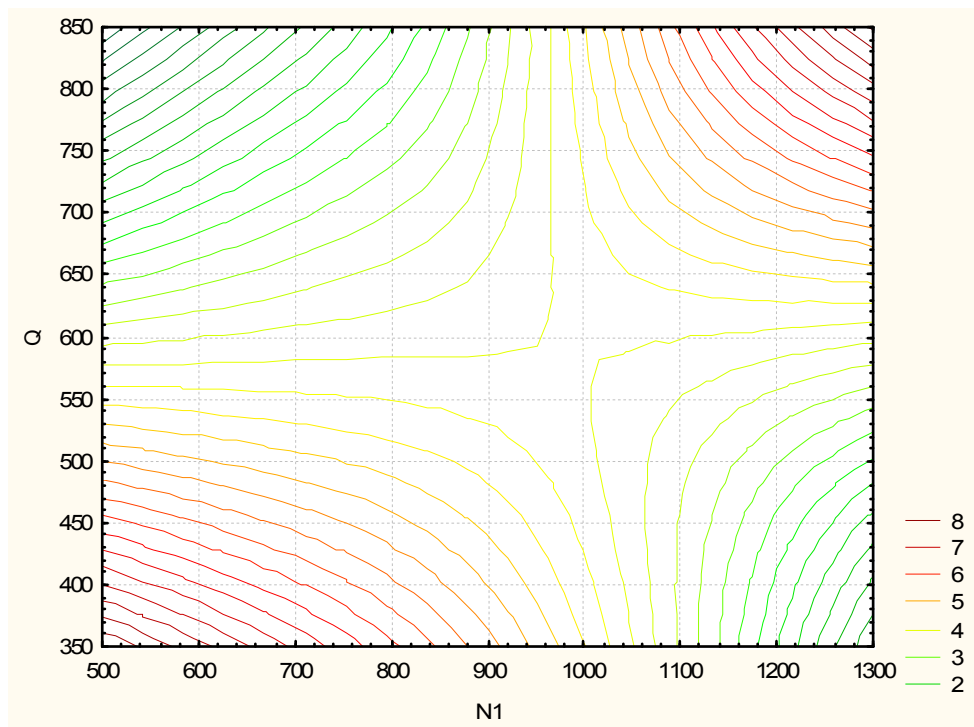


Рисунок 10 – Контурный график зависимости удельной энергоёмкости ( $A_{ud}$ ) от оборотов первого диска ( $N_1$ ) и производительности ( $Q$ )

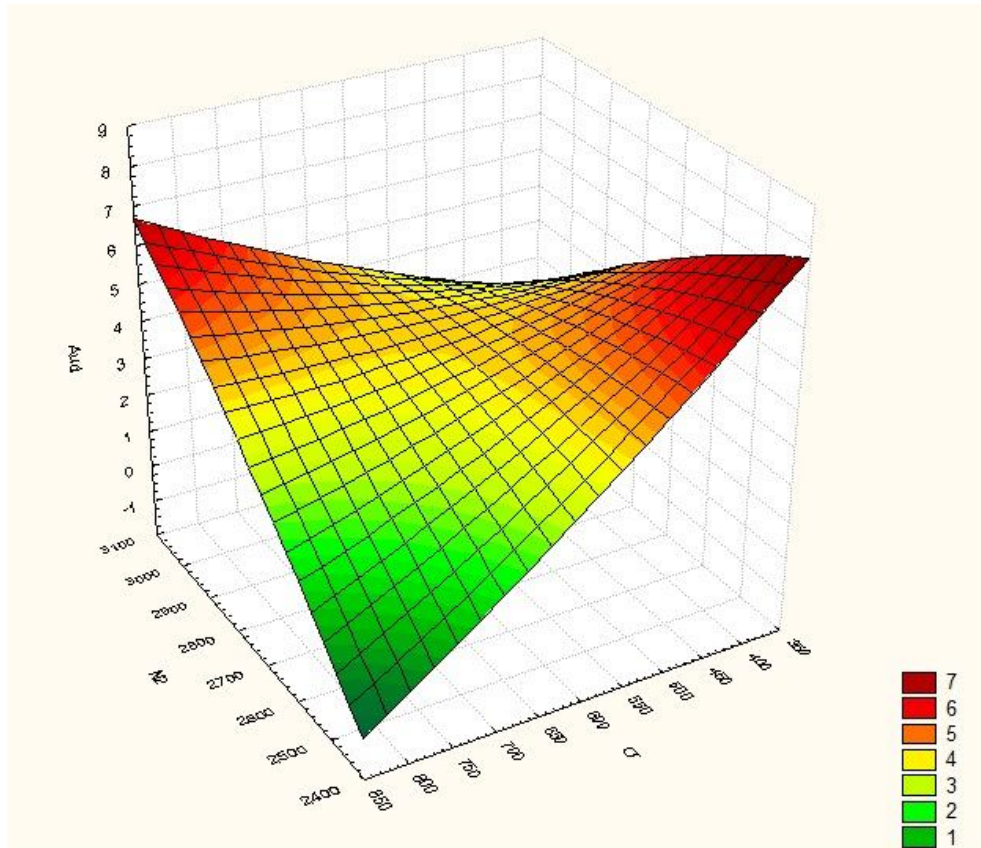


Рисунок 11 – Квадратичная зависимость удельной энергоемкости ( $A_{ud}$ ) процесса измельчения зерна от оборотов второго диска ( $N_2$ ) и производительности ( $Q$ )

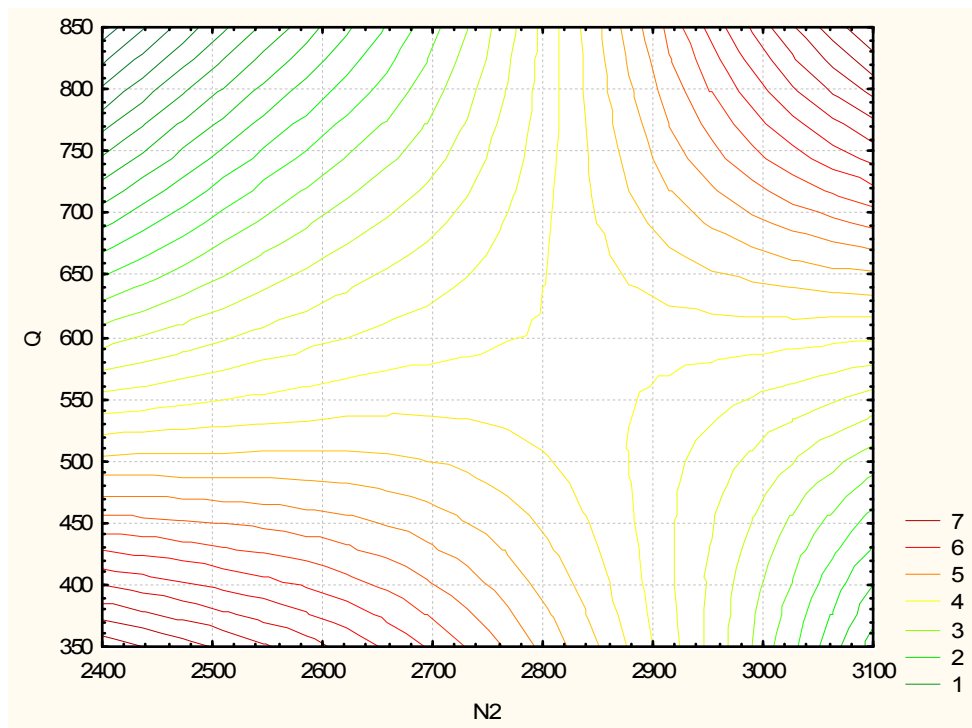


Рисунок 10 – Контурный график зависимости удельной энергоемкости ( $A_{ud}$ ) от оборотов второго диска ( $N_2$ ) и производительности ( $Q$ )



**ПРИЛОЖЕНИЕ 4 – УРАВНЕНИЯ ПОШАГОВОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ  
ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГИЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ  
ЗЕРНА (ЭИЗ)**

1.  $\text{ЭИЗ}=2,099750-0,000002*N1Q; R^2= 0,63624491.$
2.  $\text{ЭИЗ}=2,286740-0,000001*N1Q-0.000139*SQ; R^2= 0,73673503.$
3.  $\text{ЭИЗ}=2,382629-0,000001*N1Q-0.000104*SQ-0,00000015*N2Q; R^2 = 0,75233255.$
4.  $\text{ЭИЗ}=2,809295-0,000001*N1Q-0,000229*SQ-0,000001*N2Q-0,02359*SS.$   
 $R^2=0,78756785.$
5.  $\text{ЭИЗ}=1,422019-0,000005*N1Q-0,000842*SQ-0,00000012*N2Q-0,063702*SS+$   
 $+0,002496*N1; R^2= 0,82416119$
6.  $\text{ЭИЗ}=1,42979 - 0,00001*N1Q-0,00272*SQ-0,0000015*N2Q-0,05879*SS+$   
 $+0,00822*N1-1,16927*S; R^2= 0,83442697.$

**ПРИЛОЖЕНИЕ 5 – КВАДРАТИЧНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ И КОНТУР-  
НЫЕ ГРАФИКИ ЭНЕРГИИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА  
(ЭИЗ) ОТ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ**

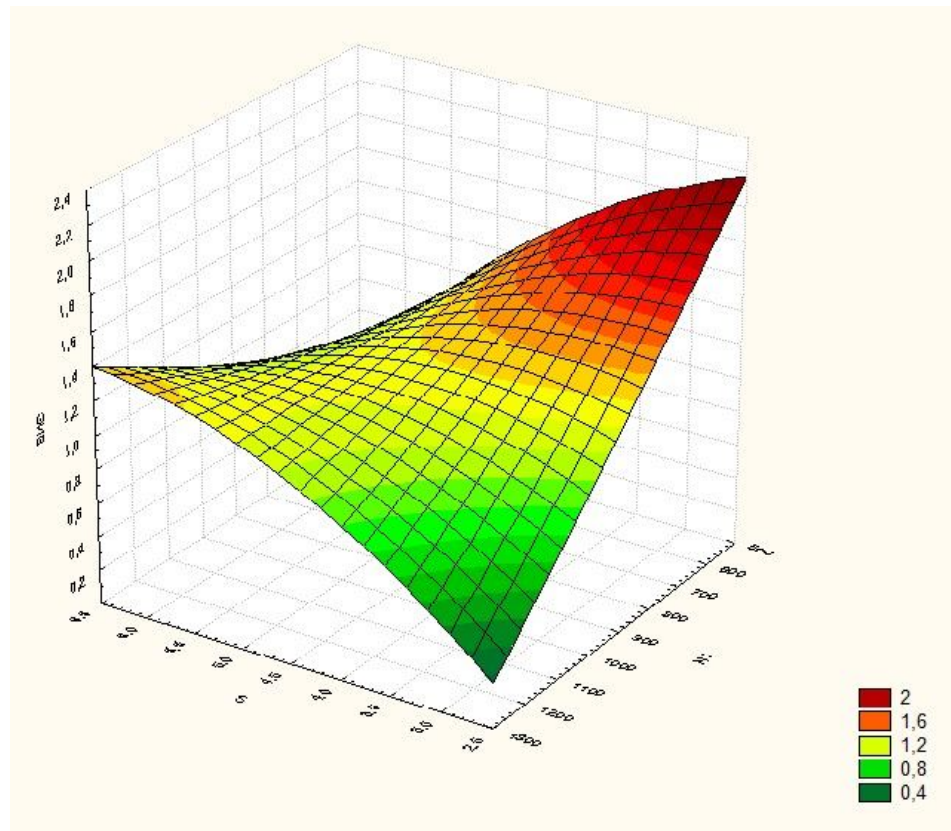


Рисунок 1 – Квадратичная зависимость энергии процесса измельчения зерна (Эиз) от зазора (S) и оборотов первого диска (N1)

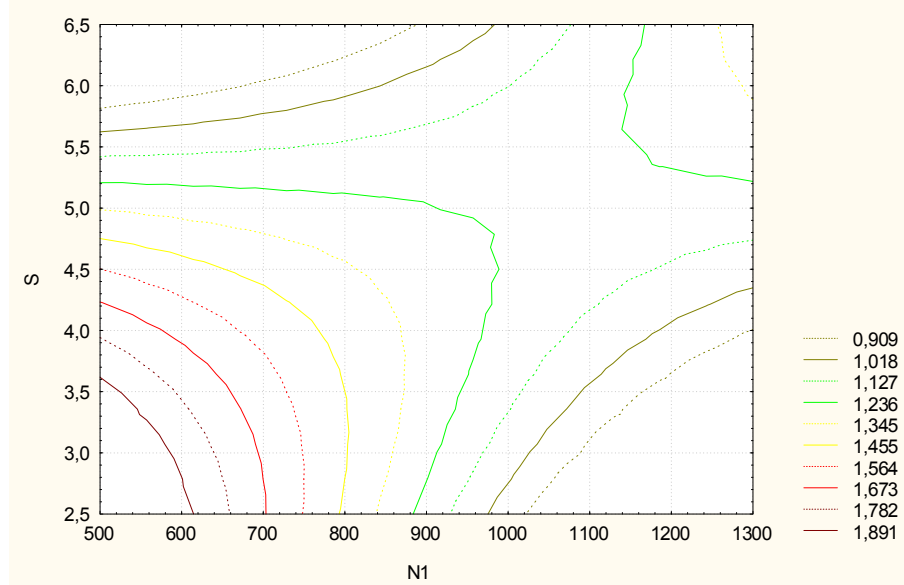


Рисунок 2 – Контурный график зависимости энергии процесса измельчения зерна (Эиз) от зазора (S) и оборотов первого диска (N1)

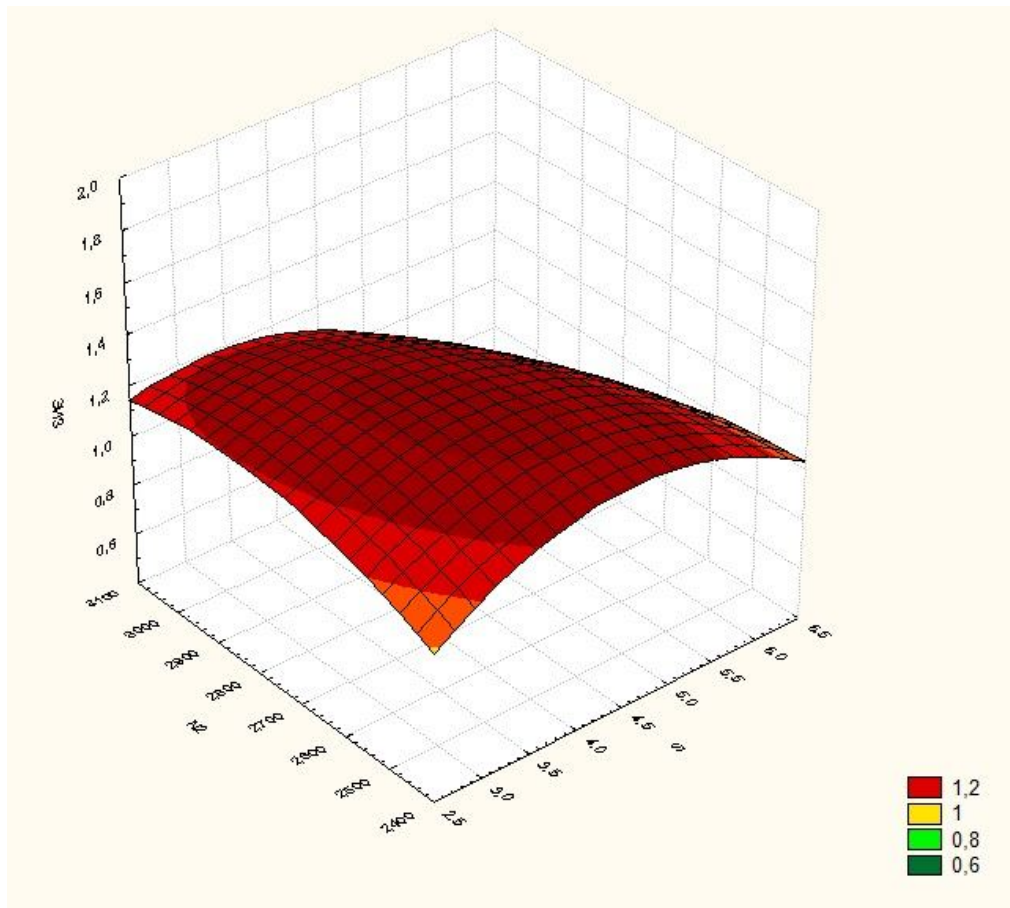


Рисунок 3 – Квадратичная зависимость энергии процесса измельчения зерна (Эиз) от зазора (S) и оборотов второго диска (N2)

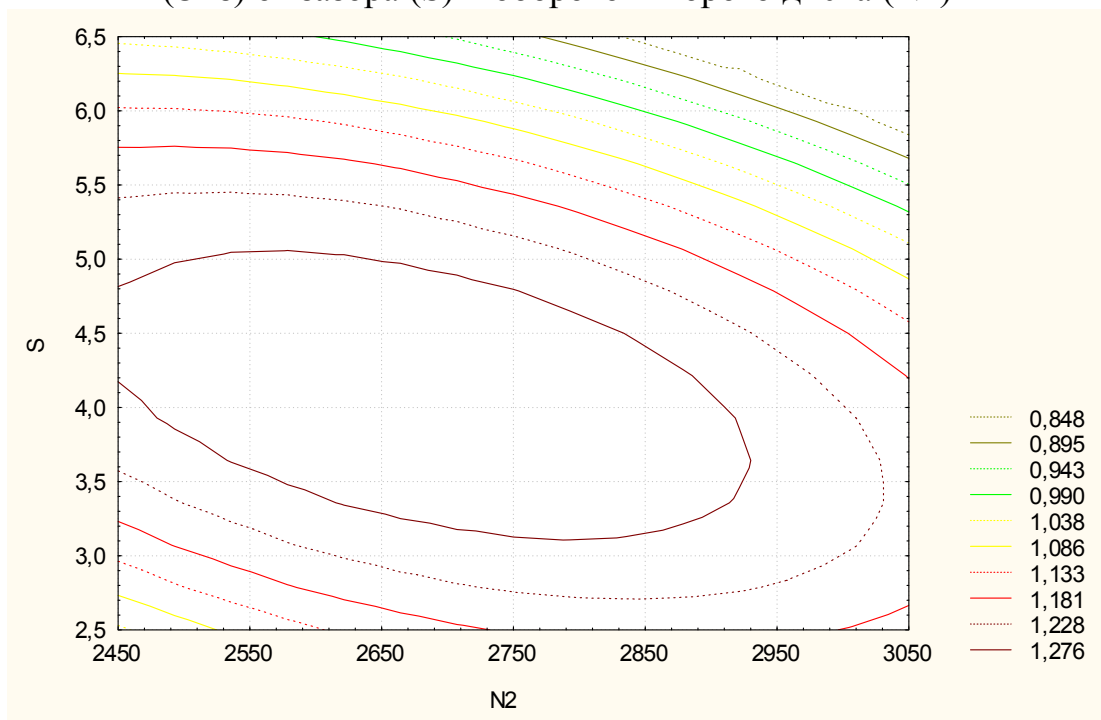


Рисунок 4 – Контурный график зависимости энергии процесса измельчения зерна (Эиз) от зазора (S) и оборотов второго диска (N2)

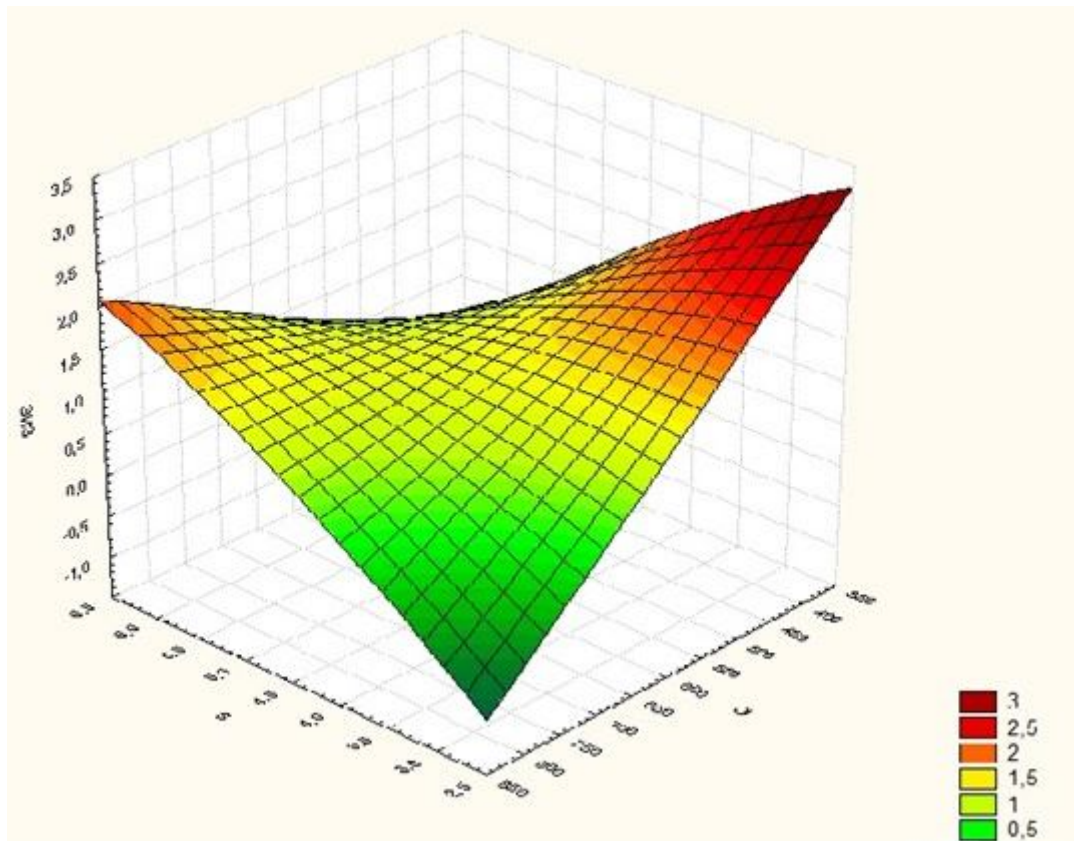


Рисунок 5 – Квадратичная зависимость энергии процесса измельчения зерна (Эиз) от зазора (S) и производительности (Q)

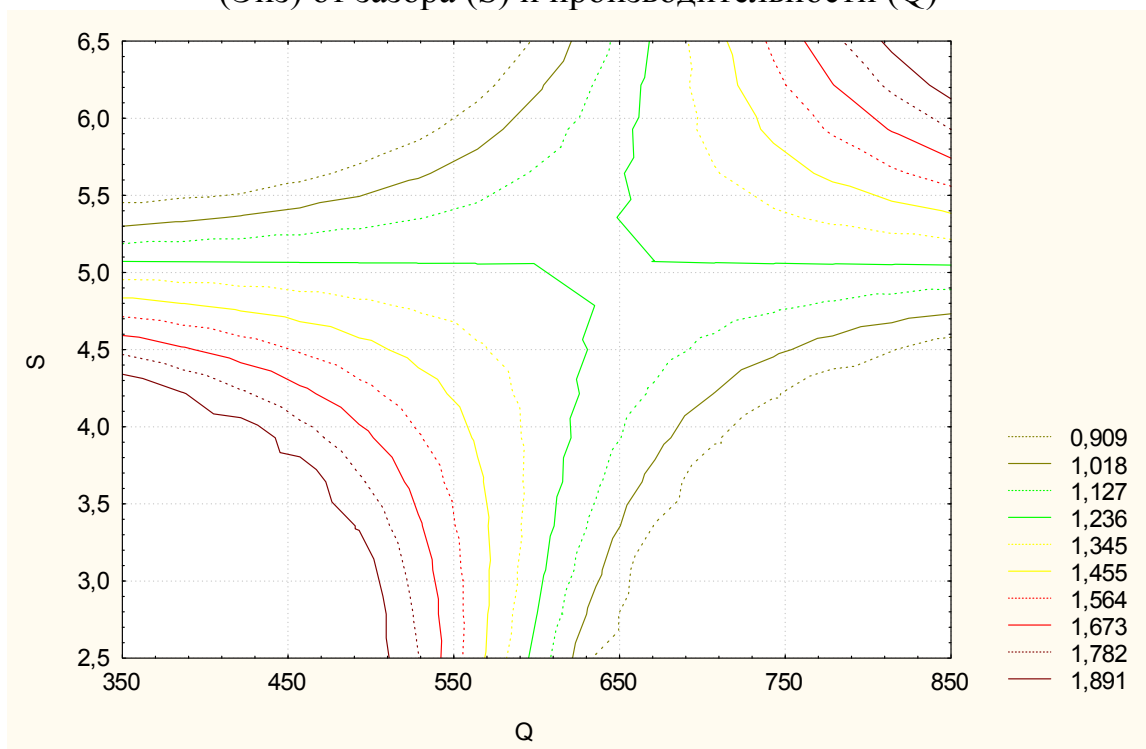


Рисунок 6 – Контурный график зависимости энергии процесса измельчения зерна (Эиз) от зазора (S) и производительности (Q)

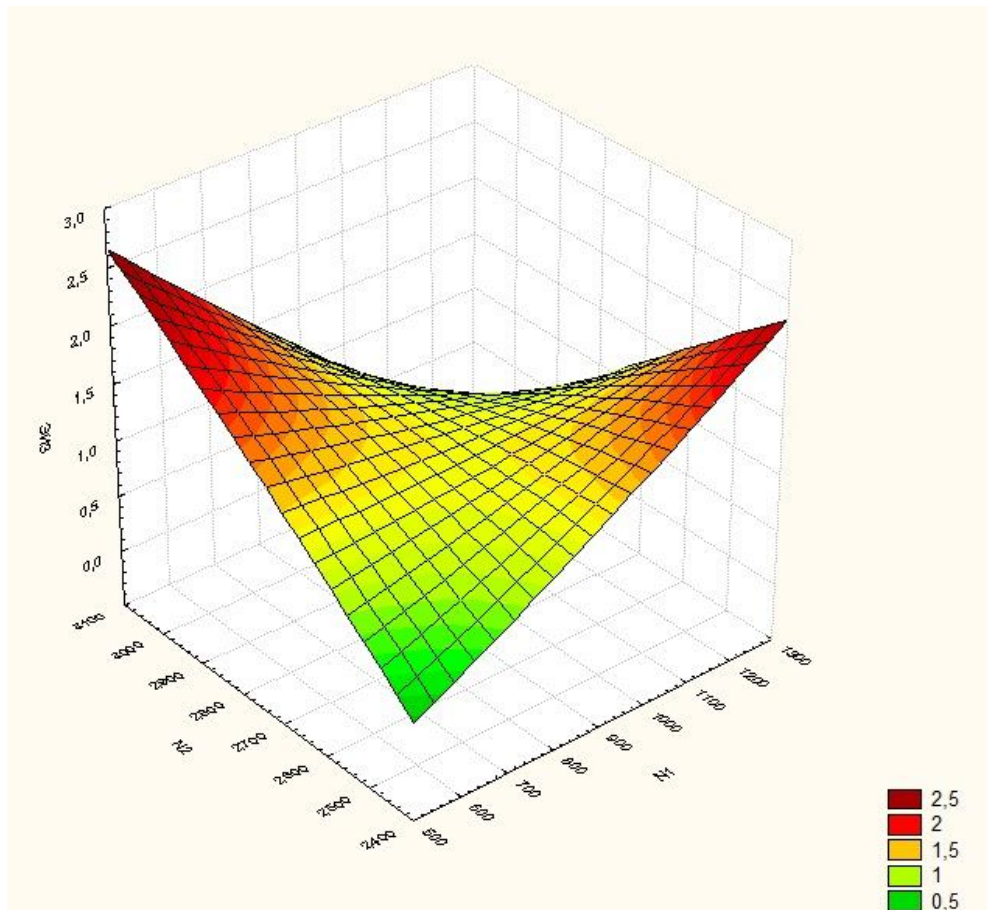


Рисунок 7 – Квадратичная зависимость энергии процесса измельчения зерна (Эиз) от оборотов первого диска (N1) и оборотов второго диска (N2)

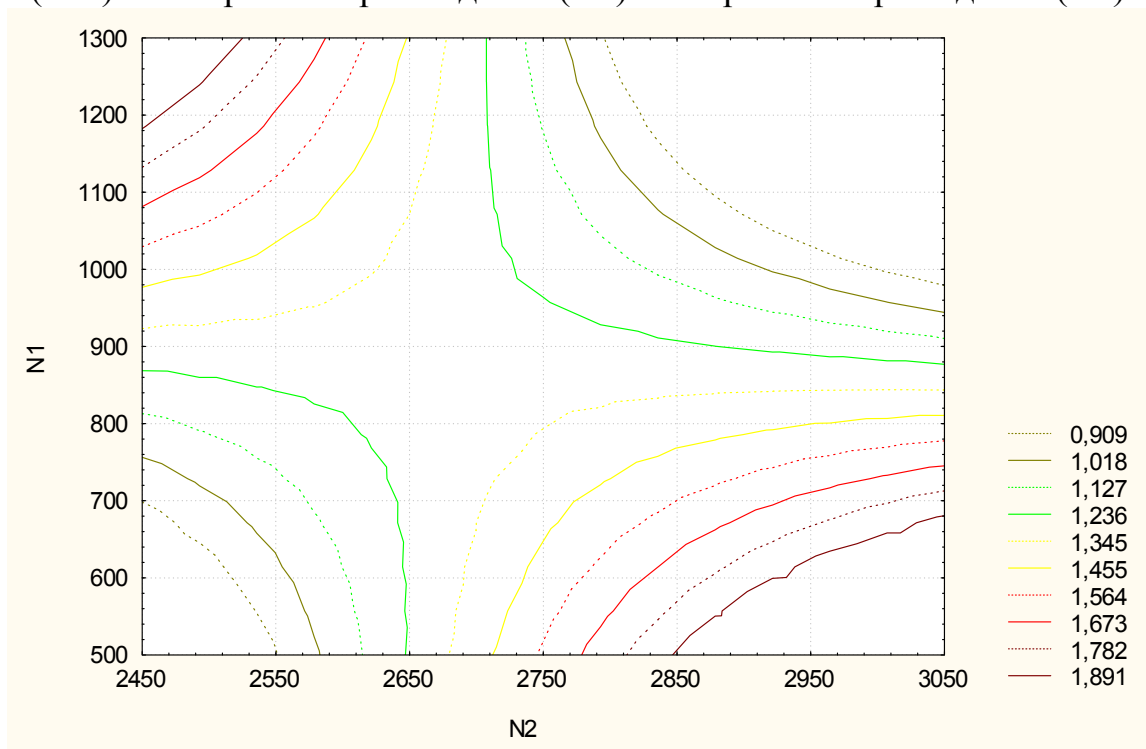


Рисунок 8 – Контурный график зависимости энергии процесса измельчения зерна (Эиз) от оборотов первого диска (N1) и оборотов второго диска (N2)

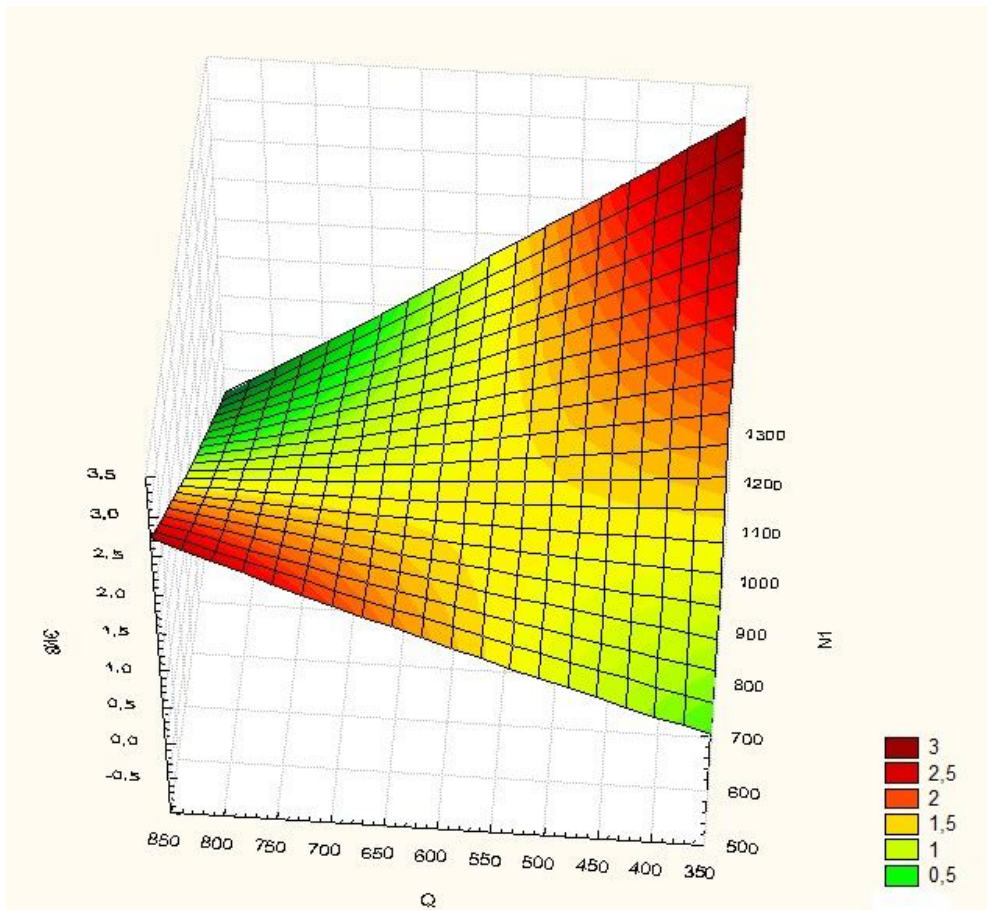


Рисунок 9 – Квадратичная зависимость энергии процесса измельчения зерна (Эиз) от оборотов первого диска (N1) и производительности (Q)

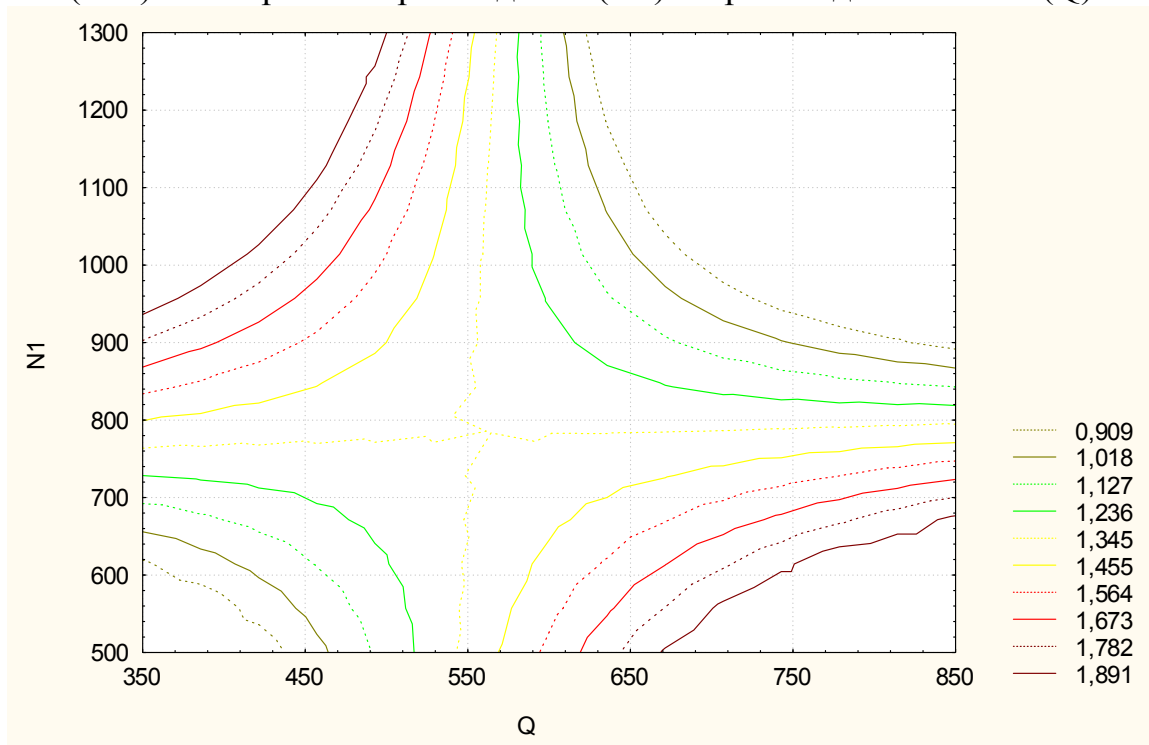


Рисунок 10 – Контурный график зависимости энергии процесса измельчения зерна (Эиз) от оборотов первого диска (N1) и производительности (Q)

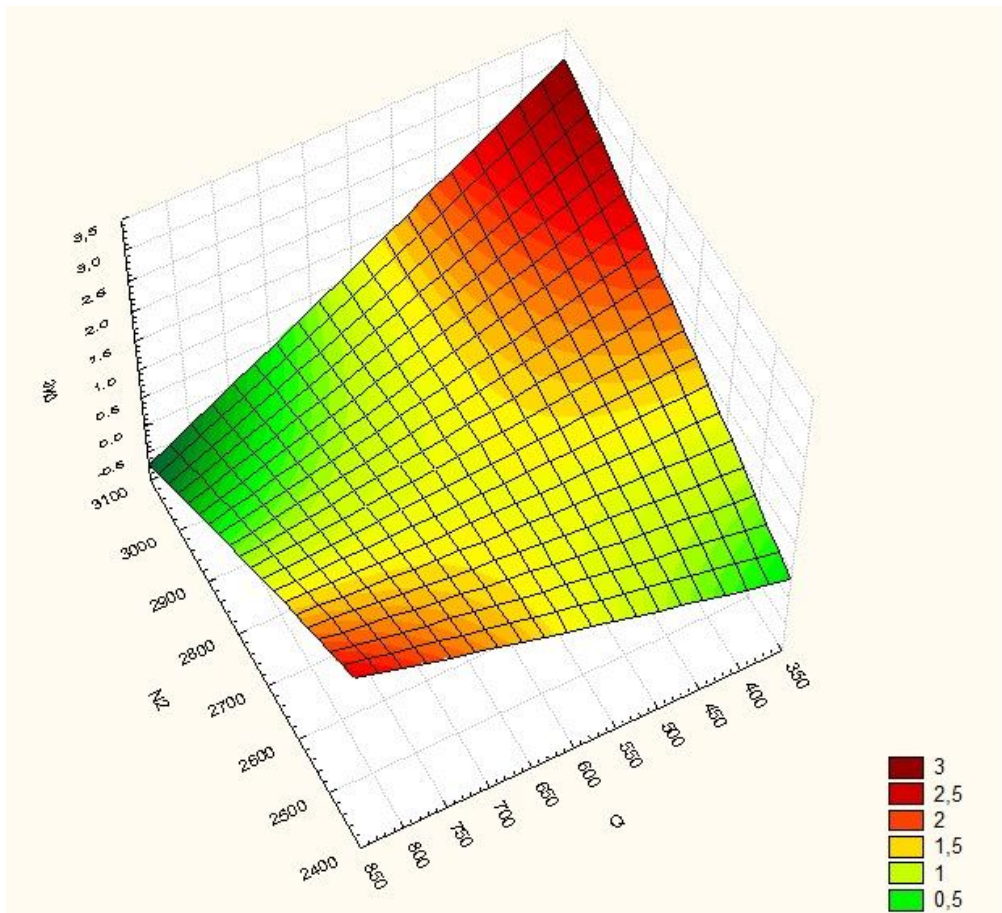


Рисунок 11 – Квадратичная зависимость энергии процесса измельчения зерна (Эиз) от оборотов второго диска (N2) и производительности (Q)

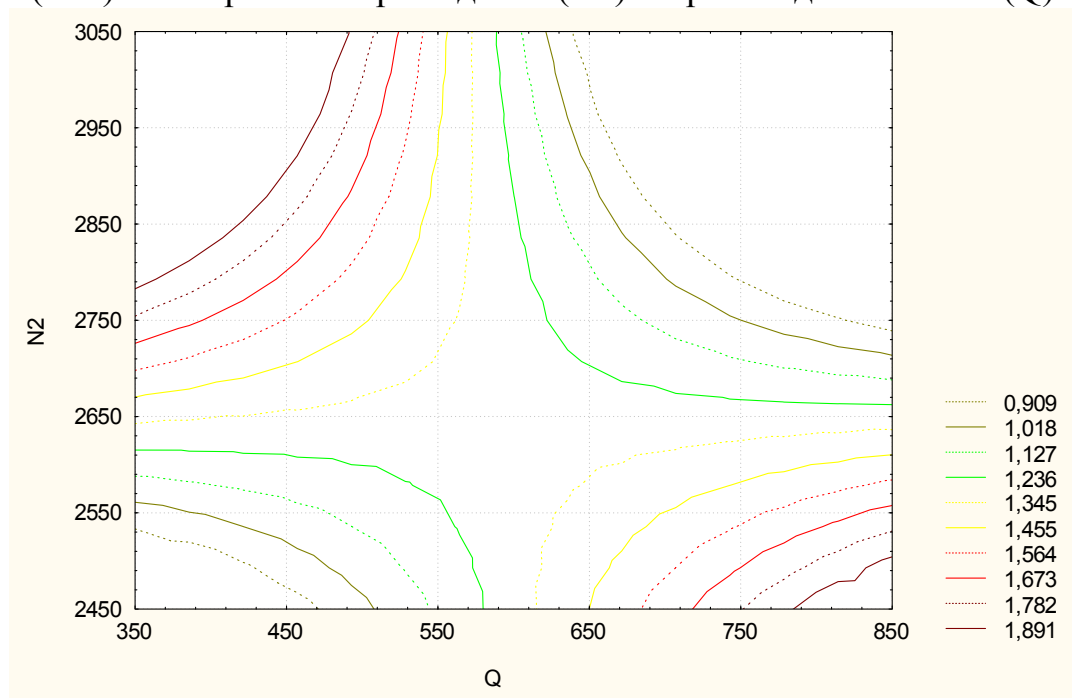


Рисунок 12 – Контурный график зависимости энергии процесса измельчения зерна (Эиз) от оборотов второго диска (N2) и производительности (Q)

**ПРИЛОЖЕНИЕ 6 – УРАВНЕНИЯ ПОШАГОВОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ  
ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ МОДУЛЬ ПОМОЛА ЗЕРНА  
(М).**

1.  $M = 2,197901123 - 0,000000342 * N1N2; R^2 = 0,50369441.$
2.  $M = 2,7981817862 - 0,0000008753 * N1N2 + 0,0000008749 * N1N1; R^2 = 0,6223.$
3.  $M = 2,97108734 - 0,000000867 * N1N2 + 0,000000862 * N1N1 - 0,00000049 * QQ;$   
 $R^2 = 0,70846204.$
4.  $M = 2,8534898773 - 0,0000008641 * N1N2 + 0,0000008569 * N1N1$   
 $- 0,0000008067 * QQ + 0,0000838688 * SQ; R^2 = 0,74386441.$
5.  $M = 2,82025292 - 0,000000811 * N1N2 + 0,00000077 * N1N1 - 0,000003210 * QQ +$   
 $+ 0,00073586 * SQ - 0,0441935275 * SS; R^2 = 0,81549653.$
6.  $M = 3,49105840 - 0,000000811 * N1N2 + 0,000000769 * N1N1 - 0,00000229 * QQ +$   
 $+ 0,0009819526 * SQ - 0,0602160992 * SS + 0,0022351754 * Q; R^2 = 0,82986364.$
7.  $M = 8,19483918 - 0,000000813 * N1N2 + 0,000000773 * N1N1 - 0,00000226 * QQ +$   
 $+ 0,0026984127 * SQ - 0,0574611620 * SS - 0,0099929634 * Q - 1,0551538661 * S;$   
 $R^2 = 0,83685166.$



**ПРИЛОЖЕНИЕ 7 – КВАДРАТИЧНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ И КОНТУР-  
НЫЕ ГРАФИКИ МОДУЛЯ ПОМОЛА (M) ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕ-  
НИЯ ЗЕРНА ОТ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ**

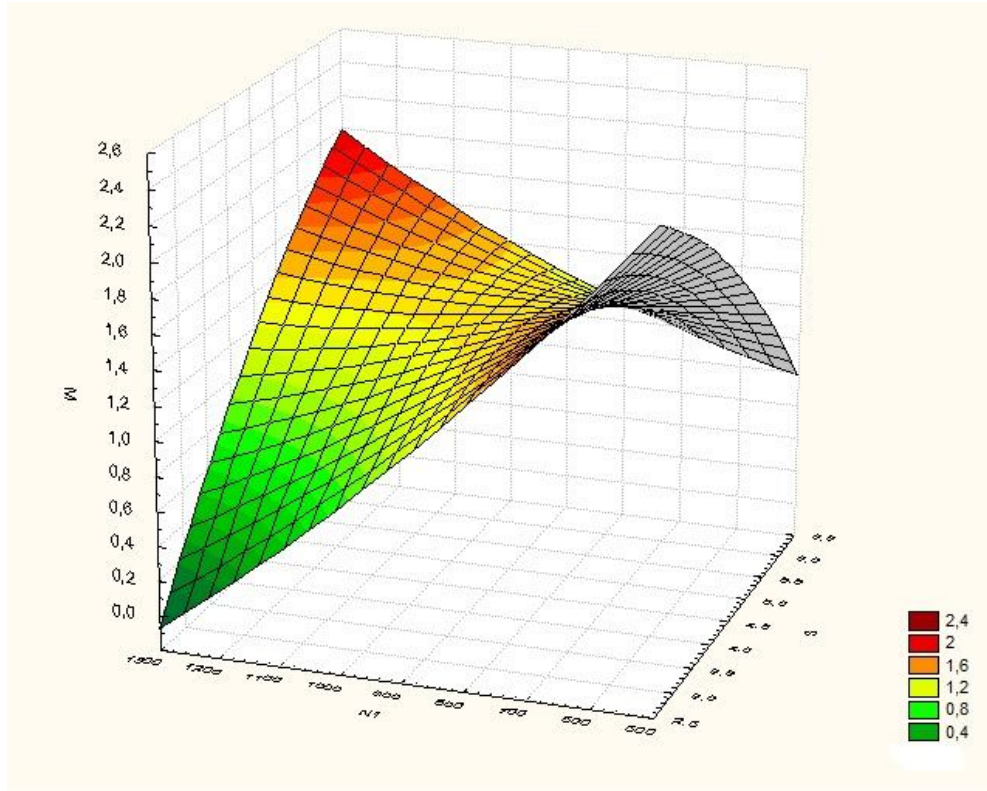


Рисунок 1 – Квадратичная зависимость модуля помола (M) процесса измельчения зерна от зазора (S) и оборотов первого диска (N1)

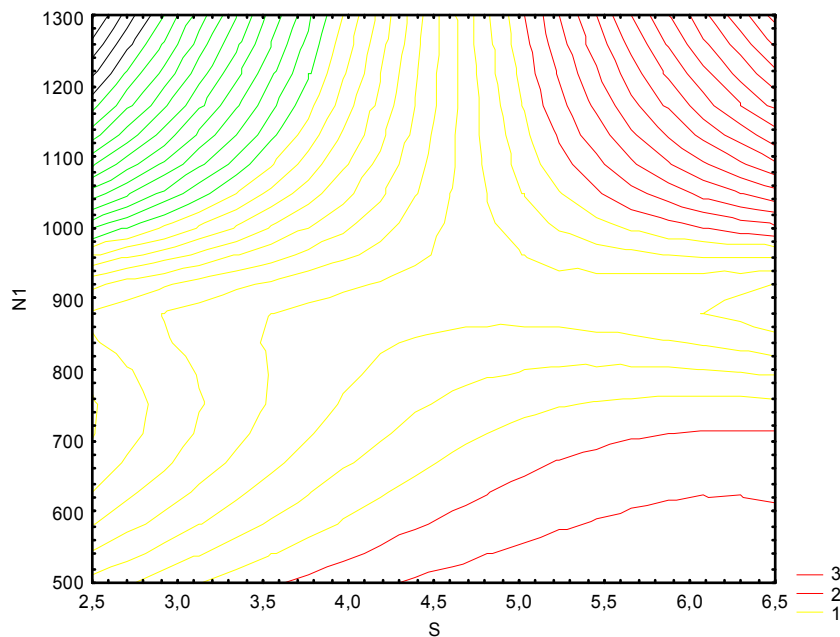


Рисунок 2 – Контурный график зависимости модуля помола (M) процесса измельчения зерна от зазора (S) и оборотов первого диска (N1)

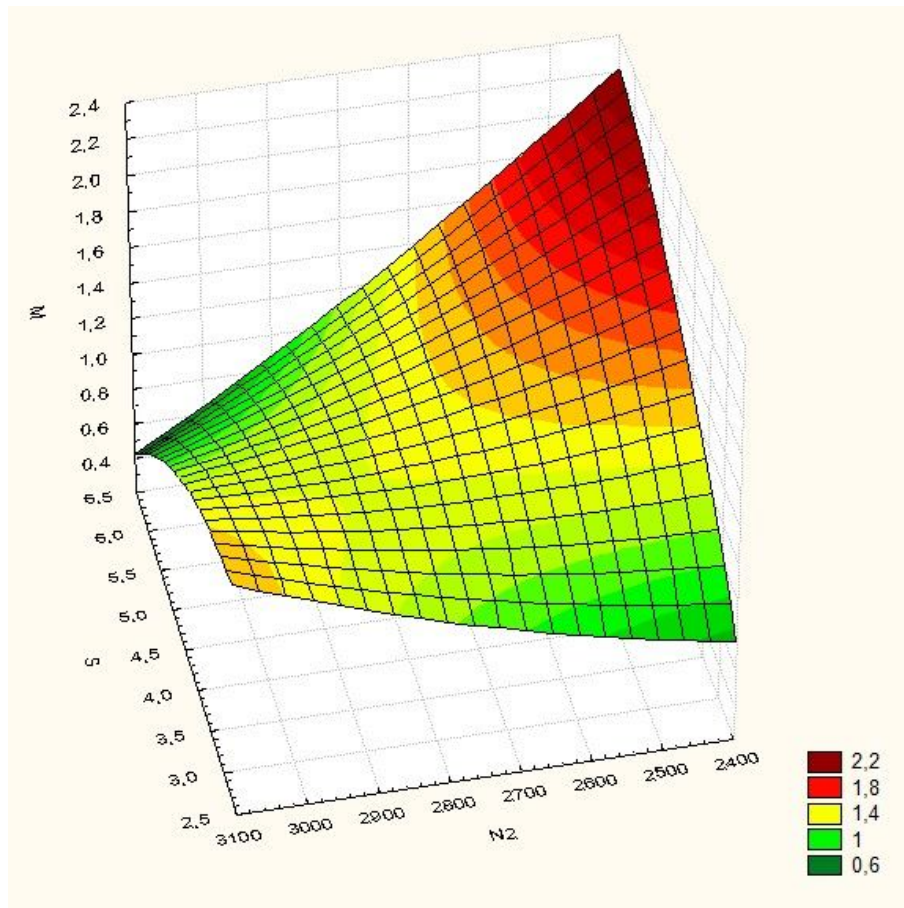


Рисунок 3 – Квадратичная зависимость модуля помола (M) процесса измельчения зерна от зазора (S) и оборотов второго диска (N2)

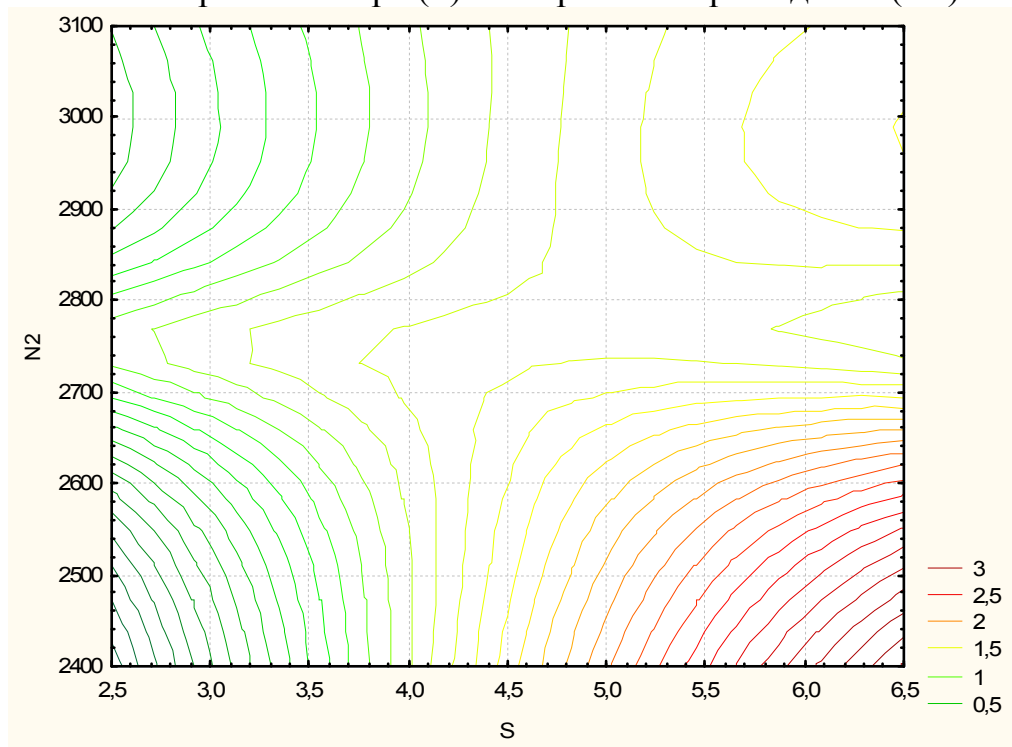


Рисунок 4 – Контурный график зависимости модуля помола (M) процесса измельчения зерна от зазора (S) и оборотов второго диска (N2)

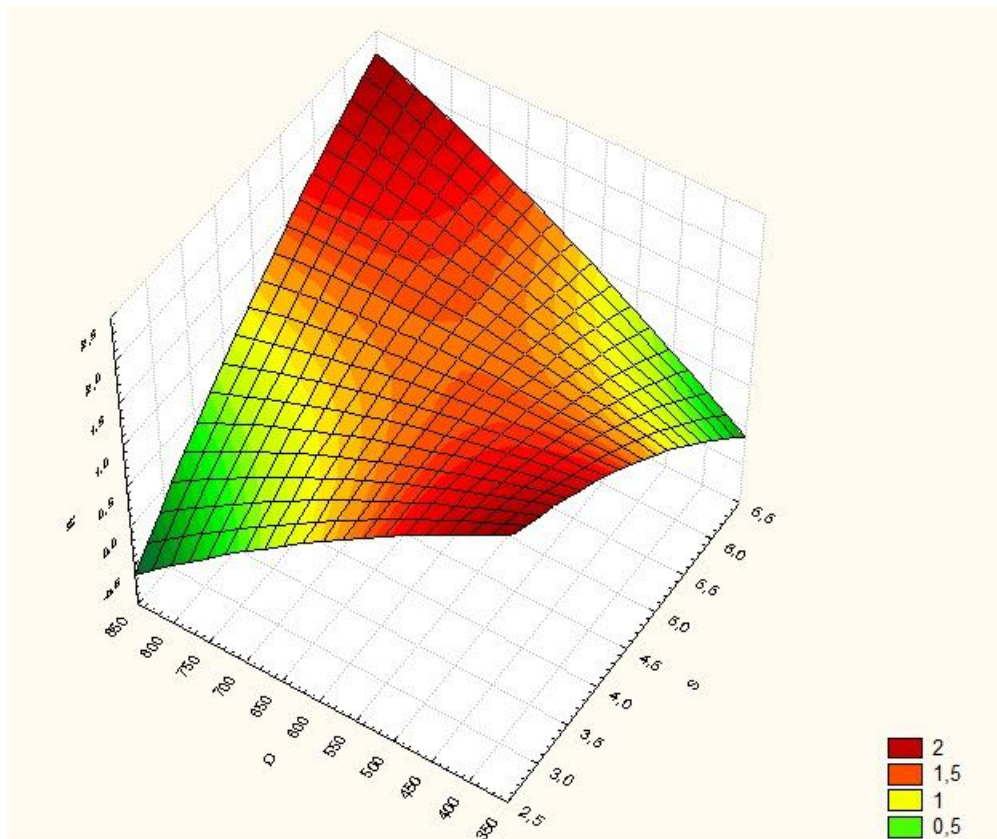


Рисунок 5 – Квадратичная зависимость модуля помола (M) процесса измельчения зерна от зазора (S) и производительности (Q)

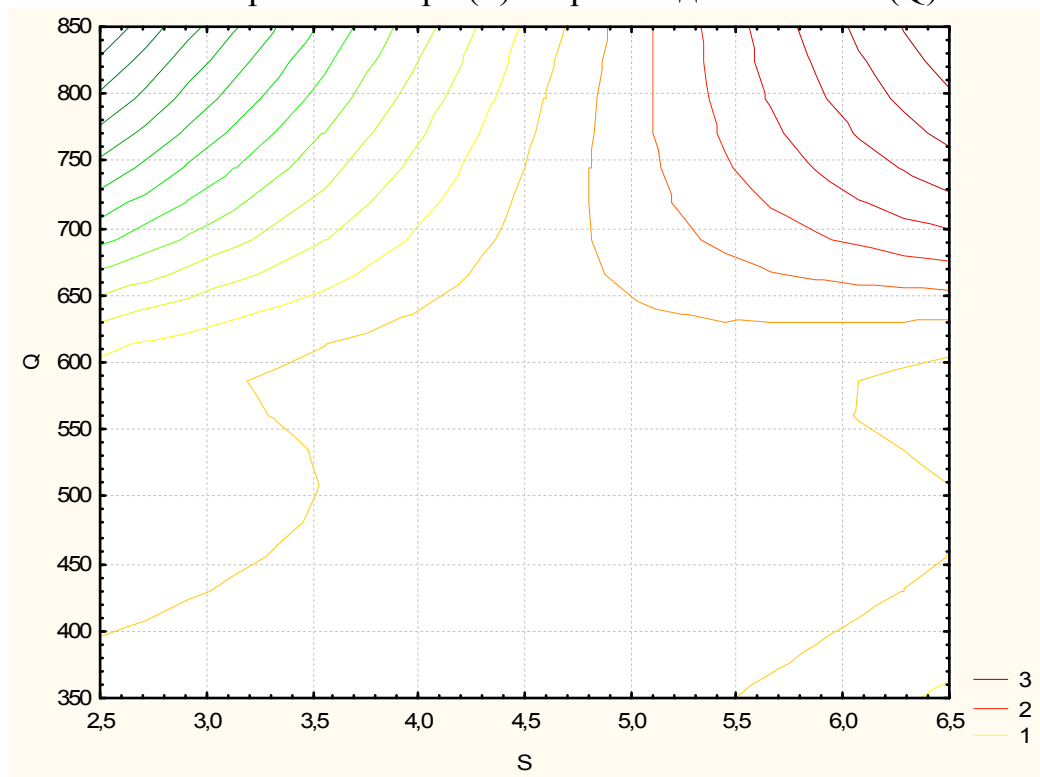


Рисунок 6 – Контурный график зависимости модуля помола (M) процесса измельчения зерна от зазора (S) и производительности (Q)

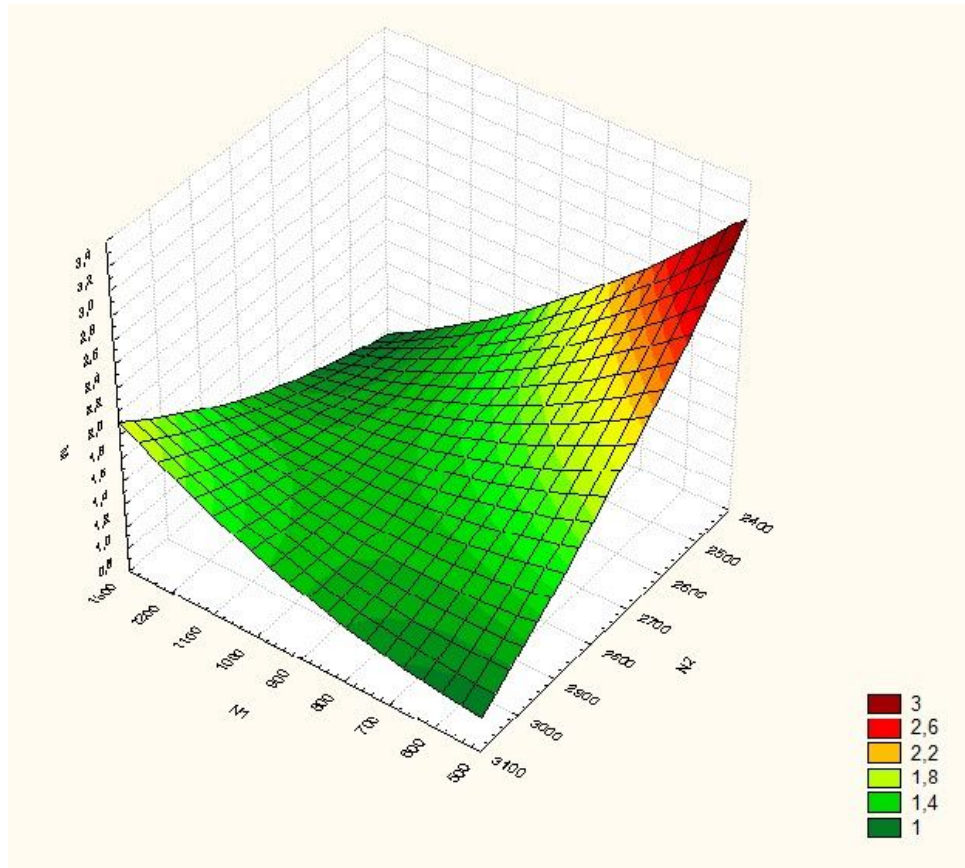


Рисунок 7 – Квадратичная зависимость модуля помола (M) процесса измельчения зерна от оборотов первого диска (N1) и оборотов второго диска (N2)

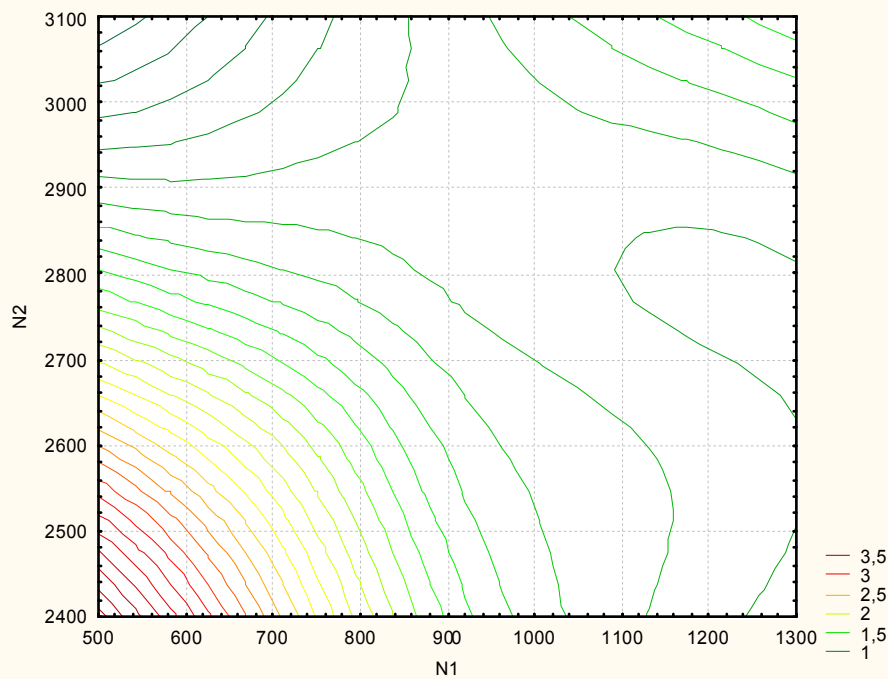


Рисунок 8 – Контурный график зависимости модуля помола (M) процесса измельчения зерна от оборотов первого диска (N1) и оборотов второго диска (N2)

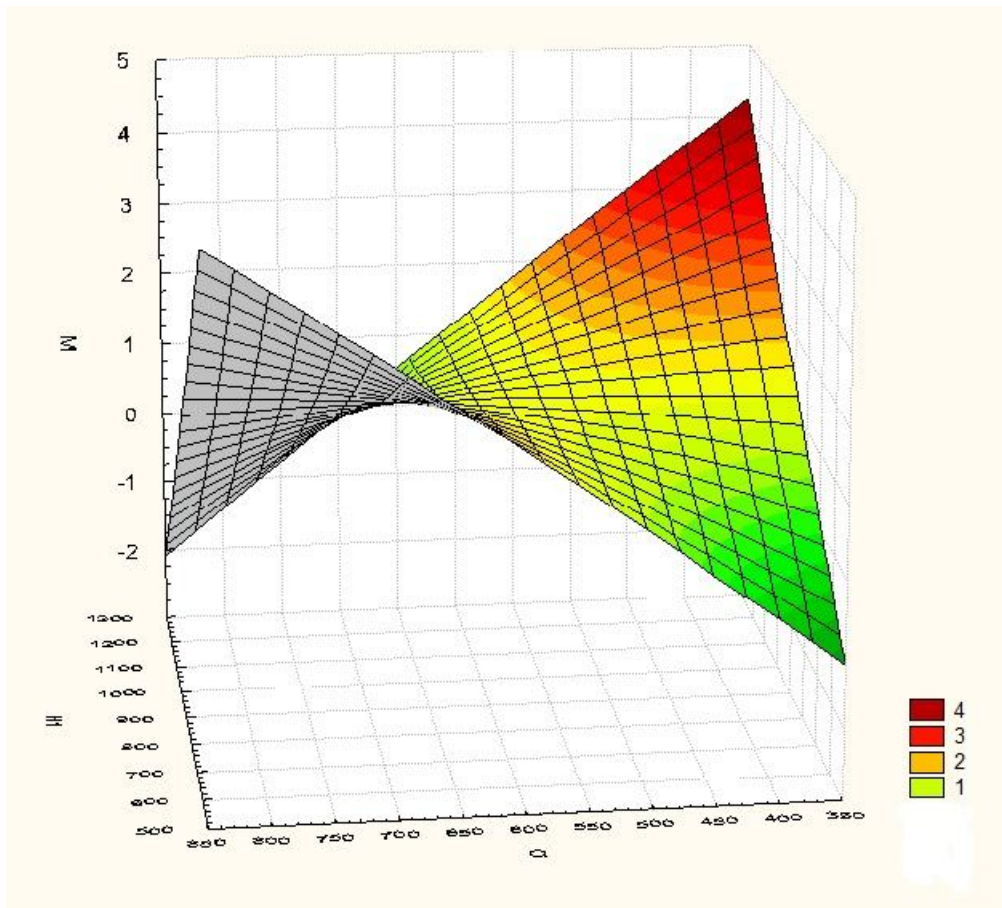


Рисунок 9 – Квадратичная зависимость модуля помола (M) процесса измельчения зерна от оборотов первого диска (N1) и производительности (Q)

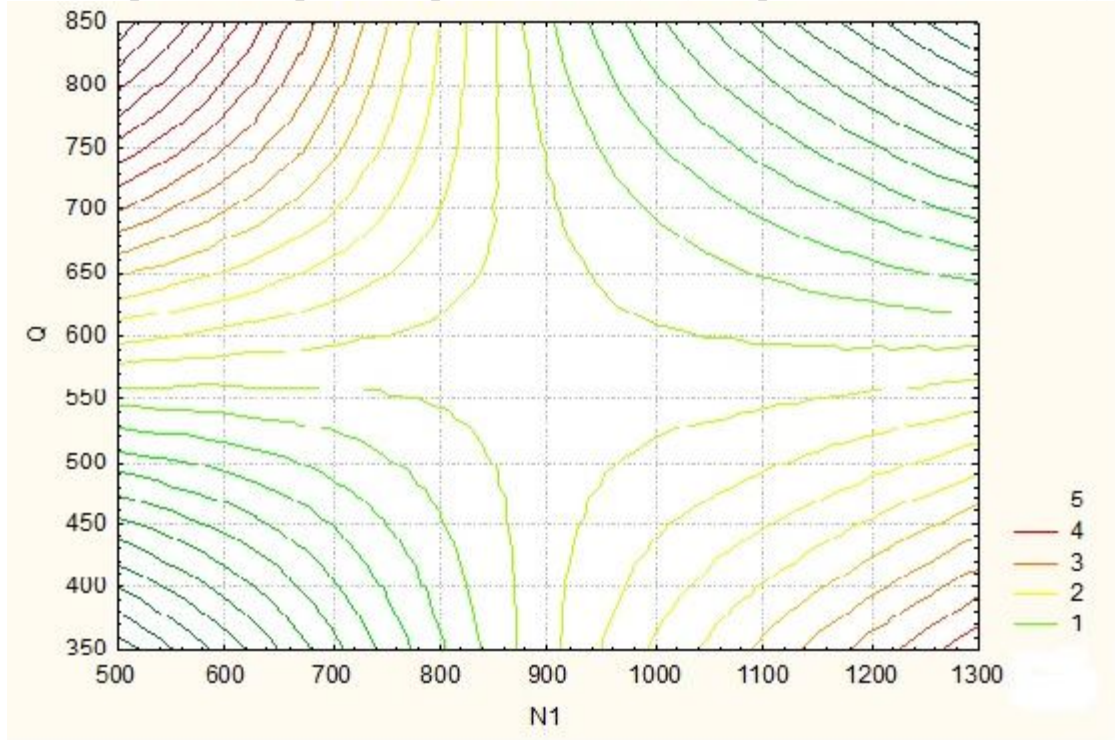


Рисунок 10 – Контурный график зависимости модуля помола (M) процесса измельчения зерна от оборотов первого диска (N1) и производительности (Q)

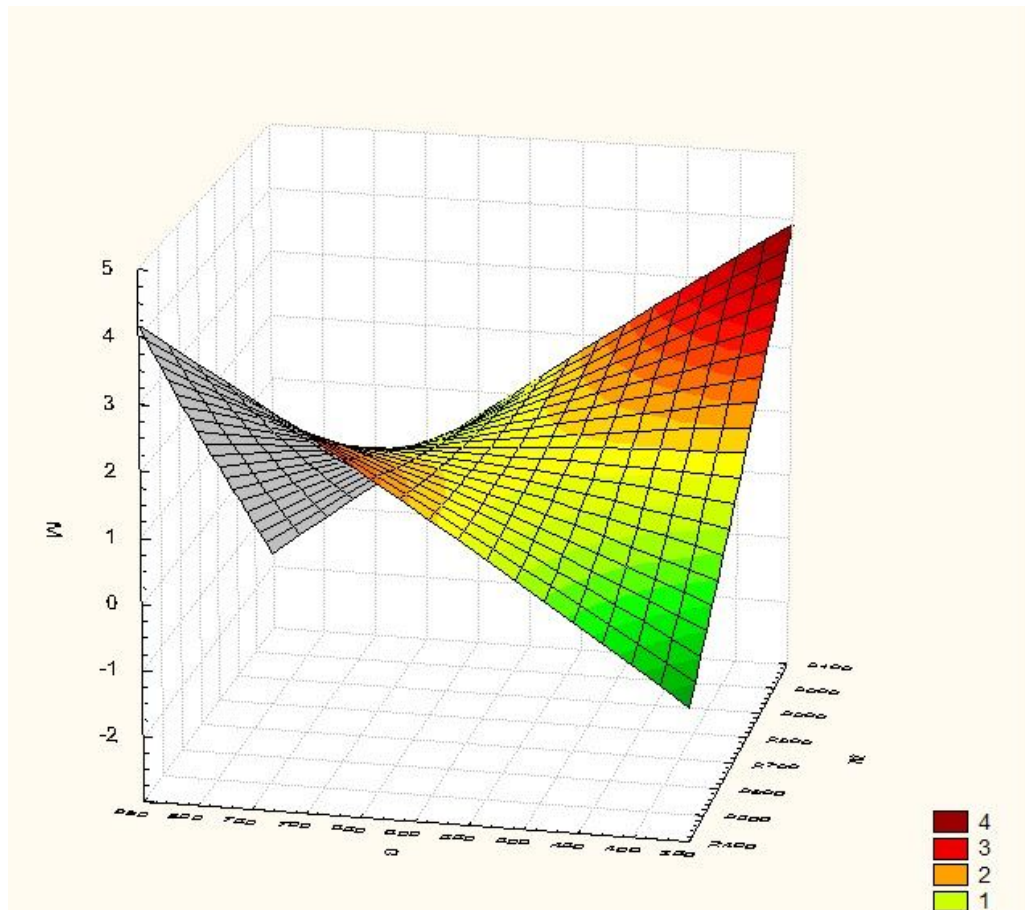


Рисунок 11 – Квадратичная зависимость модуля помола ( $M$ ) процесса измельчения зерна от оборотов второго диска ( $N_2$ ) и производительности ( $Q$ )

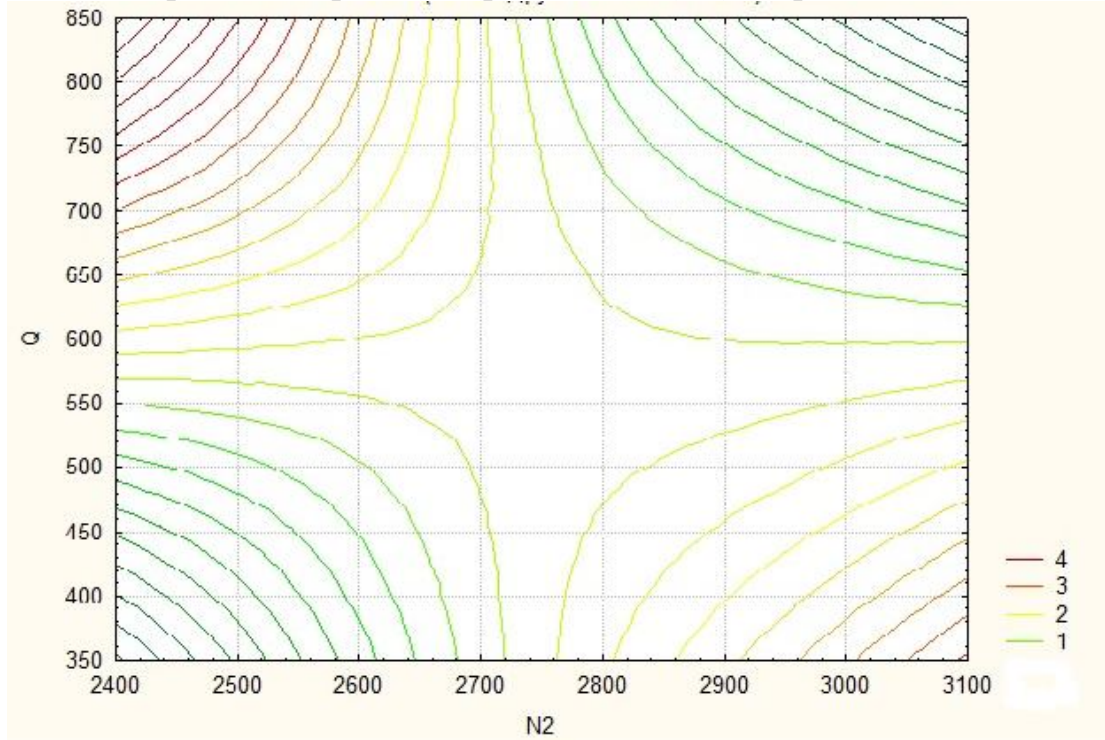


Рисунок 12 – Контурный график зависимости модуля помола ( $M$ ) процесса измельчения зерна от оборотов второго диска ( $N_2$ ) и производительности ( $Q$ )

**ПРИЛОЖЕНИЕ 8 – УРАВНЕНИЯ ПОШАГОВОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ  
ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ СТЕПЕНЬ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ  
ЗЕРНА ( $\lambda$ ).**

1.  $\lambda = 1,3267352243 + 0,0000007352 * N1N2; R^2 = 0,46341191.$
2.  $\lambda = 0,3648226498 + 0,0000007050 * N1N2 + 0,0000006284 * N1Q; R^2 = 0,613.$
3.  $\lambda = 0,4446482372 + 0,0000006886 * N1N2 + 0,0000009758 * N2Q - 0,000226 * SQ;$   
 $R^2 = 0,66716488.$
4.  $\lambda = -0,5074890065 + 0,0000006265 * N1N2 + 0,0000022956 * N2Q -$   
 $-0,0010888314 * SQ + 0,0610685667 * SS; R^2 = 0,73264592.$
5.  $\lambda = -0,1904097899 + 0,0000006518 * N1N2 + 0,0000017588 * N2Q - 0,00245 * SQ +$   
 $+0,1506368317 * SS + 0,0000064324 * QQ; R^2 = 0,82070636.$

**ПРИЛОЖЕНИЕ 9 – КВАДРАТИЧНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ И КОНТУР-  
НЫЕ ГРАФИКИ СТЕПЕНИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА ( $\lambda$ ) ОТ РАЗЛИЧ-  
НЫХ ПАРАМЕТРОВ**

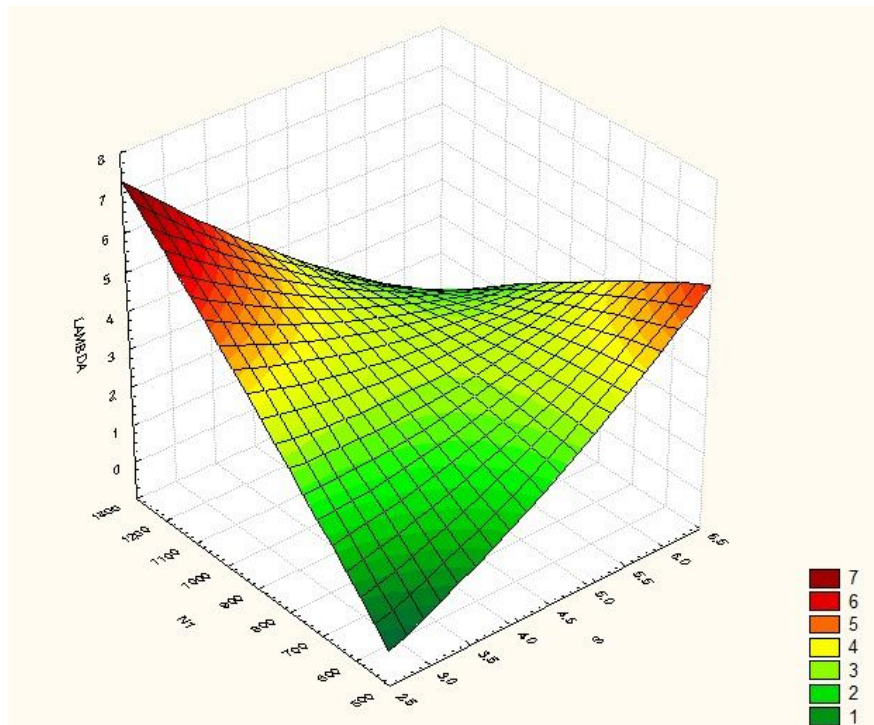


Рисунок 1 – Квадратичная зависимость степени измельчения зерна ( $\lambda$ ) от зазора ( $S$ ) и оборотов первого диска ( $N1$ )

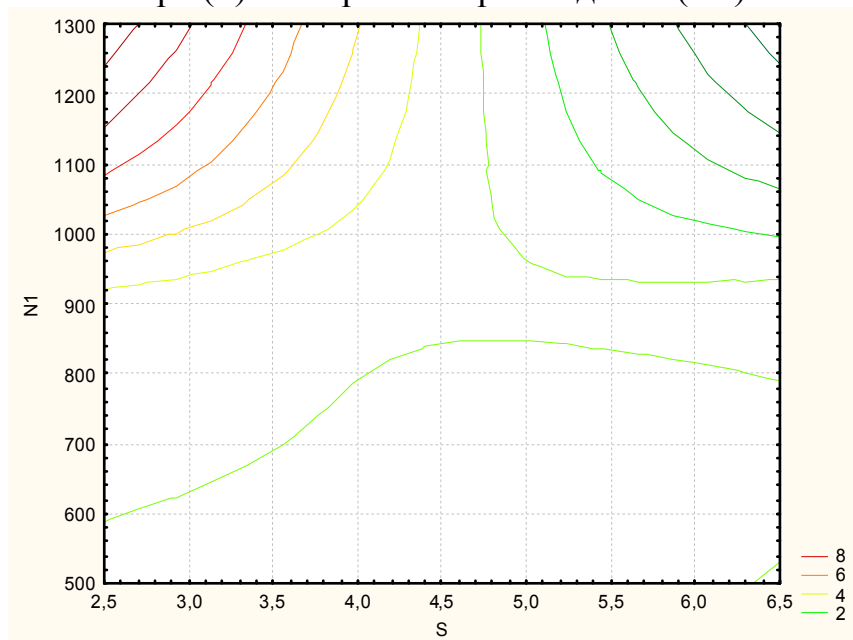


Рисунок 2 – Контурный график зависимости степени измельчения зерна ( $\lambda$ ) от зазора ( $S$ ) и оборотов первого диска ( $N1$ )



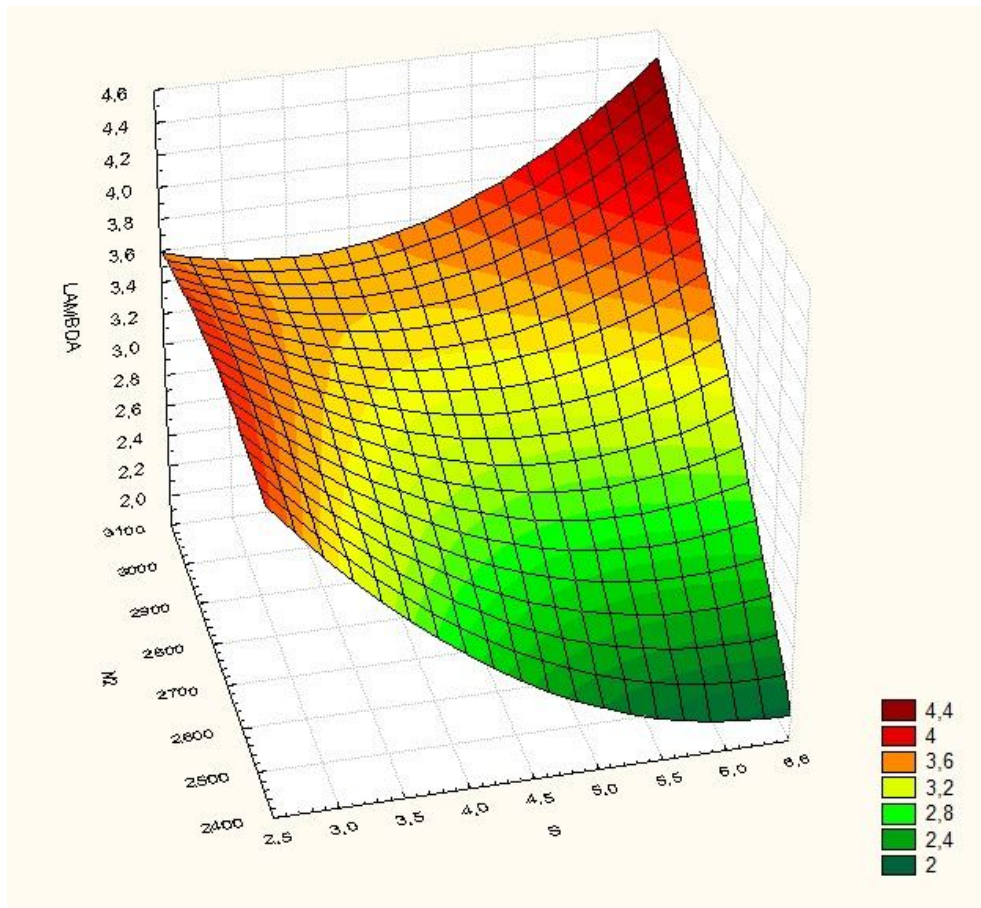


Рисунок 3 – Квадратичная зависимость степени измельчения зерна ( $\lambda$ ) от зазора ( $S$ ) и оборотов второго диска ( $N_2$ )

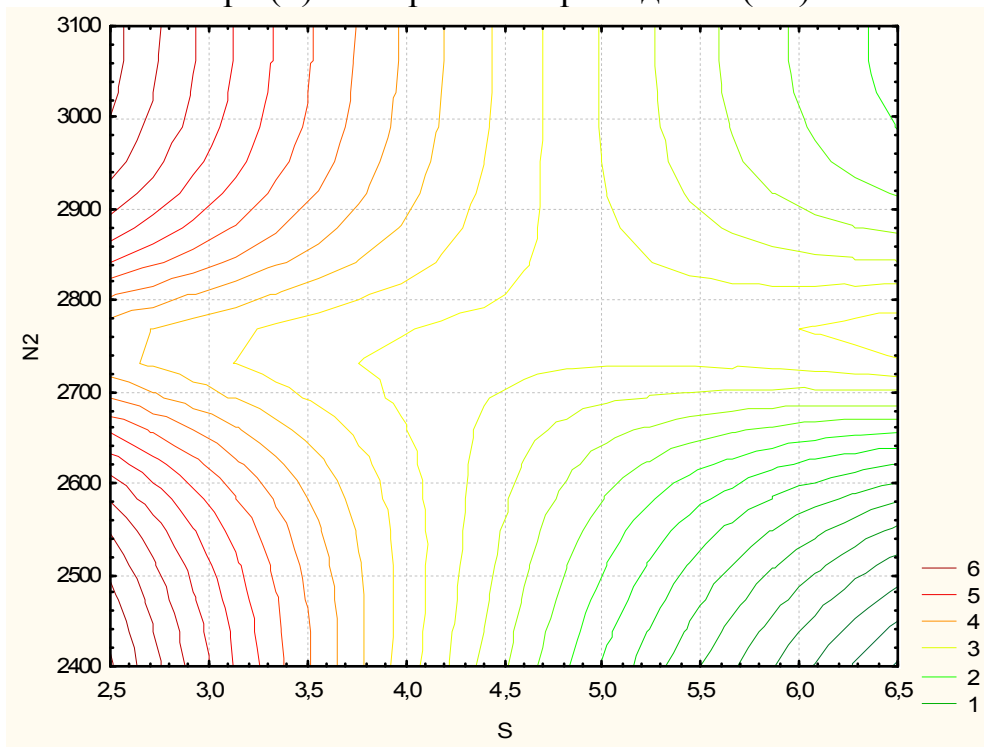


Рисунок 4 – Контурный график зависимости степени измельчения зерна ( $\lambda$ ) от зазора ( $S$ ) и оборотов второго диска ( $N_2$ )

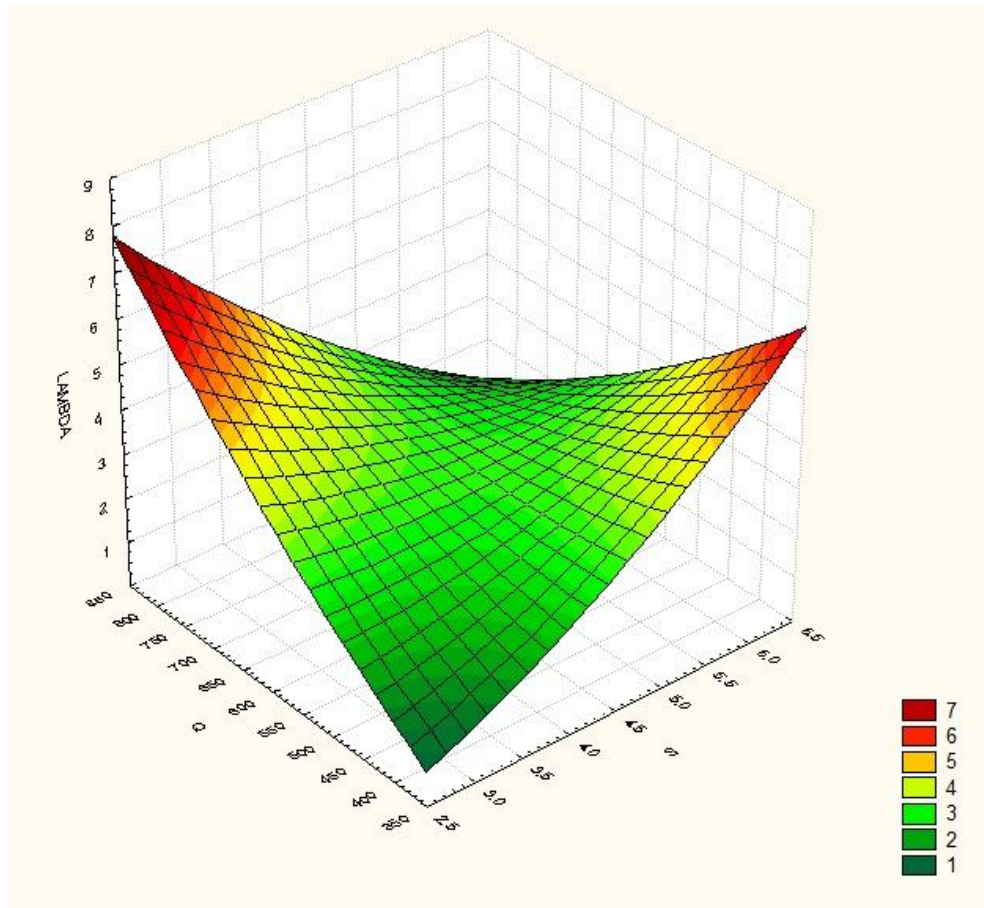


Рисунок 5 – Квадратичная зависимость степени измельчения зерна ( $\lambda$ ) от зазора ( $S$ ) и производительности ( $Q$ )

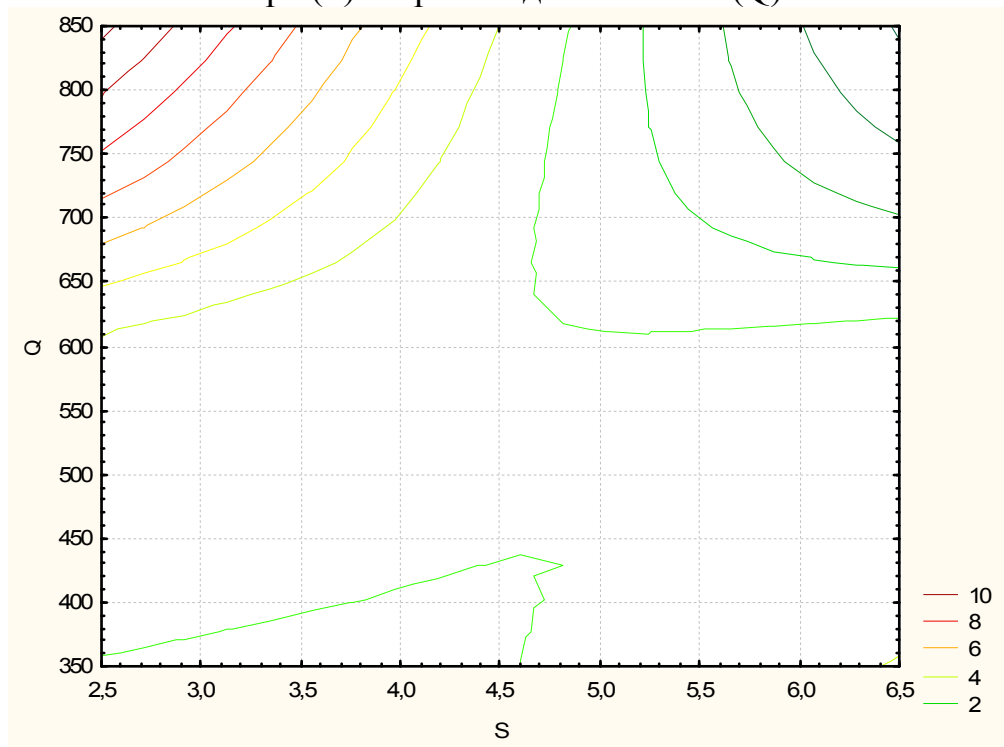


Рисунок 6 – Контурный график зависимости степени измельчения зерна ( $\lambda$ ) от зазора ( $S$ ) и производительности ( $Q$ )

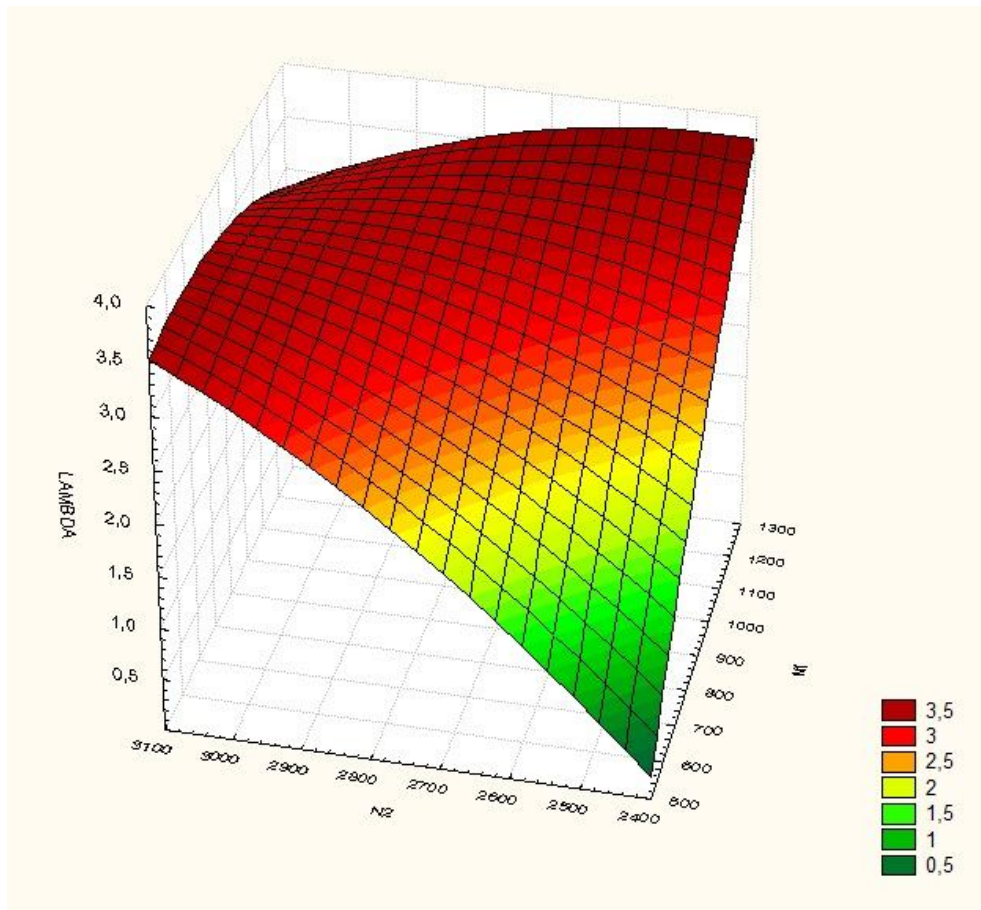


Рисунок 7 – Квадратичная зависимость степени измельчения зерна ( $\lambda$ ) от оборотов первого диска ( $N_1$ ) и оборотов второго диска ( $N_2$ )

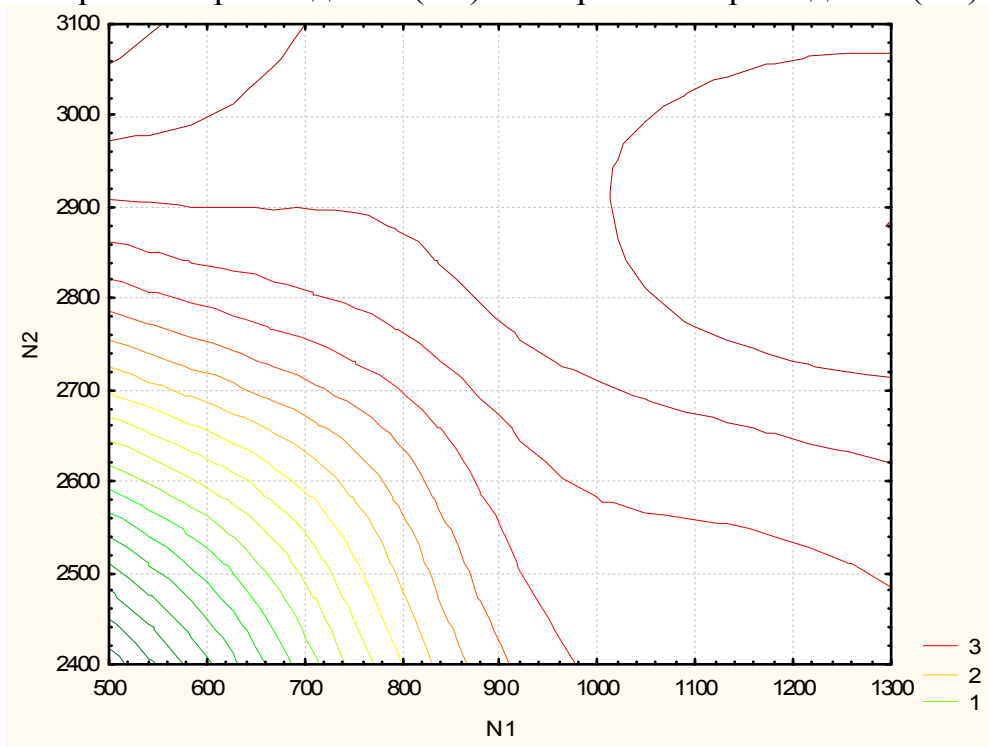


Рисунок 8 – Контурный график зависимости степени измельчения зерна ( $\lambda$ ) от оборотов первого диска ( $N_1$ ) и оборотов второго диска ( $N_2$ )

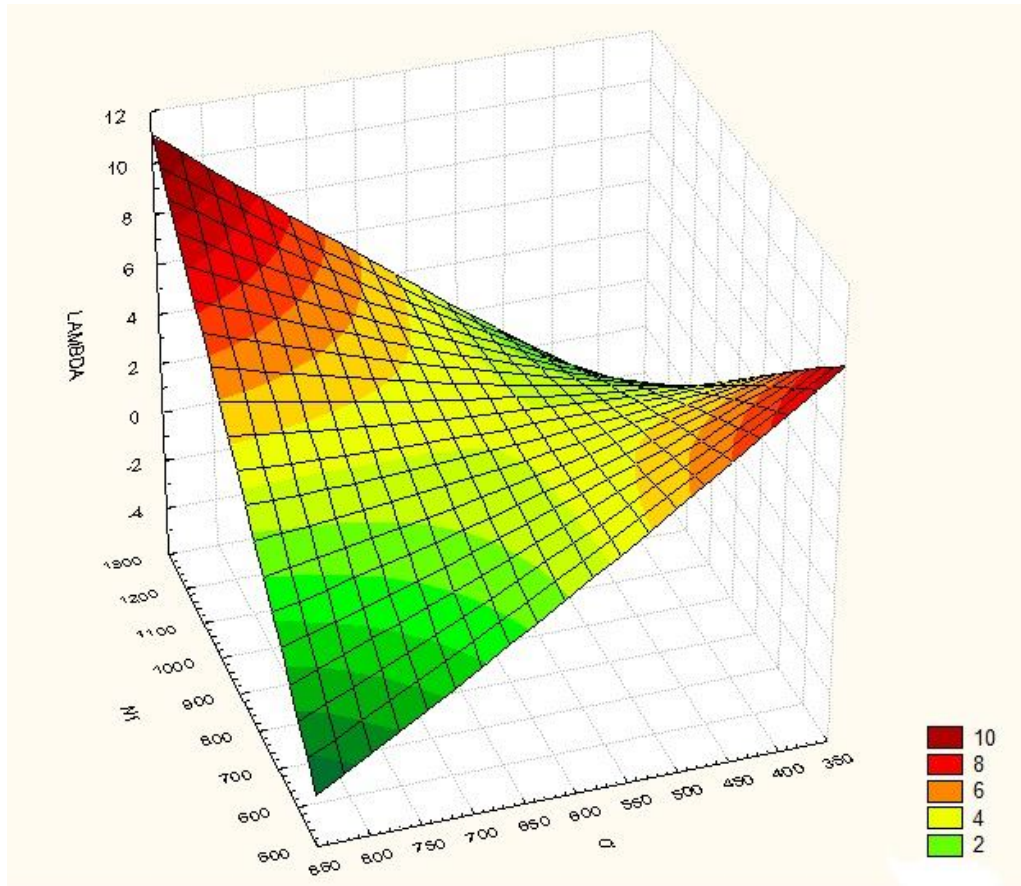


Рисунок 9 – Квадратичная зависимость степени измельчения зерна ( $\lambda$ ) от оборотов первого диска ( $N1$ ) и производительности ( $Q$ )

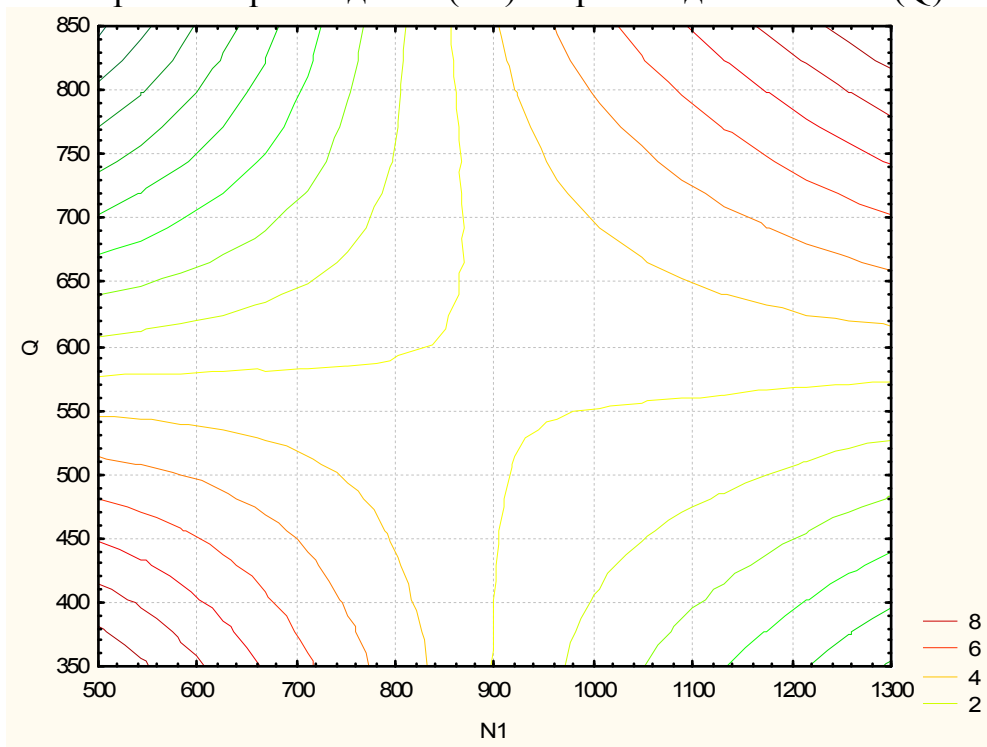


Рисунок 10 – Контурный график зависимости степени измельчения зерна ( $\lambda$ ) от оборотов первого диска ( $N1$ ) и производительности ( $Q$ )

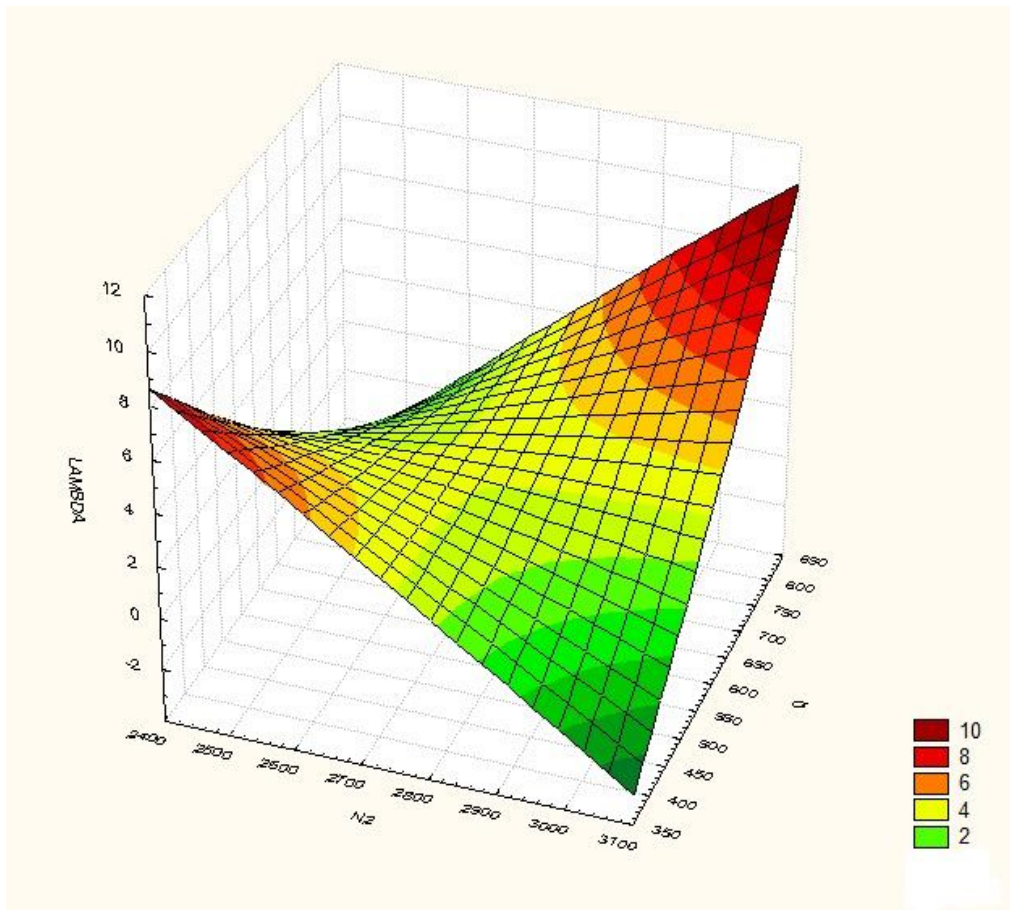


Рисунок 11 – Квадратичная зависимость степени измельчения зерна ( $\lambda$ ) от оборотов второго диска ( $N_2$ ) и производительности ( $Q$ )

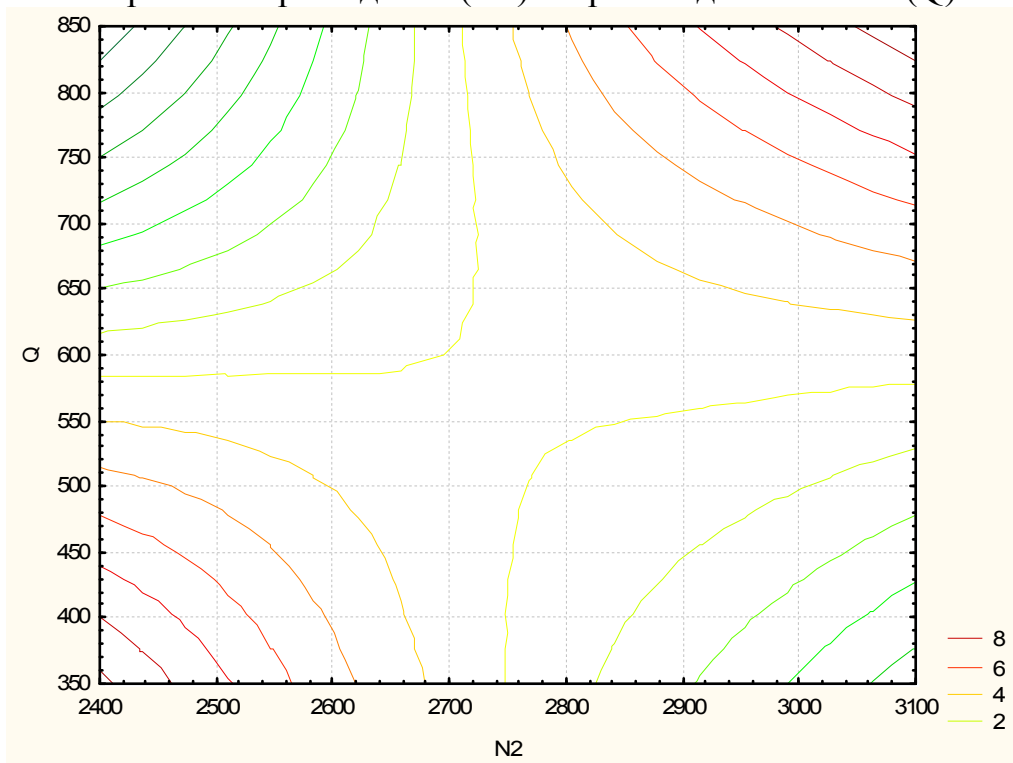


Рисунок 12 – Контурный график зависимости степени измельчения зерна ( $\lambda$ ) от оборотов второго диска ( $N_2$ ) и производительности ( $Q$ )

**ПРИЛОЖЕНИЕ 10 – ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ  
ДВУХМЕРНЫХ ГРАФИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ**

<i>Ауд от N1</i>		<i>Ауд от N2</i>		<i>Ауд от M</i>		<i>Эиз от S</i>		<i>Эиз от M</i>	
<i>N1</i>	<i>Ауд</i>	<i>N2</i>	<i>Ауд</i>	<i>Ауд</i>	<i>M</i>	<i>Эиз</i>	<i>S</i>	<i>Эиз</i>	<i>M</i>
600	3,353	2500	2,763	4,63	0,5	1,54	3	1,55	0,5
700	3,555	2600	3,059	4,33	0,85	1,45	3,5	1,47	0,85
800	3,712	2700	3,275	4,03	1,18	1,34	4	1,39	1,18
900	3,825	2800	3,411	3,75	1,49	1,23	4,5	1,315	1,49
1000	3,893	2900	3,467	3,2	1,85	1,12	5	1,22	1,85
1100	3,925	3000	3,475	2,61	2,02	0,99	5,5	1,18	2,02
1200	3,95					0,87	6	1,12	2,24

<i>Ауд от Q</i>				<i>Ауд от S</i>			
	<i>S=3 мм</i>	<i>S=4 мм</i>	<i>S=5 мм</i>		<i>Q=600 кг/ч</i>	<i>Q=700 кг/ч</i>	<i>Q=800 кг/ч</i>
<i>Q</i>	<i>Ауд</i>	<i>Ауд</i>	<i>Ауд</i>	<i>S</i>	<i>Ауд</i>	<i>Ауд</i>	<i>Ауд</i>
600	4,513	4,203	3,825	3	4,513	4,379	4,297
650	4,439	4,049	3,591	3,5	4,366	4,152	3,991
700	4,379	3,909	3,371	4	4,203	3,909	3,668
750	4,331	3,781	3,164	4,5	4,022	3,648	3,327
800	4,297	3,668	2,97	5	3,825	3,371	2,97

<i>M от Q</i>				<i>M от S</i>			
	<i>N1=600 мин<sup>-1</sup></i>	<i>N1=900 мин<sup>-1</sup></i>	<i>N1=1200 мин<sup>-1</sup></i>		<i>N1=600 мин<sup>-1</sup></i>	<i>N1=900 мин<sup>-1</sup></i>	<i>N1=1200 мин<sup>-1</sup></i>
<i>Q</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>S</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>M</i>
400	1,49	1,167	0,983	3	1,495	1,172	0,988
450	1,558	1,235	1,051	3,5	1,59	1,267	1,083
500	1,615	1,292	1,108	4	1,656	1,334	1,15
550	1,66	1,337	1,153	4,5	1,694	1,371	1,188
600	1,694	1,371	1,188	5	1,708	1,388	1,22
650	1,717	1,394	1,21	5,5	1,714	1,395	1,23
700	1,728	1,406	1,222	6	1,718	1,4	1,23
750	1,733	1,412	1,228				
800	1,74	1,417	1,235				

<b>Сравнение молотковой дробилки Ф-1М с УЦИ</b>			
<b>Ф-1М</b>		<b>УЦИ</b>	
<i>Ауд, кВт*ч/т</i>	<i>М</i>	<i>Ауд, кВт*ч/т</i>	<i>М</i>
11,9	0,81	4,63	0,5
8,8	1,08	4,33	0,85
6,8	1,32	4,03	1,18
5,7	1,57	3,75	1,49
5,1	1,76	3,2	1,85
		2,61	2,02

<b>Ауд от Q при различных Z</b>			
	<i>Z=6 мм</i>	<i>Z=12 мм</i>	<i>Z=24 мм</i>
<i>Q</i>	<i>Ауд, кВт*ч/т</i>	<i>Ауд, кВт*ч/т</i>	<i>Ауд, кВт*ч/т</i>
400	3,9	4,25	4,65
450	3,715	4,095	4,505
500	3,55	3,95	4,38
550	3,385	3,805	4,255
600	3,22	3,66	4,13
650	3,055	3,515	4,005
700	2,89	3,37	3,88
750	2,725	3,225	3,755
800	2,6	3,1	3,67

# ПРИЛОЖЕНИЕ 11 – АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО – ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ В КФХ ИП «СМОЛЯКОВ Г.А.»

**УТВЕРЖДАЮ**

Глава КФХ ИП «Смоляков Г.А.»  
Хохольского района Воронежской  
области



Г.А. Смоляков

«14» июня 2013 г.

**УТВЕРЖДАЮ**

Ректор Воронежского государственного  
агроуниверситета им. императора  
Петра I, профессор



В.И. Котарев

«  »    20   г.

**АКТ**

о внедрении результатов научно-исследовательской работы

Комиссия в составе главы КФХ Г.А. Смолякова, зам. главы С.Н. Галкина, зав. кафедрой МЖиПСХП ВГАУ д.т.н., профессора В.В. Труфанова и ассистента Р.А. Дружинина составила настоящий акт о проведении производственных испытаний ударно-центробежного измельчителя фуражного зерна.

Предприятие предоставило исходный материал для проведения опытов. В присутствии главы КФХ на экспериментальной установке было произведено измельчение исходного материала, имеющего следующие параметры: культура ячмень, засоренность сорняками находилась в пределах 1,5 %, влажность зерна составляла 13-15 %. Производительность экспериментальной установки составила 1100 кг/ч, удельная энергоемкость процесса измельчения 3-6 кВт\*ч/т. Также установлено, что в данной конструкции измельчителя, не изменяя конструктивных и кинематических параметров, можно ступенчато изменять степень измельчения материала от мелкого ( $M = 0,8$  мм) помола до крупного ( $M = 1,8$  мм).

Считаем целесообразным, рекомендовать предприятиям и хозяйствам применение ударно-центробежного измельчителя для измельчения фуражного зерна.

Глава КФХ ИП «Смоляков Г.А.»



Г.А. Смоляков

Зам. главы КФХ ИП «Смоляков Г.А.»

С.Н. Галкин

Заведующий кафедрой механизации  
животноводства и переработки сель-  
скохозяйственной продукции ВГАУ,  
доктор технических наук, профессор



В.В. Труфанов

Ассистент



Р.А. Дружинин



## ПРИЛОЖЕНИЕ 12 – СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе  
ФГБОУ ВПО

«Воронежский государственный аграрный  
университет имени императора Петра I»  
доктор сельскохозяйственных наук, профессор,  
Дедов Анатолий Владимирович

« 23 » сентября 2014 г.



### СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ

Отдельные результаты кандидатской диссертационной работы Дружинина Романа Александровича, ассистента кафедры «Механизация животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции» ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» на тему «Совершенствование рабочего процесса ударно-центробежного измельчителя», внедрены на кафедре «МЖиПс/хП» ФГБОУ ВПО Воронежского ГАУ в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 35.03.06 (110800.62) «Агроинженерия», 2-4 курсов в дисциплинах: «Техника и технологии в сельском хозяйстве», «Машины и оборудование в животноводстве», «Машины и технологии в животноводстве», «Основы расчета и конструирования машин для переработки зерна», «Технологическое оборудование для переработки продукции растениеводства», а также по по направлению 35.04.06 «Магистр техники и технологии», 2 курсов в дисциплину: «Инновационные направления в совершенствовании технологии и технических средств в животноводстве».

23.09.2014

И.о. заведующего кафедрой «Механизация  
животноводства и переработки  
сельскохозяйственной продукции»,  
кандидат технических наук, доцент

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор

Яровой Михаил Николаевич

Труфанов Виктор Васильевич