

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



ЧЕРЕПКОВ АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА  
С ОБОСНОВАНИЕМ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ

Специальность 05.20.01 - Технология и средства механизации  
сельского хозяйства

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Кандидат технических наук,  
доцент И. В. Коношин

Орёл - 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	11
1.1. Влияние физико-механических свойств зерна на процесс измельчения ..	11
1.2. Способы измельчения сыпучих кормов. ....	14
1.3. Устройство и обзор современных молотковых дробилок .....	16
1.4. Направления развития конструкций молотковых дробилок .....	30
1.5. Влияние решета на рабочий процесс .....	37
1.6. Влияние вентилятора на процесс измельчения .....	39
1.7. Выводы .....	40
2. ОБОСНОВАНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ.....	42
2.1. Обоснование необходимости совершенствования объекта исследования	42
2.2. Обоснование использования решет с прямоугольными отверстиями .....	43
2.3. Влияние прямоугольной формы отверстий на качество продукта .....	48
2.4. Влияние прямоугольной формы отверстия на изменение площади поверхности корма и энергоемкость измельчения .....	52
2.5. Влияние прямоугольной формы отверстия на энергоемкость пневмотранспортирования .....	54
2.6. Описание конструкции регулятора «живого» сечения .....	57
2.7. Выводы и предложения по разделу.....	59
3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	60
3.1. Программа экспериментальных исследований.....	60

3.2. Приборы, устройства и оборудование для исследования рабочего процесса дробилки .....	60
3.3. Экспериментальная установка для исследования процесса измельчения зерна .....	63
3.4. Определение основных показателей работы экспериментальной установки.....	66
3.5. Определение однородности гранулометрического состава. ....	70
3.6. Оценка влияния работы вентилятора на энергоемкость процесса .....	70
3.7. Методика проведения многофакторного эксперимента .....	71
3.8. Выбор параметров оптимизации .....	74
3.9. Статистическая оценка результатов эксперимента .....	76
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	81
4.1. Предварительные испытания регулятора «живого» сечения.....	81
4.2. Сравнение работы регулятора «живого» сечения и решет с круглыми отверстиями .....	84
4.2.1. Качественная оценка получаемого продукта .....	84
4.2.2. Оценка энергоемкости процесса.....	88
4.3. Зависимость параметров оптимизации от исследуемых факторов .....	92
4.4. Оптимизация конструктивно-режимных параметров дробилки.....	99
5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ .....	101
5.1. Методика оценки эффективности проекта.....	101
5.2. Сравнительная оценка с серийно выпускаемой молотковой дробилкой	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	105
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	107

ПРИЛОЖЕНИЯ .....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 - РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА .....	126
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 – РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПЛАНУ БОКСА- БЕНКЕНА.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 – РЕЗУЛЬТАТЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ РЕГУЛЯТОРА «ЖИВОГО» СЕЧЕНИЯ С ЯЧЕЙКОЙ 8x40 ММ.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 – РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕШЕТ С ОТВЕРСТИЯМИ КРУГЛОЙ ФОРМЫ .....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 - ФУНКЦИИ MS OFFICE EXCEL 2007 ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОШИБОЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ 6 - РЕЗУЛЬТАТ ПРОВЕРКИ ЭКСПЕРИМЕНТА НА ПОВТОРЯЕМОСТЬ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ В ПРОГРАММЕ STATISTICA 10 .....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ 7 - РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА В ПРОГРАММЕ STATISTICA 10 .....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ 8 – ГРАФИКИ СОГЛАСОВАНИЯ НАБЛЮДАЕМЫХ И ПРЕДСКАЗАННЫХ ЗНАЧЕНИЙ.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ 9 - ЛИСТИНГ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ В СРЕДЕ MATHCAD.....	150
ПРИЛОЖЕНИЕ 10 – АКТ О ПРОВЕДЕНИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ .....	151
ПРИЛОЖЕНИЕ 11 – СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС .....	152

## ВВЕДЕНИЕ

По данным ФАО, к 2050 году население планеты составит 9 млрд человек, а потребность в еде увеличится на 60% по сравнению с сегодняшним днем. Объем мирового производства мяса и рыбы увеличится в 2 раза. В связи с этим, по оценке экспертов, к 2020 году объём рынка комбикормов в России в натуральном выражении вырастет на 9 млн тонн, в стоимостном - на 280 млрд. руб. и составит 40 млн тонн [137].

Животноводство является одной из важнейших отраслей сельского хозяйства как в РФ, так и в других странах мира. Эта отрасль обеспечивает население продуктами питания животного происхождения, а также поставляет сырье во многие отрасли производства, такие как текстильная промышленность, пищевая и другие.

Потребность населения России в мясных продуктах за счет собственного производства обеспечивается только на 78,4 %, страна продолжает оставаться крупнейшим импортером мяса и мясной продукции [153]. Удельный вес России в мировом производстве мяса составляет около 2 % [44].

Поэтому одной из главных задач государственной программы развития сельского хозяйства на 2013-2020 годы является обеспечение продовольственной независимости страны в параметрах, заданных Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации [50]. В связи с этим планируется увеличить индекс производства продукции сельского хозяйства в хозяйствах всех категорий в 2020 г. к 2010 г. – на 142,8%, в том числе продукции растениеводства – на 165,6%, продукции животноводства – на 124,5% [42].

Затраты на кормление в структуре себестоимости продукции животноводства, по мнению экономистов, занимают 60...75% [120], поэтому производство кормов является важнейшей составляющей отрасли, и от их качества и себестоимости в полной мере зависит продовольственная безопасность страны.

В России, как и во многих странах мира, фуражное зерно является одним из важнейших компонентов в рационах сельскохозяйственных животных. Доля концентратов в общем кормовом балансе России составляет 29-32% [44]. При этом, как и в случае с любым другим кормом, значение имеет не только качество зерна, но и способ его подготовки перед скармливанием животным.

Правильность и качество приготовления кормов, в том числе и комбинированных, значительным образом сказывается на продуктивности животных, их здоровье, а в конечном итоге на качестве продукции животноводства. В связи с этим необходимо особое внимание уделять процессу подготовки зерна к скармливанию, а именно - его измельчению. Для этого в хозяйствах всех категорий широкое распространение получили молотковые дробилки. Благодаря своим преимуществам, а именно простой конструкции, малой металлоемкости, высокой энергонасыщенности, низкой стоимости [98], молотковые дробилки нашли широкое применение в горнорудной, цементной, кондитерской промышленности, а также во многих других отраслях народного хозяйства [64, 93].

Анализ исследований Р. Гийо, Л. А. Глебова, А. Р. Демидова, В. А. Денисова, С. В. Золотарева по динамическому и статическому нагружениям различных многокомпонентных структурно-неоднородных материалов показывает, что из всех способов разрушения наиболее эффективным для большинства является свободный удар. При этом получается продукт помола высокого качества с минимальными затратами энергии [17, 18, 19, 45, 46, 48, 68].

Возросшие требования к энергоэффективности, качеству, производительности невозможно удовлетворить без совершенствования конструктивно-режимных параметров измельчающих машин. Поэтому изменение рабочих органов, а также оптимизация процесса измельчения непременно скажется на качестве и себестоимости продукции.

Рассматривая вопрос измельчения зерна, следует отметить, что для загрузки и эвакуации измельченного продукта из дробильной камеры и последующей его транспортировки широко используются вентиляторы. Они позволяют отказаться

от дополнительных приспособлений и обеспечивают транспортировку продукта без попадания пыли в помещение [111].

Вентилятор монтируют на валу ротора, размещают между бункером-смесителем и дробилкой или же лопасти вентилятора интегрированы с дробильным ротором.

Таким образом, актуальным является вопрос совершенствования конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки, в том числе и алгоритма работы привода вентилятора.

**Степень разработанности темы.** Изучением процесса измельчения занимались как отечественные, так и зарубежные авторы. Среди них следует отметить труды Н. Е. Авдеева, В. Р. Алешкина, С. В. Денисова, А. Р. Демидова, Н. С. Дорофеева, С. В. Золотарева, С. В. Мельникова, В. А. Елисеева, П. А. Савиных, В. В. Спорыхина, В. В. Труфанова, А. А. Сундеева, И. В. Коношина, Н. Ф. Баранова; W. Kruger, E. Silver, A. Hendrix, Ф. Кик и др.

При анализе существующих конструкций молотковых дробилок, а также теоретической базы на основе литературных источников было выявлено, что проблемы, присущие молотковым дробилкам, а именно: повышенное содержание пылевидной фракции, неравномерность гранулометрического состава, высокая энергоемкость процесса, требуют дальнейшего анализа и решения.

**Целью исследования** данной работы является повышение эффективности процесса измельчения зерна за счет совершенствования конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки.

**Задачи исследования:**

- Предложить новые конструктивно-технические элементы молотковой дробилки;
- Получить аналитические зависимости влияния прямоугольной и круглой форм отверстий решета на качественные и энергетические показатели получаемого продукта;

- На основании экспериментальных данных получить зависимости влияния конструктивно-режимных параметров на качественные и энергетические показатели получаемого продукта;
- Оптимизировать работу молотковой дробилки с целью получения продукта заданного качества с минимальной удельной энергоемкостью;
- Рассчитать экономическую эффективность использования предложенного решения.

**Объектом исследования** является технологический процесс измельчения зерна в молотковой дробилке, а также ее основные конструктивные элементы.

**Предметом исследования** являются закономерности влияния основных конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки на эффективность процесса измельчения зерна.

**Научную новизну** диссертационной работы составляют:

- Новое техническое решение конструкции молотковой дробилки (патент на изобретение № 2520653 РФ);
- Аналитические зависимости влияния прямоугольной и круглой форм отверстий решета на приращение поверхности получаемого продукта, содержание пылевидной фракции и недоизмельченных частиц, энергоемкость измельчения и пневмотранспортирования;
- Уравнения регрессии влияния конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки с регулятором «живого» сечения на технологический процесс и качественные показатели полученного продукта;
- Рациональные конструктивно-режимные параметры работы молотковой дробилки, полученные для корма с заданными параметрами (модулем помола, содержанием пылевидной фракции и остатком на сите с диаметром отверстий 3 мм) и имеющим минимальную удельную энергоемкость.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в том, что теоретически и экспериментально обосновано использование регулятора «живого» сечения, выполненного в виде решет с отверстиями прямоугольной формы, а также

использование отдельного частотно-регулируемого привода вентилятора и ротора дробилки. Это позволит путем незначительного переоснащения существующих и проектируемых молотковых дробилок повысить их производительность, улучшить качество получаемого продукта, уменьшить удельные энергозатраты, что в конечном итоге снизит себестоимость получаемого продукта.

**Методология и методы исследования.** Теоретическая часть исследований выполнена с использованием методов и методик, применяемых в физике, математике, теоретической механике, теории машин и механизмов. Единицы измерения использовали в соответствии с международной системой СИ. Экспериментальная часть выполнялась с использованием теории планирования эксперимента. Полученные результаты обрабатывались методами математической статистики с использованием прикладных программ на ЭВМ.

**На защиту выносятся следующие положения:**

- конструктивно-технологическая схема молотковой дробилки, в конструкции которой использован регулятор «живого» сечения и частотно-регулируемый привод ротора дробилки и вентилятора;
- аналитические зависимости эффективности использования решета с отверстиями прямоугольной формы;
- результаты экспериментальных исследований влияния конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки на процесс измельчения зерна;
- результаты оптимизации конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки.

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач исследования, выборе методов и разработке методики проведения исследований, разработке и моделировании аналитических выражений на ЭВМ, разработке и реализации конструкции опытного стенда, проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации опытных данных, формулировке выводов и рекомендаций.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность теоретических и экспериментальных исследований подтверждена высокой степенью детерминации. Материалы и результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались в ходе проведения кафедральных и факультетских заседаний, а также на международных и всероссийских конференциях: «Международная научно-практическая конференция среди студентов, аспирантов и молодых ученых» г. Орел 2011 г., «Особенности технического оснащения современного сельскохозяйственного производства» г. Орел 2012 г., «Особенности технического и технологического оснащения современного сельскохозяйственного производства» г. Орел 2013 г., «Актуальные проблемы и достижения в сельскохозяйственных науках» г. Самара 2015 г., «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия» г. Новосибирск 2015 г.

По итогам проведения всероссийского конкурса НТТМ-2014 на ВВЦ г. Москва награжден медалью «За успехи в научно-техническом творчестве».

#### **Публикации:**

По теме работы написано и опубликовано 10 печатных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, получен 1 патент на изобретение РФ № 2520653 «МОЛОТКОВАЯ ДРОБИЛКА».

#### **Структура и объем диссертации:**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 172 источника, в том числе 14 на иностранном языке и 11 приложений. Работа содержит 152 страницы, 52 рисунка, 23 таблицы.

## 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.

### 1.1. Влияние физико-механических свойств зерна на процесс измельчения

В механической технологии приготовления кормов самым распространенным и важным процессом является измельчение, обусловленное требованиями физиологии кормления животных. Питательные вещества усваиваются организмом животного только в растворенном виде, а скорость обработки частиц корма желудочным соком прямо пропорциональна площади их поверхности. В результате измельчения корма образуется множество частиц с высокоразвитой поверхностью, что способствует ускорению процессов пищеварения и повышению усвояемости питательных веществ [98].

В кормопроизводстве используют зерновое сырье злаковых, бобовых и других сельскохозяйственных культур, обладающих различными физико-механическими свойствами, сильно варьируемыми в зависимости от сорто-видовой принадлежности.

Корма, как и некоторые другие материалы (древесина, пластики), представляют большую группу упруго-вязкопластических материалов, специфическими особенностями которых являются наличие структуры, резко выраженная анизотропия и значительная лабильность прочностных характеристик [62].

К физическим свойствам зерновых кормов относятся влажность, гранулометрический состав (размеры частиц и их форма), натура, плотность, температура. Механические свойства кормов сильно зависят от физических и включают коэффициенты внешнего и внутреннего трения, угол естественного откоса, сопротивление сжатию, резанию, разрушению ударом и др. [62].

В кормопроизводстве при измельчении большое значение имеют такие физико-механические свойства зерна как размеры, форма, строение, прочность. Зерно имеет неоднородную структуру. В его строение входят оболочка, эндосперм и за-

родыш. Причём в зависимости от культуры, сорта и других факторов анатомические части зерна имеют различные физико-механические свойства, которые заметно варьируются. Оболочки зерна, обладающие значительной вязкостью, при дроблении работают на разрыв, а эндосперм в силу сравнительной хрупкости - в основном на скалывание и сжатие [171].

Разрушающие напряжения оболочек в зависимости от влажности и сорта зерна составляют 9,5...31,5 МПа, а эндосперма - всего лишь 1,7...3,3 МПа. При измельчении зерна на удельный расход энергии влияют форма зерна, его влажность, наличие микротрещин, консистенция эндосперма, плёнчатость. Более высокой прочностью обладает стекловидный эндосперм, прочность полустекловидного и мучнистого ниже. Зерна округлой формы имеют более высокую прочность, чем зерна ребристой [105]. В таблице 1.1 представлены основные физико-механические свойства зерновых культур [62].

Таблица 1.1 - Физико-механические свойства зерновых культур

Параметр	Культура						
	Пшеница	Рожь	Овес	Ячмень	Кукуруза	Горох	Просо
Длина, мм	4,8-8,0	5,0-10,0	8,0-18,6	7,0-14,6	5,5-13,5	4,0-8,8	1,8-3,2
Ширина, мм	1,6-4,8	1,4-3,6	1,4-4,0	2,0-5,0	5,0-11,5	4,0-9,0	1,5-2,0
Толщина, мм	1,5-3,3	1,2-3,5	1,0-4,0	1,2-4,5	2,5-8,0	3,0-9,0	1,5-1,7
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,2-1,5	1,2-1,5	1,2-1,4	1,2-1,4	1,35	1,4	1,1-1,2
Масса 1000 зерен, г	20-40	13-32	20-42	31-51	286	135	7
Нагура, кг/л	0,76	0,73	0,45	0,65	0,73	0,83	0,85
К-т внутреннего трения	0,47	0,49	0,51	0,51	0,53	0,55	0,52
К-т трения по стали	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,34
Скорость удара начала разрушения зерна, м/с	43	45	56	70	20	-	-
Скорость удара полного разрушения зерна, м/с	115	92	105	130	60	-	-

- нет данных

Исследование характера разрушения зерновок пшеницы в зависимости от влажности показало, что при влажности в 12% зерно ведет себя как хрупкий материал - разрушается при незначительных пластических деформациях, а при влажности в 17% наблюдается развитие пластических деформаций [92].

Следует отметить, что наличие микротрещин способствует снижению механической прочности зерна. Мельчайшие трещины и изменения структуры зерна вызывают значительные местные концентрации напряжения, что приводит к преждевременному разрушению тела [161]. Практика размола дает много подтверждений этому положению. Зерно, сильно поврежденное клещом, который разрушает отдельные места, особенно в наиболее вязкой зародышевой части, перерабатывается с меньшей затратой энергии. Усилия на разрушение, в зависимости от степени повреждения зерна, уменьшаются на 15-20 %. Предварительное удаление зародыша из пшеницы также снижает величину усилий при разрушении на 10-30 %, в зависимости от сорта и вида деформаций. Это обстоятельство также учитывается при переработке кукурузы, у которой после удаления зародыша без нарушения формы зерна наблюдается резкое снижение удельного расхода энергии на измельчение. Для этой цели сконструированы специальные машины [89].

Повышенную прочность имеет мелкое зерно по сравнению с зерном более крупного гранулометрического состава. Если условный предел прочности зерна пшеницы крупной фракции равняется 7,5...8,5 МПа, то для зерна мелкой он повышается до 9,5...11,5 МПа [2]. По данным Мартыненко Я. Ф. прочность и расход энергии на измельчение зерна разных культур снижаются в следующем порядке: ячмень, овес, пшеница, просо, кукуруза [94].

В своей работе Наумов И. А. предложил использовать понятие «сопротивляемости зерна измельчению»  $\Pi$  (кДж/м<sup>2</sup>) [109]:

$$\Pi = \frac{A}{\Delta S}, \quad (1.1)$$

где  $A$  - работа разрушения (измельчения);

$\Delta S$  - вновь образованная поверхность материала при измельчении.

Следует отметить, что на качество размола также влияет микроструктура эндосперма. Форма крахмальных гранул ячменя близка к вытянутому эллипсоиду. В центре эндосперма гранулы расположены с промежутками, в периферийной - плотно упакованы в белковую матрицу. Эндосперм овса характеризуется рыхлой микроструктурой, гранулы слабо связаны с белковой матрицей. У мягкозерновой пшеницы выявляется непрочная связь крахмальных гранул с белковой матрицей, большинство гранул не имеет белковых прослоек. Для ржи и тритикале характерна микроструктура мягкозерновой пшеницы [62].

Обобщив данные, представленные выше, можно сделать вывод, что зерновое сырье обладает различными физико-механическими свойствами, которые очень сильно влияют на процесс измельчения, а неоднородность его структуры и сорто-видовая анизотропия способствуют получению дерти с различными характеристиками.

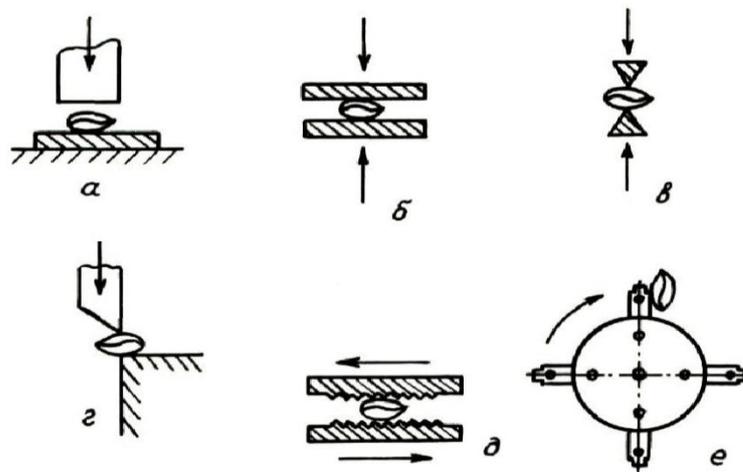
## **1.2. Способы измельчения сыпучих кормов.**

Как было отмечено, перед введением зерна в кормовую смесь его необходимо подготовить, чтобы оно как можно полно усвоилось организмом животного. Добиваясь лучшего усвоения, снижается конверсия корма, тем самым на получение единицы продукции животноводства тратится меньше зерна. Для подготовки зерна к скармливанию в комбикормовой промышленности, а также в сельскохозяйственных предприятиях широкое распространение получил способ разрушения материала механическим воздействием со стороны рабочих органов [80, 81].

Физиологические особенности животных требуют разную степень измельчения, а зоотехнические требования к подготовленному зерновому корму предусматривают различные размеры частиц [98, 99]. В то же время измельченный материал должен иметь выравненный гранулометрический состав. Исследования проблем кормления животных показывают, что высокое содержание мелкой фракции (более

25%) в комбикорме для свиней неблагоприятно сказывается на их здоровье и продуктивности - у них может развиваться язвенная болезнь [90]. К тому же выравненный гранулометрический состав подвержен меньшему расслоению при транспортировке, а уменьшение доли мелкой фракции способствует лучшей сыпучести.

Различают несколько способов разрушения зернового материала (рисунок 1.1) [3]. При стесненном ударе разрушение происходит между двумя рабочими органами, от кинетической энергии которых зависит эффективность измельчения. При раздавливании разрушение материала происходит во всем объеме. При достижении внутреннего напряжения предела прочности, происходит разрушение зернового материала. При скалывании разрушение происходит в зонах наибольшей концентрации напряжений. При резании материал разрушается на заданные части. Этот процесс полностью поддается контролю. При истирании на материал действуют нормальные и касательные напряжения. Этот способ разрушения зерна является самым древним.



а - стесненный удар; б - раздавливание; в - скалывание; г - резание;  
д - истирание; е - свободный удар

Рисунок 1.1 - Способы разрушения сыпучих кормов

Ни в одном из типов измельчителей приведенные способы не встречаются в «чистом» виде, тем не менее, в каждом из них можно выделить преобладающий.

Наиболее распространенным в настоящее время является способ разрушения зерна свободным ударом, где разрушение зерна происходит благодаря воздействию на него быстро движущегося рабочего органа (рисунок 1.1) [3].

Распространенность способа измельчения свободным ударом доказывают исследования многочисленных авторов, в которых говорится о том, что минимальная энергоемкость складывается именно в процессе удара [9, 21, 69, 130, 131, 132].

В своих работах Барабашкин В. П. отмечает, что удельная стоимость машин с ударным принципом действия ниже в 2 раза, а масса меньше в 4 раза по сравнению с вальцовыми машинами [10].

Кроме молотковых дробилок в кормопроизводстве используют машины, принцип работы которых основан на разрушении материала сдавливанием. К ним относят вальцовые мельницы и вальцовые плющилки [126]. Некоторые предприятия используют ударно-центробежные измельчители, к числу которых относятся центробежные дробилки, дисмембраторы, дезинтеграторы, при необходимости получения продукции тонкого помола - мельницы струйные, коллоидные и пр. [46, 68, 87, 134].

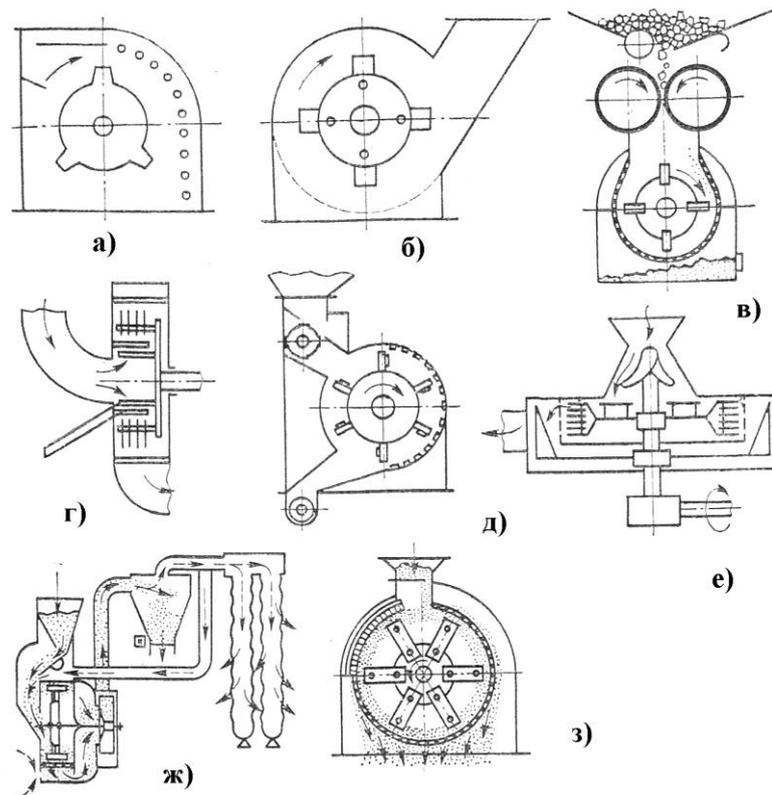
Рассмотрев способы разрушения зерна, а также результаты работ по определению их энергоемкости можно сделать вывод, что выбор молотковых дробилок для измельчения зерна является обоснованным и актуальным.

### **1.3. Устройство и обзор современных молотковых дробилок**

Конструкция молотковых дробилок была разработана еще в XIX в. В 1860 г. в Лондоне был зарегистрирован патент «на машину ударного действия для измельчения кварца и тому подобных материалов» [3]. В настоящее время молотковые дробилки широко используются во многих отраслях промышленности и в сельском хозяйстве. Их используют в горнорудной промышленности при измельчении ос-

новых компонентов, при производстве цемента, а также в кондитерской промышленности. В асбестовой промышленности они используются для дробления асбестовой руды [64, 93].

В молотковых дробилках преобладает способ разрушения в результате свободного удара [3]. Этот способ разрушения реализован различными конструктивными схемами, представленными на рисунке 1.2 [98].



а - открытого типа; б - закрытого типа; в, г - двухстадийные; д - с жестким креплением рабочих органов; е - горизонтальная; ж - с замкнутым воздушным потоком;  
з - с шарнирным креплением рабочих органов

Рисунок 1.2 - Конструктивно-технологические схемы молотковых дробилок

Как было отмечено, молотковые дробилки широкое применение нашли в сельском хозяйстве. Они являются универсальными измельчающими машинами. С их помощью измельчают все виды сыпучего сырья, необходимого для приготовления комбикормов. Молотковые дробилки просто устроены, надёжны в работе, от-

личаются компактными размерами. Они эффективно разрушают зерновые оболочки и незначительно нагревают продукт [98]. Некоторые дробилки снабжены вентилятором, создающим воздушный поток, транспортирующий измельченный продукт. В то же время у них имеются недостатки: образование пылевидной фракции, трудность изменения степени помола в процессе работы, высокие пусковые нагрузки.

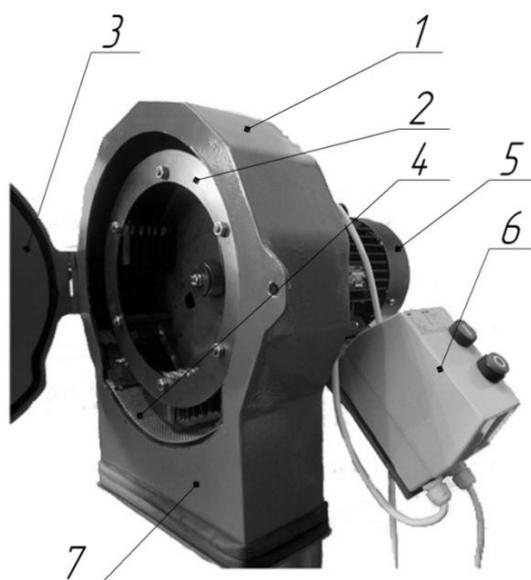
В настоящее время молотковые дробилки представлены как отечественными производителями, так и иностранными. Мощность варьируется в диапазоне 0,2-400 кВт, а по индивидуальным заказам ее можно увеличить. Ассортимент представлен как для личных подсобных хозяйств, так и для крупных комбикормовых заводов.

Для нужд личных подсобных хозяйств и приусадебного подворья выпускаются преимущественно молотковые дробилки малой мощностью с питанием от однофазной сети переменного тока или от бензинового двигателя. Их производством занимаются малые предприятия и индивидуальные предприниматели. В таблице 1.2 представлены характеристики молотковых дробилок малой производительности.

Таблица 1.2 - Характеристики дробилок зерна малой производительности

Модель дробилки	Показатель			
	Производительность, кг/ч	Мощность привода, кВт	Масса, кг	Габариты: длина, ширина, высота, мм
ДЗТ-1	40-100	1,6	45	620, 450, 980
МКД-Ф-1	60-100	0,6	26,8	435, 280, 475
ЭЗД-Т-1	40-60	0,45-0,5	23	470, 300, 740
«Таврия»	70-130	0,9-1,0	50	575, 560, 1125
МДМ 200/400	200	1,1	30	600, 400, 1400
9FG-360A	150	4	130	1400, 550, 1050
LG-2	60	2,2	65	600, 400, 800
Molino "MAGNUM 4V	250	0,75	12	520, 440, 720

МДМ 200/400 челябинского завода пищевого оборудования «ИНФЕЛ» (рисунок 1.3) состоит из корпуса 1, расположенного в нем ротора с молотками 2, на корпусе смонтирована откидная дверца 3 с загрузочной горловиной, в нижней части дробильной камеры расположено сменное решето 4, ротор приводится во вращение электродвигателем 5. Запуск дробилки осуществляется пускорегулирующей аппаратурой 6. Готовый продукт ссыпается в горловину 7 [58].

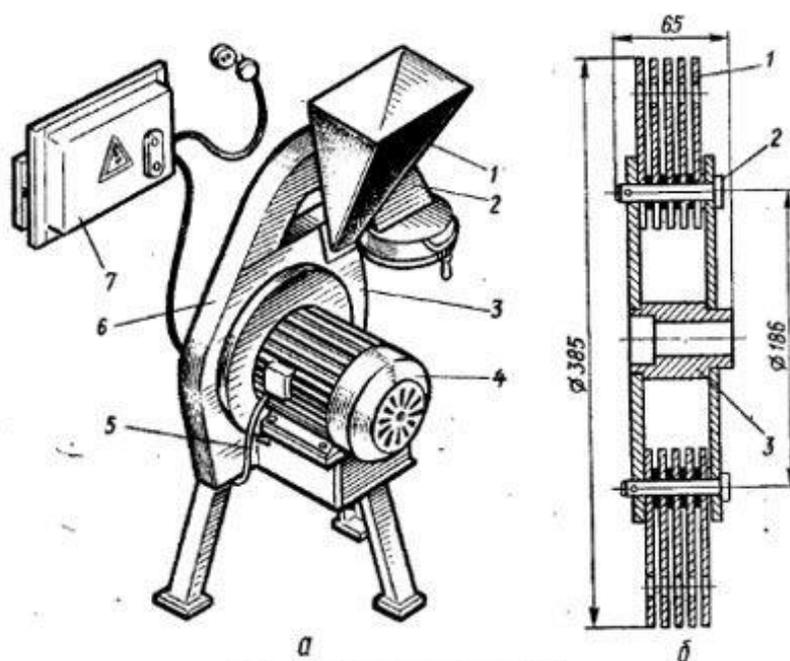


1 - корпус; 2 - ротор с молотками; 3 - дверца с загрузочной горловиной; 4 - сменное решето; 5 - электродвигатель; 6 - пускорегулирующая аппаратура; 7 – горловина

Рисунок 1.3 - Молотковая дробилка МДМ 200/400

Дробилка зерна ДЗ-Т-1 (рисунок 1.4 а) имеет сменные решета, с отверстиями диаметром 4, 6 и 8 мм. При установке решета с отверстиями наименьшего диаметра обеспечивается наиболее мелкий помол зерна, необходимый при кормлении свиней, а при пользовании решетами с диаметром отверстий 6 и 8 мм получается наиболее крупный и самый крупный помол, соответствующий по зоотребованиям кормлению крупного рогатого скота и птицы.

Зерно засыпается в бункер 1, в котором загрузочное окно открыто на необходимый размер щели, и высыпается в дробильную камеру между деками и вращающимся в камере молотковым ротором. Измельченный продукт выбрасывается в напорный канал 6, перекрытый на выходе решетом. Мелкие частицы проходят через отверстия решета, а частицы, размер которых превышает диаметр отверстий, захватываются молотками и снова направляются в дробильную камеру на дополнительное измельчение.

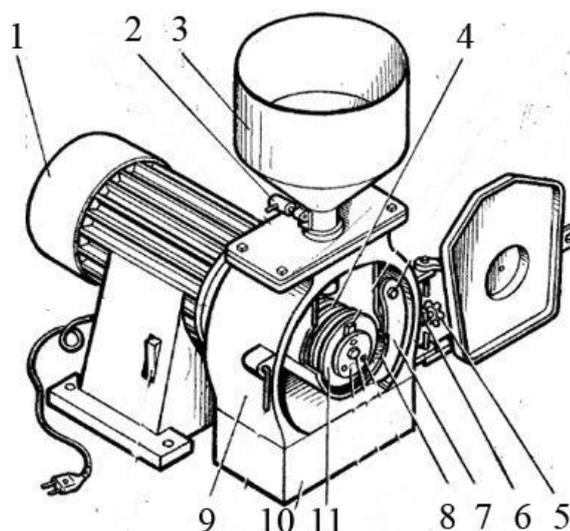


а - общий вид: 1 - загрузочный бункер; 2 - выгрузной патрубок; 3 - корпус; 4 - электродвигатель; 5 - шнур; 6 - напорный канал; 7 - блок конденсаторов; б - молотковый ротор (разрез): 1 - молоток; 2 - палец; 3 - втулка

Рисунок 1.4 - Дробилка зерна ДЗ-Т-1

Когда одна сторона молотков 1 изнашивается, молотки снимают, вынув пальцы 2, и устанавливают другой стороной (рисунок 1.4 б). Зазор между декой и молотками регулируется упорными болтами [96].

Микродробилку МКД-Ф-1 выпускают в двух исполнениях - МКД-Ф-1-І (рисунок 1.5) и МКД-Ф-1-Н. У последней производительность 35-60 кг/ч, потребляемая мощность 0,45 кВт, длина 420 мм, высота 525 мм, масса 20,8 кг, а остальные показатели такие же, как у дробилки МКД-Ф-1-І (таблица 1.2).



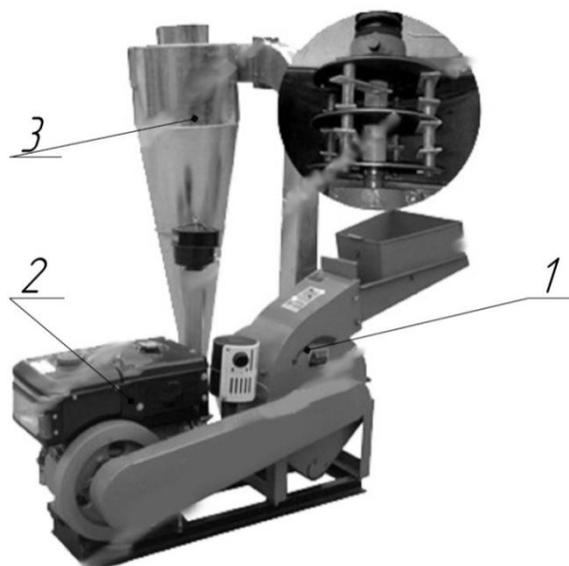
1 - электродвигатель; 2 - вставка; 3 - бункер; 4 - ротор; 5 - винт; 6 - гайка; 7 - дека;  
8 - решето; 9 – корпус; 10 - мешко-держатель; 11 - фрезы

Рисунок 1.5 - Микродробилка МКД-Ф-1-І

Зерно засыпается в бункер 3 (рисунок 1.5) и через вставку 2 поступает в корпус 9, где измельчается между декой 7 и вращающимся ротором 4, на котором установлены фрезы 11. Частицы, размер которых меньше диаметра отверстий в решетке 8, проваливаются в мешок, закрепляемый на мешко-держателе 10 (дробилка снабжена двумя решетками - с отверстиями диаметром 3 и 4 мм). Для качественного измельчения зерна оптимальный зазор между фрезами 11 и декой должен быть 0,5 мм. Для установки зазора используют регулировочную пластину, для чего дека 7 прижимается винтом 5 до упора в эту пластину и винт стопорится гайкой 6 [96].

В зернодробилке 9FG-360A фирмы Zhengzhou Taizy Trading Co., Ltd. (рисунок 1.6) в качестве привода используется бензиновый 4-х тактный ДВС. Кроме того, на валу ротора дробилки смонтирован вентилятор, а для отделения готового продукта от воздуха используется циклон. Использование ДВС в качестве привода

позволяет использовать молотковую дробилку в местах, куда подвод электропитания затруднителен.



1 - дробилка; 2 - ДВС; 3 - циклон разгрузитель

Рисунок 1.6 - Молотковая дробилка 9FG-360А с приводом от ДВС

Дробилки средней и высокой производительности (таблица 1.3) ориентированы на комбикормовые заводы, а также на предприятия, занимающиеся промышленным разведением сельскохозяйственных животных. В них электродвигатель питается от трехфазной сети переменного тока.

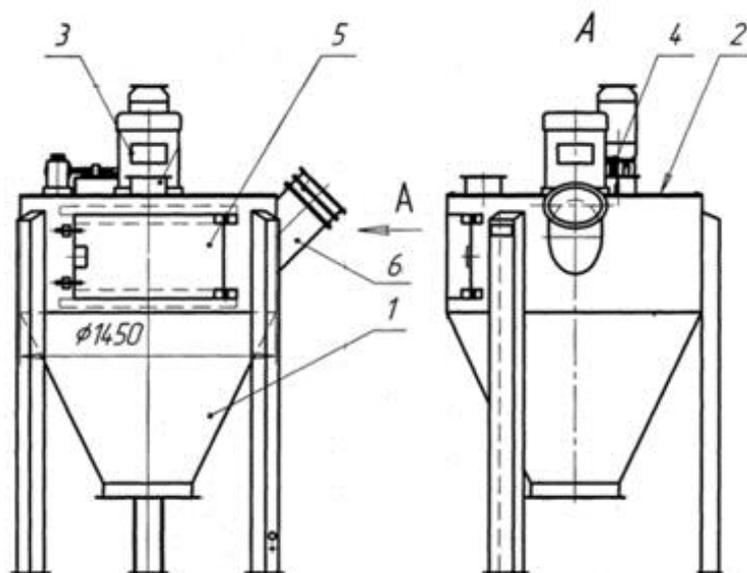
Таблица 1.3 - Характеристики дробилок зерна средней и высокой производительности

Модель дробилки	Показатель			
	Производительность, т/ч	Мощность привода, кВт	Масса, кг	Габариты: длина, ширина, высота, мм
Р1-БДК 10 М	8-10	91,5	1400	1800, 1500, 3200
ДКР 4	3,8	22	520	1230, 730, 1130
УЗ-ДБМ	8,8-10,2	90	2000	2355, 1100, 1195
ДМВ-10	15	110	1990	1650, 1642, 1980
ДМРТ-1210	-	355	5750	3235, 1934, 2694

Модель дробилки	Показатель			
	Производительность, т/ч	Мощность привода, кВт	Масса, кг	Габариты: длина, ширина, высота, мм
MM180/160-160	40	160	3650	2430, 1300, 1926
КД-2-01	3	22	730	1850, 1700, 2800
1400 GD	100	405	11500	3570, 3000, 2575
DFZK-2	70	110	4000	2995, 1490, 3700
SFSP132x102A/C	65	355	-	-
MULTIMILL 1400	-	355	2850	2879, 1365, 1120
GHM	60	400	-	-
Type 1250	60	355	-	-
Petkus 1300/800	20	200	-	-
ДБ-5	1,8	30	1140	10125, 3210, 4350
ДМБ-10	8-12	76,5	1200	2320, 1060, 1400

«-» - нет информации

Российский завод ОАО «Мельинвест» выпускает молотковые дробилки более 23 лет. Его ассортимент представлен зернодробилками конусного типа производительностью от 1,5 до 10 т/ч и мощностью от 15 до 91,5 кВт. Дробилки находят широкое применение в сельском хозяйстве при изготовлении комбикорма для домашнего скота и птиц. Они работают как измельчитель злаковых и плёнчатых культур, а также шротов. Дробилка Р1-БДК-М (рисунок 1.7) состоит из корпуса 1, крышки 2, электродвигателя 3, задвижки с приводом 4 и пульта управления. На корпусе имеется боковой люк 5, смотровое окно и патрубок подсоединения взрыворазрядителя 6. Ротор дробилки закреплен непосредственно на валу электродвигателя 3. На крышке установлены два аспирационных рукава. Смена сита и молотков ротора дробилки производится через люк 5. Для подачи зерна на крышке предусмотрены шнеки-питатели, самотек [52].



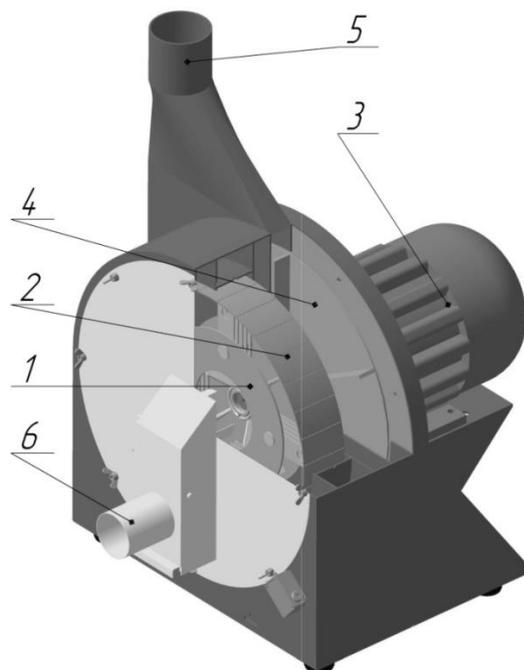
1 - корпус; 2 - крышка; 3 - электродвигатель; 4 - задвижки с приводом; 5 - люк; 6 - взрыворазрядителя

Рисунок 1.7 - Дробилка Р1-БДК-М

Другая российская компания «Доза-Агро» выпускает молотковые дробилки ДКР с горизонтальным расположением вала, которые служат для измельчения всех видов зерновых культур, а также шрота, мелкокускового жмыха, лузги и других кормовых компонентов. Дробилки зерна серии «Д» за счет дек способны дробить лузгу, шелуху, высоко абразивные и грубые материалы, такие как ракушки, отходы и т. д. Специальная модификация молотковой зернодробилки серии «С» создана для измельчения соломы и сена. Зернодробилка ДКР может встраиваться в линии и комплексы для приготовления полнорационных комбикормов в условиях хозяйства [55].

Дробилка ДКР-4 фирмы Доза-Агро (рисунок 1.8), как и все дробилки ДКР, не требует использования дополнительного транспортного оборудования для подачи сырья: автоматическая загрузка и выгрузка продукта происходит под действием воздушного потока. Установка сменных сит с различными размерами перфорации

позволяет регулировать степень измельчения продукта. На крышке дробилки установлен сепаратор, позволяющий отделять крупные минеральные примеси, в сепараторе также установлен магнит, улавливающий и отделяющий металломагнитные примеси из подаваемого продукта [55].



1 - ротор с молотками; 2 - сменное решето; 3 - электродвигатель; 4 - вентилятор;  
5 - выгрузная горловина; 6 - загрузочная горловина

Рисунок 1.8 - Дробилка ДКР-4

ОАО Всероссийский научно-исследовательский институт комбикормовой промышленности выпускает молотковые дробилки УЗ-ДБМ производительностью от 3 до 10 т/ч, мощностью от 15 до 90 кВт. Они предназначены для измельчения зерна, злаковых, пленчатых бобовых культур, кукурузы, зерносмесей, шрота и минерального сырья. Их особенностями являются: реверсивное вращение, большие инспекционные люки с изоляцией – для удобства внутреннего доступа, большая площадь сит, роторный питатель обеспечивает равномерность потока продукта,

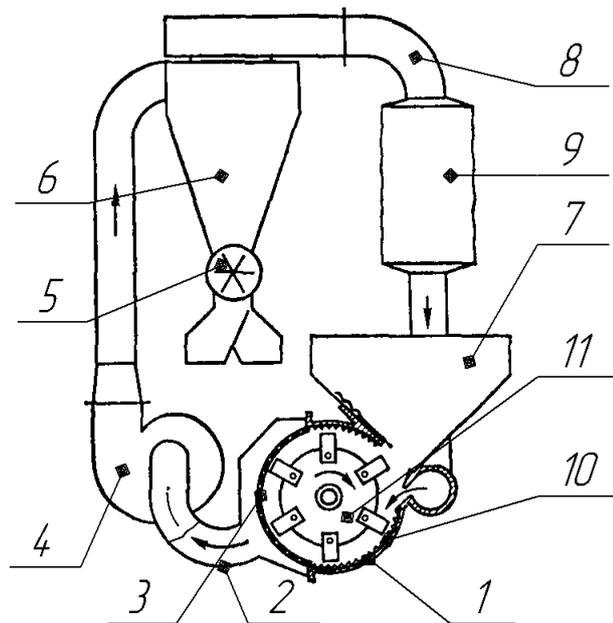
дробилка может работать как с роторным питателем, так и с электрической задвижкой, встроенная в питатель магнитная защита, низкое потребление электроэнергии [59].

Российская компания «Технэкс» - это флагман на российском рынке по производству и поставке комплексных решений для комбикормовой, пищевой и перерабатывающей промышленности. Её история насчитывает уже более 20 лет. Ассортимент молотковых дробилок представлен моделью ДМВ-10 мощностью от 75 до 110 кВт с вертикальным расположением вала ротора, а также моделями ДМРТ-1205 мощностью 110-200 кВт и ДМРТ-1210 мощностью 250-355 кВт с горизонтальным расположением вала [57].

Российское закрытое акционерное общество «СОВОКРИМ» образовано в 1988 году как совместное предприятие с итальянской фирмой «ОКРИМ». Сейчас предприятие выпускает дробилки серии ММ, предназначенные для измельчения зерновых, бобовых культур, зерносмесей, гранулированного и другого сырья со сходными физико-механическими характеристиками до частиц необходимых размеров. Выпускается двух модификаций: для сухого и мокрого измельчения. Производительность составляет 4-40 т/ч., а мощность дробилок варьируется в диапазоне 37-160 кВт [53].

Молотковая дробилка КД-2-01 (старая маркировка КДУ-2-01) выпускается Новоград-волинским машиностроительным заводом, который работает с 1907 г. и является одним из старейших заводов Украины. В советское время КДУ-2-01 была одной из самых распространенных молотковых дробилок, которая использовалась в кормопроизводстве животноводческих хозяйств всех зон. Зернодробилка КД-2-01 комплектуется электродвигателем 30 кВт или 22 кВт. Кормодробилки серии КД-2 могут применяться в кормоцехах, мельницах и кормоприготовительных отделениях при животноводческих фермах, а также встраиваться в различные кормоприготовительные агрегаты. Влажность перерабатываемого зерна должна быть не более 14-16% [124].

На рисунке 1.9 представлена технологическая схема молотковой дробилки КДУ-2-01. Она состоит из корпуса 1, зерно засыпается в приемный бункер 7, откуда оно самотеком попадает в дробильную камеру и подвергается воздействию молоткового ротора 11, достигнув проходного размера дерть через решето 3 попадает в приемный патрубок 2 и далее вентилятором 4 транспортируется по пневмосистеме. В циклоне 6 происходит отделение дерти от воздуха. Готовый продукт дозируется шибером 5. Воздух от циклона 6 попадает в приемный патрубок 8, после чего он частично отфильтровывается фильтром 9, а остальной возвращается в дробильную камеру.

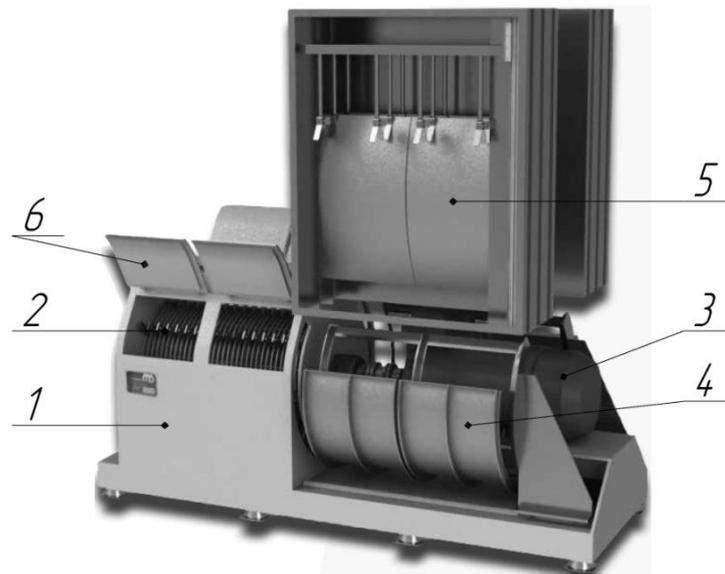


1 - корпус; 2 - приемный патрубок; 3 - решето; 4 - вентилятор; 5 - шибер; 6 - циклон; 7 - приемный бункер; 8 - приемный патрубок; 9 - фильтр; 10 - дека; 11 - молотковый ротор

Рисунок 1.9 - Технологическая схема молотковой дробилки КДУ-2-01

На рисунке 1.10 представлена молотковая дробилка Namex нидерландской фирмы Dinnissen. Данные дробилки оборудуются системой автоматической замены сита. Шкаф с ситами может вместить от 3 до 5 сит. Дробилки могут быть

оснащены интеллектуальной системой камер, что позволяет автоматически контролировать любые повреждения сит из диспетчерской [169].



1 - корпус дробильной камеры; 2 - молотковый ротор; 3 - электродвигатель; 4 - сменное решето; 5 - шкаф со сменными решетками; 6 - крышка смотрового люка

Рисунок 1.10 - Молотковая дробилка Namex

Другая нидерландская фирма VanAarsen 15 лет в России и является одной из ведущих фирм по производству молотковых дробилок, которая представлена на российском рынке развитой сетью представителей. Ассортимент молотковых дробилок представлен сериями GD и 2D производительностью 20-100 и 5-25 тонн в час соответственно. Опционально молотковые дробилки серии GD оснащаются системой Automatic Screen Exchange, позволяющей автоматически производить замену решет [163].

Швейцарская фирма Buhler ведет свою историю с 1860 г. Сейчас она выпускает молотковые дробилки серии DFZK с вертикальным расположением вала и производительностью от 40 до 70 тонн/час, а также серии DFZC мощностью до 250 кВт. Молотковая дробилка серии DFZP комплектуется электромотором мощностью до 400 кВт, производительностью до 75 т/ч и позволяет провести замену сит и молотков менее чем за 30 минут [170].

Китайская фирма Muyang в настоящее время занимает весомую часть в общем объеме выпускаемых молотковых дробилок. Ее ассортимент представлен молотковыми дробилками с горизонтальным расположением вала ротора SWFL66 мощностью от 55 до 250 кВт, SWSP112 мощностью от 55 до 75 кВт, SWSP132 мощностью от 90 до 160 кВт, и дробилки с вертикальным расположением ротора серии SWFL мощностью от 90 до 160 кВт [162].

Австрийская фирма ANDRITZ была основана в 1852 г. в г. Граце венгерским предпринимателем Josef Körösi. Сейчас она выпускает молотковые дробилки серии Multimill В мощностью 45-335 кВт, Multimill 01 - 160-250 кВт, Optimill - 160-355 кВт [167].

Нидерландская компания Wuyveen предлагает молотковые дробилки серия GHM производительностью от 5 до 60 т/ч установленной мощностью до 400 кВт, а также GHM с автоматической заменой сит, HM производительностью от 5 до 50 т/ч мощностью до 250 кВт [106].

Нидерландская фирма Ottevanger выпускает молотковые дробилки серии Type 670 мощностью от 110 до 315 кВт, а также серии Type 1200 с возможностью автоматической замены сит мощностью от 132 до 355 кВт [166].

Немецкая фирма Petkus выпускает молотковые дробилки серии 1300/800 производительностью до 20 т/ч и мощностью до 200 кВт. [140].

Литовская фирма Gruber выпускает молотковые дробилки серии Ultra с мощностью электродвигателя от 7,5 до 55 кВт и производительностью от 500 до 7000 кг/ч [164]. Особенностью дробилок этой серии является расположение лопаток вентилятора по периферии дробильной камеры.

Центробежный пылевой вентилятор имеют молотковые дробилки компании «Полымя» (Республика Беларусь) серии ДКМП мощностью от 15 до 30 кВт [56], а также польские дробилки «Dozamech» и «Zuptor», с мощностью электродвигателя 22 кВт каждая [67].

Ассортимент безрешетных молотковых дробилок представлен слабо. Могилев-Подольский машиностроительный завод поставляет безрешетную дробилку

ДМБ-10 производительностью 8-12 т/ч с мощностью привода 76,5 кВт. Дерь, получаемая при измельчении зерна на этой дробилке, имеет остаток на сите с диаметром отверстий 3 мм – 5 – 30 % [54]. Другая безрешетная дробилка ДБ-5, поставляемая Калининским ремонтно-механическим заводом имеет производительность по эксплуатационному времени 1,8 т/ч на зерне ячменя влажностью 12-14%, для продукта, имеющего остаток на сите с отверстиями диаметром 3 мм, не более 5 %, при этом мощность электродвигателя составляет 30 кВт [51].

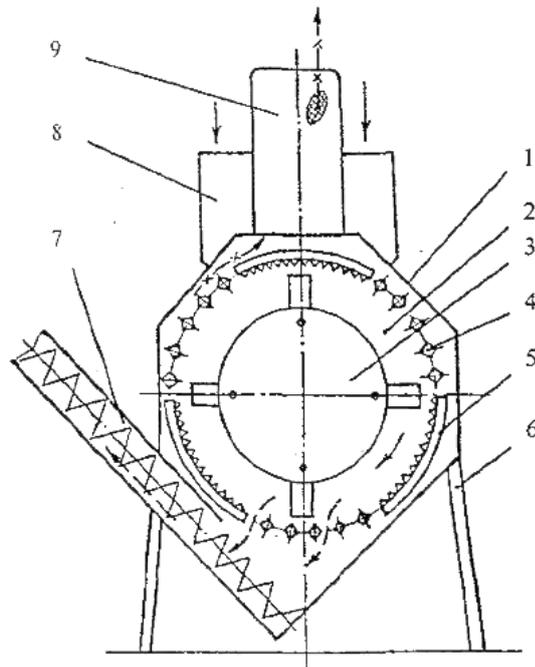
Из приведенного обзора следует, что производством молотковых дробилок занимаются предприятия во многих странах мира и их ассортимент очень велик. Данное многообразие можно обосновать тем, что при измельчении сыпучих продуктов в хозяйствах разного размера используют именно молотковые дробилки. Основным рабочим органом, регулирующим степень измельчения, является решето, поэтому для получения продуктов с различной степенью измельчения необходимо иметь набор решет с различными диаметрами отверстий. Некоторые производители из-за неоднородности измельчаемого материала в технических характеристиках к измельчающим машинам не указывают их производительность. В силу большого содержания крупных частиц в получаемом продукте (что не соответствует ГОСТ для некоторых групп животных) безрешетные дробилки не находят широкого применения в производстве комбикормов. Следует также отметить, что для эвакуации и транспортирования получаемого продукта широко используются вентиляторы.

#### **1.4. Направления развития конструкций молотковых дробилок**

Исследованиями, направленными на повышение эффективности рабочего процесса измельчения зерна в молотковых дробилках занимались В. Р. Алешкин, Н. Ф. Баранов, В. Л. Гейфман, В. П. Горячкин, И. В. Коношин, М. Е. Гиршин, Ф. Г. Зуев, С. Т. Карташов, Ф. С. Кирпичников, Б.М. Клычьев, Я. Н. Куприц, И. З.

Макаров, С. В. Мельников, В. Т. Мохнаткин, Е. А. Непомнящий, П. М. Роцип, В. И. Сыроватка, В. А. Сысуев, С.Д. Хусид и многие другие ученые.

Следует отметить и работы, направленные на повышение эффективности функционирования молотковых дробилок, выполненные за последнее десятилетие. В своей работе Халтурин В. С. занимался исследованием молотковой дробилки, где вместо решета используются колосники. Конструктивно-технологическая схема представлена на рисунке 1.11.



1 - корпус; 2 - камера дробильная; 3 - ротор молотковый; 4 - секция колосниковой решётки; 5 - дека рифленая; 6 - рама; 7 - шнек выгрузной; 8 - бункер загрузочный; 9 - фильтр для сброса избыточного давления.

Рисунок 1.11 - Конструктивно-технологическая схема дробилки с колосниковой решеткой

В ходе испытаний совместно с Кировской МИС было выявлено, что дробилки с колосниковой решёткой обеспечивают измельчение зерна с модулем помола соответствующим по зоотехническим требованиям для КРС (взрослых животных) и взрослой птицы, свиноматок, хряков-производителей, взрослых овец и мо-

лодняка, свиней на откорме (кроме беконного откорма). Предложенное конструктивное решение позволило снизить энергоемкость получаемого продукта по сравнению с базовым вариантом. [146].

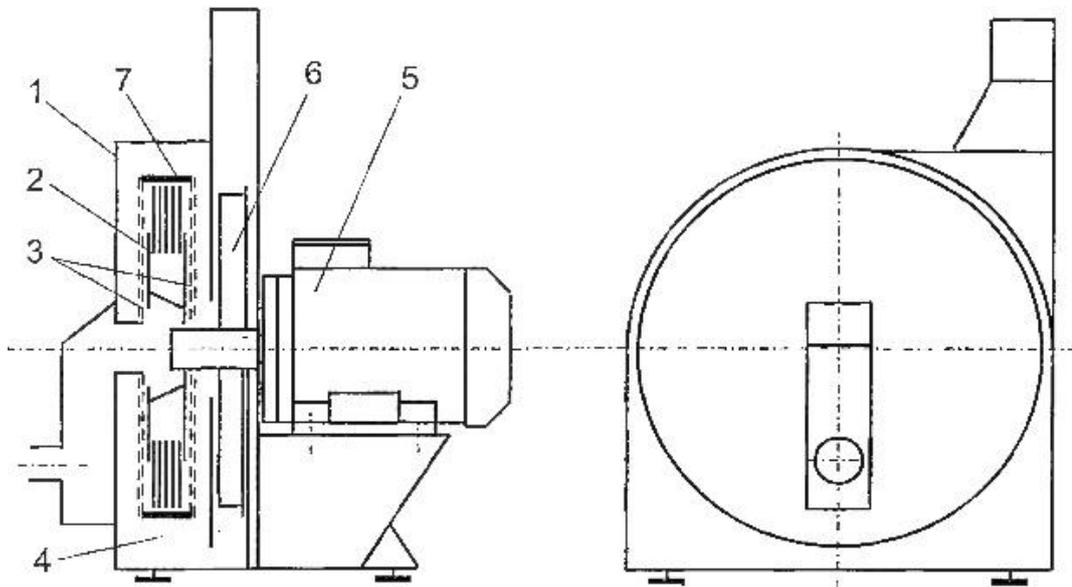
В своей работе Устюгов С. Ю., проводя исследования молотковой дробилки с колосниковой решеткой, пришел к выводу, что на большинстве режимов работы содержание целых зерен в готовом продукте  $m_3$  не соответствует зоотехническим требованиям. Максимальная пропускная способность дробилки достигается при окружной скорости  $V = 85$  м/с, при этом сильно возрастают удельные энергозатраты. «Живое» сечение колосниковой решетки недостаточно для своевременной эвакуации измельчаемого продукта. Наблюдается ярко выраженное переизмельчение материала [141]. Кроме того, высокие окружные скорости молотков влекут за собой ускоренный износ рабочих органов и повышенные энергозатраты на холостой ход.

По результатам патентных исследований Лодыгин Д. Г. предлагает использовать дробилку зерна, у которой в торцевых поверхностях дробильной камеры установлены сепарирующие решета с регулируемыми по площади отверстиями, а по периферии молоткового ротора рифленая дека (рисунок 1.12) [116, 118].

Молотковая дробилка включает в себя корпус 1, внутри которого расположены молотковый ротор 2, дека 7, осадительная камера 4, регулируемые по площади отверстий сепарирующие решета 3, выполненные в виде неподвижных и подвижных решет с круглыми отверстиями диаметром 6 мм и имеющие возможность горизонтального перемещения, крыльчатка вентилятора 6, которая установлена на валу, электродвигатель 5.

Результаты исследований по влиянию площади отверстий на рабочий процесс дробилки показали, что изменением площади регулируемого отверстия  $k_s$  с 48 до 78 мм<sup>2</sup> можно варьировать средним размером частиц готового продукта, при этом пропускная способность  $Q$  уменьшается с уменьшением площади регули-

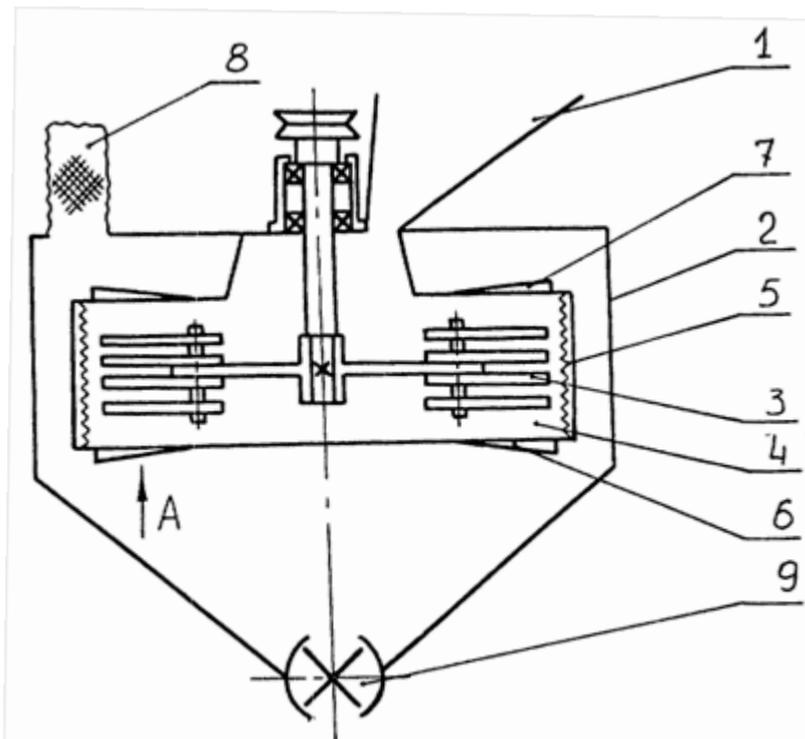
мого отверстия. Предложенное решение позволяет снизить удельные энергозатраты по сравнению с базовым вариантом, а также уменьшить содержание целых зерен в готовом продукте [117, 118].



1 - корпус; 2 - молотковый ротор; 3 - сепарирующие решета; 4 - осадительная камера; 5 - электродвигатель; 6 - крыльчатка вентилятора; 7 - дека

Рисунок 1.12 - Молотковая дробилка с торцевыми сепарирующими решетками

Исследуя процесс измельчения в молотковых дробилках, Поярков М. С. предлагает использовать жалюзийную решетку. На рисунке 1.13 изображена конструктивная схема с предлагаемым решением. Данная дробилка работает следующим образом. Подлежащий измельчению материал подается дозатором 1 в дробильную камеру 4. Попадая на молотковый ротор 3, материал отбрасывается в направлении деки 5 и измельчается при взаимодействии с декой и молотковым ротором 3. Крупные частицы материала концентрируются вблизи деки 5, мелкие находятся во взвешенном состоянии в объеме дробильной камеры и через сепараторы 6 и 7 воздушным потоком, создаваемым вращающимся ротором, выводятся из зоны измельчения в полость корпуса 2, выполняющего функцию осадителя. Через фильтр 8 происходит удаление избыточного объема воздуха, поступающего с исходным материалом. Через мешкователь 9 готовый продукт выводится из корпуса [123].



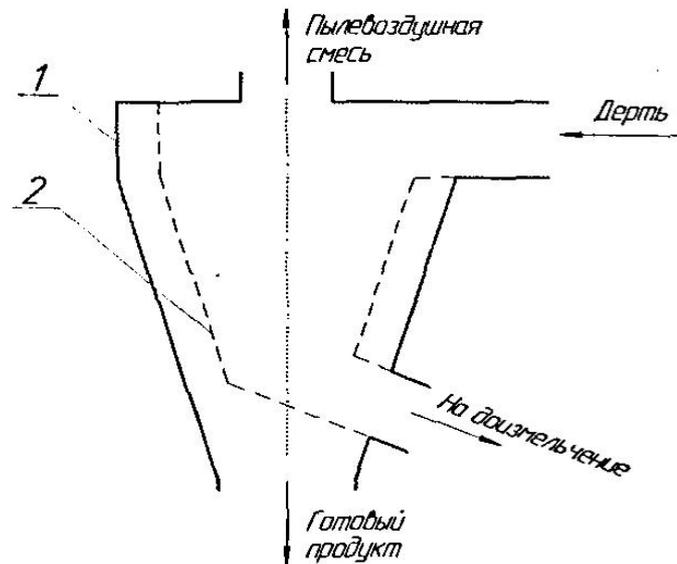
1 - дозатор; 2 - корпус; 3 - молотковый ротор; 4 - дробильная камера; 5 - дека;  
6, 7 - жалюзийная решетка; 8 - фильтр; 9 - мешкователь

Рисунок 1.13 - Молотковая дробилка с жалюзийной решеткой

При расположении жалюзийных сепараторов с двух сторон дробильной камеры и направлении движения воздушно-продуктового потока встречно створкам жалюзи наблюдается снижение энергоёмкости процесса измельчения по сравнению с решётным вариантом сепараторов при одинаковой пропускной способности и степени измельчения материала. При этом улучшилось качество готового продукта, оцененное коэффициентом вариации размеров частиц дерты [123].

В своей работе Федоров О. С. предлагает повысить эффективность функционирования молотковой дробилки путем совершенствования способа сепарации. Для реализации новой технологической схемы сепарации изменена конструкция молотковой дробилки зерна типа КДУ - удалено сепарирующее решето из камеры измельчения и установлено решето новой конструкции в циклоне 1 дробилки (рисунок 1.14). В данном случае разделение измельченного материала происходит на сепарирующем решете 2. Частицы, достигшие нужного размера, проходят между

стенкой циклона и сепарирующего решета и выгружаются, а недоизмельченные частицы идут на повторное измельчение [142].

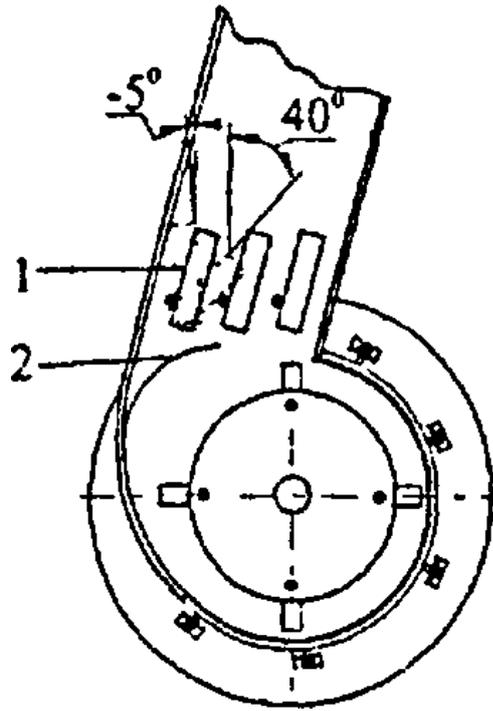


1 - циклон; 2 - решето

Рисунок 1.14 - Конструктивно-технологическая схема циклона сепаратора

При экспериментально установленных оптимальных конструктивно-технологических параметрах дробилки наблюдается снижение энергоемкости процесса по сравнению с базовым вариантом. При этом измельченный продукт соответствует зоотехническим требованиям для всех групп животных. [142].

Повысить эффективность процесса измельчения зерна Турубанов Н. В. предлагает путем разделения дерти воздушным потоком в дробилке зерна открытого типа с пневмосепарирующим каналом. Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что изменением угла установки направляющих и положением воздушной заслонки не удастся достичь требуемого качества готового продукта. Содержание целых зерен во всех опытах превышает допустимую ГОСТом величину [139]. В связи с этим для снижения количества целых зерен в готовом продукте в дробильной камере установлено решето 2 (рисунок 1.15).



1 – направляющие; 2 - решето

Рисунок 1.15 - Конструктивное решение по заявке на патент № 2002109459

После установки решета, по результатам экспериментальных данных, можно сказать, что содержание целых зерен в получаемом продукте снизилось. Энергоемкость процесса измельчения по сравнению с базовым вариантом также уменьшилась.

Из приведенного обзора научных исследований можно сделать вывод, что работы ведутся по пути совершенствования рабочих органов молотковых дробилок с целью снижения энергоемкости процесса, а также повышения качества продукта. Однако этого недостаточно. Например, некоторые решения очень сложны в серийном производстве, что непременно сказывается на стоимости изделия. Поэтому, кроме совершенствования конструкции, необходимо совершенствовать и режим работы молотковой дробилки с целью получения качественного продукта с минимальными энергозатратами.

### 1.5. Влияние решета на рабочий процесс

О влиянии решета на рабочий процесс молотковых дробилок у авторов научных работ нет единого мнения. Влияние площади поверхности решета на основные показатели процесса измельчения зерна изучали В. Р. Алешкин, С. В. Мельников, В. И. Сыроватка, А. А. Зеленеv, Г. И. Шуб, И. В. Коношин, В. Н. Ткаленко, В. А. Елисеев, А. П. Макаров, И. И. Ревенко и много других авторов. Большинство из них пришло к выводу, что пропускная способность дробилки возрастает с увеличением площади поверхности решета. Некоторые исследователи (В.И. Ткаленко, М.З. Рудой) считают, что для интенсификации измельчения необходимо увеличивать площадь деки за счет сокращения размеров решета [138].

Елисеев В. А. отмечает, что с увеличением площади решета в 3 раза пропускная способность дробилки увеличивается на 40...50%. А вероятность прохода частиц через отверстия решета зависит от скорости движения воздушно-продуктового слоя. Чем больше скорость, тем меньше пропускная способность решета. Одним из способов повышения эффективности решета является уменьшение диаметра дробильной камеры [63].

По данным [136] увеличение угла охвата решетом с  $90^\circ$  до  $360^\circ$  при центральной загрузке и с  $120^\circ$  до  $360^\circ$  при радиальной загрузке зерна в дробильную камеру повышает пропускную способность дробилки на 20...46% и снижает энергозатраты на 19%.

В. Р. Алешкин и С. В. Мельников [4, 101] отмечает, что пропускная способность решета определяется коэффициентом живого сечения, т.е. отношением площади отверстий, через которые измельченный продукт покидает дробильную камеру к площади поверхности всего решета. С увеличением коэффициента живого сечения решет от 0,3 до 0,55 при измельчении различных культур удельные энергозатраты уменьшаются в среднем на 12...20% при незначительном увеличении модуля помола [157]. Это объясняется повышением вероятности прохождения частиц через отверстия сепарирующей поверхности. Авторы публикаций [65, 85, 108, 129]

считают, что при меньшей площади сепарирующей поверхности пропускная способность дробилок с чешуйчатыми решетками при измельчении зерна выше.

Анализ работы ситовой поверхности дробилок с горизонтальным ротором показывает, что наиболее интенсивное просеивание осуществляется в нижней части решета [129]. Для увеличения пропускной способности дробилки необходимо обеспечивать равномерный выход продукта на всей поверхности решета.

При измельчении стебельных материалов с увеличением размеров отверстий решет снижаются удельные энергозатраты, и повышается пропускная способность дробилки [11]. По мнению [125] увеличение диаметра отверстий решета с 8 до 20 мм наиболее существенно сказывается на увеличении пропускной способности дробилки по сравнению с удельными энергозатратами.

При мелком измельчении грубых кормов увеличение диаметра отверстий сита свыше 30 мм при неизменной скорости молотков не оказывает существенного влияния на дисперсность конечного продукта [45]. Энергозатраты уменьшаются на 25...50 % (в зависимости от линейной скорости молотков) при увеличении диаметра отверстий с 8 до 22 мм. Аналогичные результаты получены в работе [85]. Авторы рекомендуют оптимальный диаметр отверстий решет 20 мм.

При измельчении зерносмеси из гороха, пшеницы, ячменя, кукурузы, овса увеличивается пропускная способность дробилки на 1,2...15,1% и снижаются удельные энергозатраты на 3,9...15,2% по сравнению с измельчением отдельных компонентов. При этом наибольший эффект достигается на решетках диаметром 5 мм [47].

В своих трудах Гиршин М. Е., Рошин П. М. отмечают, что при использовании чешуйчатого решета для измельчения листостебельной массы на молотковой дробилке агрегата АВМ-0,4 мощность рабочего хода и удельный расход энергии измельчения значительно ниже, чем при постановке решета с круглыми отверстиями [18].

Полученные экспериментальные данные автором [79] показали, что применение молотковой дробилки с решетом спиралевидной формы позволяет снизить общие удельные затраты энергии на измельчение в сравнении с серийной на 35%.

Из всего сказанного выше следует, что роль решета в организации процесса измельчения зерна очень высока. Анализ многочисленных научных трудов позволяет сделать вывод, что результаты исследований носят неоднозначный, а порой и противоречивый характер. В связи с этим влияние решета на рабочий процесс молотковой дробилки нуждается в дополнительном изучении.

### **1.6. Влияние вентилятора на процесс измельчения**

Проведя обзор конструкций существующих молотковых дробилок, следует отметить, что для эвакуации измельченного зерна, а иногда и для загрузки дробильной камеры, используют вентилятор, который монтируют в корпусе дробилки, устанавливая перед или позади дробильной камерой. Работу вентилятора при пневмотранспортировании измельченного материала изучали Мельников С. В., Нечаев В. Н., Касьянов В. Л., Гиршин М. Е., Кирпичников Ф. С., Игнатьевский Н. Ф., Шень Цзай-Чунь, Резник Е. И., Gutzeit Н. и др.

Исследуя работы [70, 74, 110, 112], следует отметить, что роль вентилятора в рабочем процессе молотковой дробилки очень высока. Авторы работ [17, 64, 97] установили, что при работе дробилок с циклонами, снабженными шлюзовыми затворами, возникают большие потери давления. При этом происходит переизмельчение материала, что связано с несвоевременной эвакуацией измельченных частиц. При механическом транспортировании готового продукта из дробилки в смеситель энергоемкость процесса измельчения снижается, однако, в дробильной камере возникает большой перепад давления, что ведет к переизмельчению и снижению производительности дробилки на 15...20%. Пневмотранспортирование материала из дробилки, минуя циклон, то есть непосредственно в бункер позволяет снизить энергоемкость процесса, однако наблюдается сильное пыление корма [97].

В своей работе Касьянов В. Л. [73] путем совершенствования лопаток наружного вентилятора добился снижения энергоемкости процесса измельчения зерна, а также уменьшил шум, создаваемый вентилятором. Шень Цзай-Чунь при исследовании технологического процесса размола сена бобовых и злаковых культур на молотковой кормодробилке установил, что вентилятор способствует увеличению разности статических давлений на границе решета между дробильной камерой и пространством за решетом, что повышает эффективность работы машины [154]. В работе [15] автор рекомендует для достижения оптимального режима работы дробилки увеличивать коэффициент перекрытия и окружную скорость лопаток ротора-вентилятора.

По данным Мельникова С. В. и Кирпичникова Ф. С. установлено, что наличие вентилятора при измельчении стебельчатых кормов увеличивает производительность дробилки на 6-40% [100].

Однако следует отметить, что многочисленные исследования по определению влияния вентилятора на рабочий процесс молотковой дробилки порой неоднозначны и не способны в полной мере решить вопрос энергосбережения. В дополнение к существующим исследованиям необходимо рассматривать вопрос влияние режимов работы молотковой дробилки на работу вентилятора. Поэтому работа вентилятора в комплексе с измельчающей машиной нуждается в дополнительном изучении.

## 1.7. Выводы

Из проведенного обзора следует:

1. Молотковые дробилки в настоящее время активно используются для подготовки зерна и других сыпучих продуктов к скармливанию;
2. Свое применение они нашли в хозяйствах разного размера, начиная от приусадебного подворья, заканчивая крупными комбикормовыми заводами и агрохолдингами;

3. При измельчении кормов на молотковых дробилках решето является регулятором степени измельчения, для изменения которой одно решето необходимо заменить другим. В ряде конструкций дробилок зарубежного производства используется система автоматической замены решет. Однако применение такого конструктивного решения непременно влечет за собой увеличение металлоемкости, габаритных размеров, стоимости изделия. Усложняется конструкция и как следствие снижается надежность;
4. Для эвакуации измельченного материала, а иногда и для загрузки дробильной камеры, широко используют вентиляторы, монтируемые на валу дробильного ротора, интегрированные с ним или устанавливаемые отдельно;
5. Анализ научных трудов показал, что конструктивно-режимные параметры работы молотковой дробилки требуют дальнейшего изучения и совершенствования.

## **2. ОБОСНОВАНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ**

### **2.1. Обоснование необходимости совершенствования объекта исследования**

В результате модернизации отрасли кормопроизводства возрастают требования к производительности оборудования, его эффективности, стоимости. Большое внимание уделяется антипитательным факторам, вызванным нарушением технологических режимов производства кормовых компонентов [152]. а также вопросам безопасности по отношению к обслуживающему персоналу и окружающей среде. К качеству получаемого корма так же выставляются все более высокие требования чем того требует ГОСТ.

Пагубное влияние целого и неизмельчённого зерна на продуктивность и здоровье животных описано в работах многих авторов [5, 13, 20, 49, 66, 85, 86, 88, 120, 142, 147, 158, 160, 168]. К тому же остаток на сите с диаметром отверстий 3 и 5 мм регламентируется ГОСТом [23, 25, 26, 28, 29, 30, 35, 37, 40, 41].

Проанализировав научную литературу, был сделан вывод, что содержание пылевидной фракции также снижает продуктивность и увеличивает заболеваемость и падеж животных. По данным [5] частицы тонкого помола (диаметром менее 0,2 мм), образуя конгломераты, задерживаются в рубце КРС 2...4 часа, а среднего и крупного помола 6...9 часов. Аналогичная ситуация происходит и с другими животными. Так, по данным исследований Канзаского (США) университета, при скармливании поросятам ячменной дерти средним размером 0,3 мм прирост составил 750 г/сутки, в то время при скармливании дерти средним размером 0,7 мм - 950 г/сутки [172].

Попадая в рот животных пылевидная фракция, смачиваясь слюной, образует тестообразную массу, которая забивает горло животных. Кроме того, переизмельченные частицы забивают ворсинки желудка, после чего ухудшается перевариваемость корма [103].

Негативное влияние переизмельченного продукта необходимо рассматривать и с технологической стороны. Тонкоизмельченный продукт теряется (до 5 % массы) при погрузке, разгрузке, транспортировании и при раздаче кормов, ухудшает условия труда, а в смеси с воздухом образует взрывоопасную среду. Кроме того, пылевидная фракция вызывает лёгочные заболевания не только у животных, но и у человека [11].

В результате анализа технологических схем серийно выпускаемых и опытно конструкторских молотковых дробилок сделали вывод, что решето является практически единственным рабочим органом, способным влиять на степень измельчения, а также на качественные показатели корма (содержание пылевидной фракции, остаток на ситах с диаметром отверстий 3 и 5 мм.). Замена решета, как способ изменения степени помола, снижает степень использования оборудования и увеличивает травматизм.

Кроме того, вентилятор, используемый в молотковых дробилках для эвакуации и транспортировки измельченного продукта, а в некоторых случаях и для загрузки, в силу своих конструктивных особенностей потребляет большое количество энергии.

Поэтому оптимизация конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки является актуальной задачей.

## **2.2. Обоснование использования решет с прямоугольными отверстиями**

В роторных измельчителях ударно-стирающего принципа действия, к которым можно отнести молотковые дробилки, воздушно-продуктовая смесь движется с большими скоростями. Радиальная и осевая составляющие во много раз меньше

окружной скорости, поэтому ими можно пренебречь [83]. При рассмотрении движения частиц в дробильной камере молотковой дробилки, можно сказать, что кольцевой слой перемещается в направлении вращения ротора и со средней скоростью равной половине скорости молотков, причем скорость этого слоя у поверхности сита и деки 18-22 % от окружной скорости молотков [6, 7, 86, 88, 107, 119].

В работах [14, 113, 133, 135] представлены результаты исследований лабораторных мельниц, в которых для изучения траектории движения частиц применен метод стробоскопической остановки ротора. Авторам удалось наблюдать движение частиц со скоростями, отличными от скорости молотков. Оказалось, что частицы совершают скачкообразное движение и перемещаются вдоль деки по хордам. Чем крупнее частица, тем по большей хорде она движется. Мелкие частицы, обладающие большей парусностью, при отражении от деки не достигают зоны действия молотков, а крупные частицы подвергаются многократным повторным ударам и измельчению [11]. Однако при движении частиц по поверхности решета величина хорд уменьшается и можно допустить, что максимальное количество измельчаемого материала движется равномерно по поверхности решета [68].

В ходе литературного обзора было выяснено, что решето, устанавливаемое в большинстве молотковых дробилок, имеет отверстия круглой формы. В ходе теоретического обоснования адекватности использования решета с прямоугольной формой отверстий будем использовать методы, используемые в математике, физике, теоретической механике.

Рассмотрим движение частицы диаметром  $d$  через отверстие решета (рисунок 2.1). В процессе движения на нее будут действовать силы, представленные на рисунке 2.1. Результирующая всех сил  $R$  запишется в виде:

$$\bar{R} = \bar{R}_A + \bar{R}_Ц + \bar{R}_C + \bar{R}_B + \bar{R}_T, \quad (2.1)$$

где  $R_T$  - сила тяжести, направленная вертикально вниз,  $R_A$  - сила аэродинамического потока,  $R_Ц$  - центробежная сила. Силы  $R_A$  и  $R_Ц$  направлены по нормали к поверхности решета.  $R_C$  - сила лобового сопротивления,  $R_B$  - толкающая

сила со стороны воздушно-продуктового слоя. Силы  $R_C$  и  $R_B$  направлены перпендикулярно  $R_{Ц}$  и расположены в плоскости вращения ротора дробилки. Приняв допущения, описанные выше, можно сказать, что действие всех сил расположено в плоскости  $xoy$ .

Так как сила тяжести  $R_T$  очень мала по сравнению с другими силами, то ей можно пренебречь.

$$R_A = m \cdot k_n \cdot v_a^2, \quad (2.2)$$

где  $m$  - масса частицы;  $k_n$  - коэффициент парусности;  $v_a$  - скорость воздушного потока в отверстии решета.

$$R_{Ц} = m \cdot \frac{v_{\varphi}^2}{r}, \quad (2.3)$$

где  $r$  - радиус кривизны решета;  $v_{\varphi}$  - окружная скорость частицы.

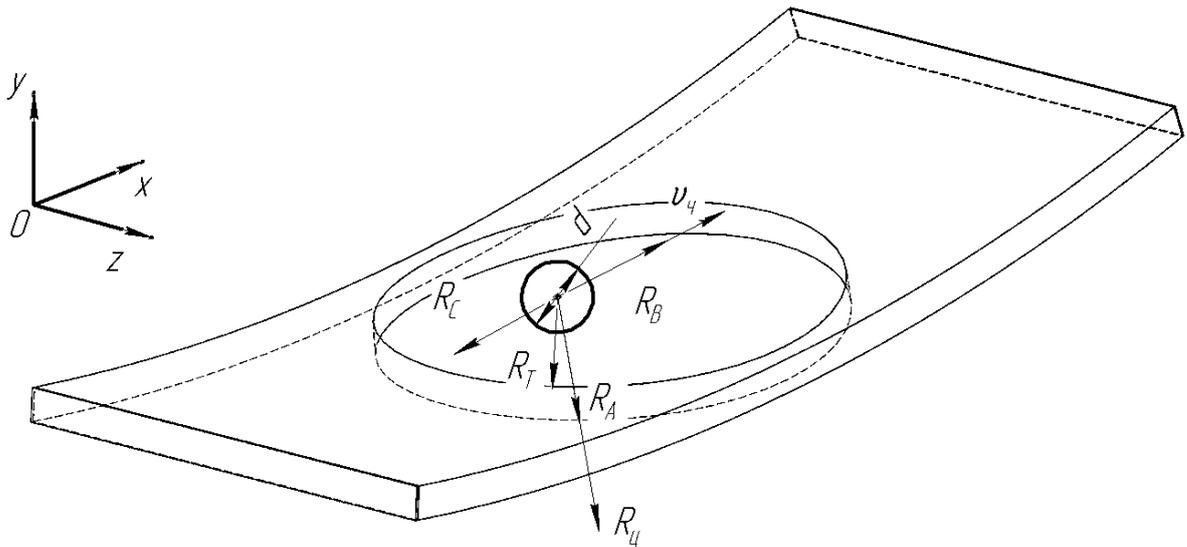


Рисунок 2.1 - Схема прохождения частицы через отверстие решета

Из источников [6, 7, 86, 107, 119] можно принять:

$$v_{\varphi} = 0,2 \cdot v_m, \quad (2.4)$$

где  $v_m$  - окружная скорость молотков. Так как движение частицы по поверхности решета равномерное, то:

$$\overline{R_C} + \overline{R_B} = 0, \quad (2.5)$$

$$R = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d^3}{6} \cdot \left( k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_q^2}{r} \right), \quad (2.6)$$

где  $\rho$  - плотность частицы;  $d$  - диаметр частицы.

Для того чтобы частица гарантированно покинула дробильную камеру, она должна за некоторое время  $\Delta t$  погрузиться в отверстие решета на некоторое расстояние  $\Delta s$  [138].

$$\Delta s = \frac{R \cdot \Delta t^2}{2 \cdot m}. \quad (2.7)$$

Время  $\Delta t$  из выражения 2.7 с учетом выражения 2.6 запишем в виде:

$$\Delta t = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta s}{k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_q^2}{r}}}. \quad (2.8)$$

За время  $\Delta t$  частица преодолет расстояние  $AB$  (рисунок 2.2).

$$\Delta t = \frac{AB}{v_q}. \quad (2.9)$$

Приравнявая выражения 2.8 и 2.9 получим:

$$\frac{AB}{v_q} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta s}{k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_q^2}{r}}}, \quad (2.10)$$

$$AB = v_q \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta s}{k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_q^2}{r}}}. \quad (2.11)$$

В своих работах [4, 143] параметр  $\Delta s$  связывают прямой функциональной зависимостью с диаметром частицы  $d$ , т.е.:

$$\Delta s = f(d). \quad (2.12)$$

Подставляя выражение 2.12 в 2.11 получим:

$$f(d) = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{AB}{v_c} \right)^2 \cdot \left( k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_c^2}{r} \right). \quad (2.13)$$

Проанализировав уравнение 2.13, можно сказать, что продольный размер отверстия (отрезок  $AB$  на рисунке 2.2) будет влиять на размер частиц, способных пройти через отверстие решета.

В решетках с круглыми отверстиями отрезок  $AB$  будет представлять собой хорду, проведенную в плоскости вращения ротора. В центральной части отверстия этот отрезок максимален и равен диаметру отверстия. В этой части будут проходить как крупные частицы, так и пылевидная фракция. К краям отрезок  $AB$  уменьшается до нулевого значения. Тем самым можно выделить зону, где будет проходить только пылевидная фракция. Поэтому круглая форма отверстий решета способствует как прохождению крупных частиц, а иногда и целых зерен, так и образованию пылевидной фракции.

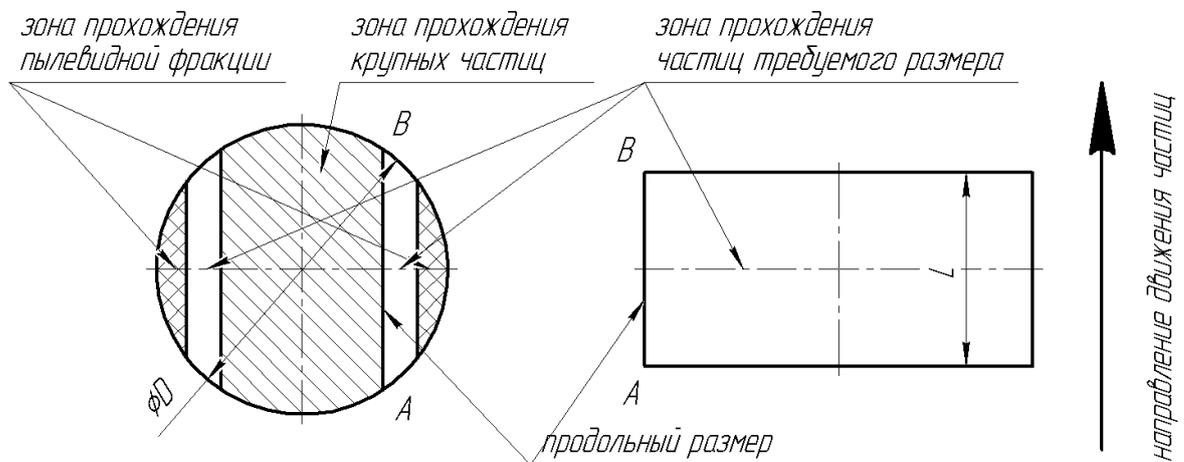


Рисунок 2.2 - Обоснование использования решета с прямоугольными отверстиями

В отличие от круглых, в прямоугольных отверстиях продольный размер постоянен, поэтому создаются условия для образования материала, имеющего более выравненный гранулометрический состав, с меньшим содержанием пылевидной фракции и целых зерен.

### 2.3. Влияние прямоугольной формы отверстий на качество продукта

При нахождении зависимости диаметра частиц  $d$ , способных покинуть дробильную камеру, от продольного размера  $AB$  отверстия решета примем во внимание тот факт, что частицы в дробильной камере движутся по поверхности решета рыхлым слоем и вероятность попасть в отверстие у этих частиц одинакова [72]. Рассматривая прохождение частицы 1 через отверстие решета с радиусом кривизны  $r$  (рисунок 2.3) в сечении, совпадающим с плоскостью вращения ротора, пограничным условием прохождения частицы 1 диаметром  $d$  возле кромки  $A$  примем положение, при котором траектория движения ее центра масс будет направлена на кромку  $B$  (частица 2).

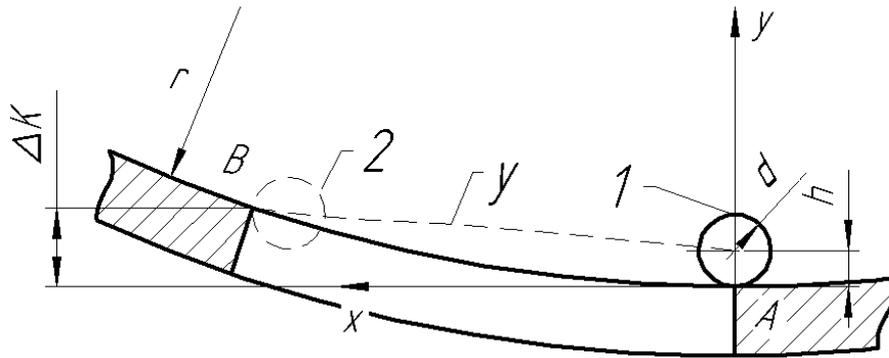


Рисунок 2.3 - Прохождение частицы через отверстие решета

Рассмотрим прохождение частицы 1 через отверстие с продольным размером решета  $AB$  и радиусом кривизны  $r$  (рисунок 2.3). Запишем неравенство, при соблюдении которого произойдет эвакуация частицы:

$$\Delta K \geq y, \quad (2.14)$$

где  $y$  - координата движения центра тяжести частицы 1.

$$\Delta K \approx r - \sqrt{r^2 - AB^2}. \quad (2.15)$$

Для нахождения уравнения движения центра тяжести  $y$  воспользуемся системой уравнений:

$$\begin{cases} y = h - \frac{R \cdot \Delta t^2}{2 \cdot m} , \\ x = v_q \cdot \Delta t \end{cases} \quad (2.16)$$

где  $h$  - начальная координата центра тяжести частицы 1

Выразив  $\Delta t$  через  $x$  получим:

$$y = h - \frac{R \cdot x^2}{2 \cdot m \cdot v_q^2} . \quad (2.17)$$

Выразим величину  $R$  через уравнение 2.6 и переписав формулу 2.17, получим:

$$y = h - \frac{\left( k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_q^2}{r} \right) \cdot x^2}{2 \cdot v_q^2} . \quad (2.18)$$

Окончательно неравенство 2.14 примет вид:

$$r - \sqrt{r^2 - AB^2} \geq h - \frac{\left( k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_q^2}{r} \right) \cdot x^2}{2 \cdot v_q^2} . \quad (2.19)$$

Рассмотрим, как влияет форма отверстий на максимальный размер частиц  $d_{\max}$ , способных пройти через отверстие решета. Выразив величину  $h$  как  $\frac{d_{\max}}{2}$ , получим выражение, описывающее зависимость размера частиц, способных покинуть дробильную камеру, от продольного размера отверстия:

$$d_{\max} \leq \frac{\left( k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_q^2}{r} \right) \cdot AB^2}{v_q^2} + 2 \cdot \left( r - \sqrt{r^2 - AB^2} \right) . \quad (2.20)$$

В решетках с прямоугольной формой отверстий параметр  $AB$  постоянен и равен  $L$ , а с круглой – меняется от 0 до  $D$  и описывается уравнением:

$$AB = 2 \cdot \sqrt{\left( \frac{D}{2} \right)^2 - Z^2} , \quad (2.21)$$

где  $D$  – диаметр круглого отверстия;  $Z$  – расстояние от центра отверстия до центра тяжести частицы по оси  $z$ .

Полагая, что в дробильной камере полидисперсный материал движется рыхлым слоем и вероятность попадания частиц в створ отверстия одинакова получим, что в решетках с круглыми отверстиями в центральной части будут проходить как крупные частицы, так и мелкие, в то время как у края будут эвакуироваться только мелкие частицы. Прямоугольная форма инвариантна, и по всей ширине отверстия созданы одинаковые условия для эвакуации частиц. Поэтому условием нахождения необходимого продольного размера  $L$  прямоугольного отверстия является получение дерти одинакового модуля помола как на решетках с прямоугольной, так и с круглой формой отверстий (рисунок 2.4).

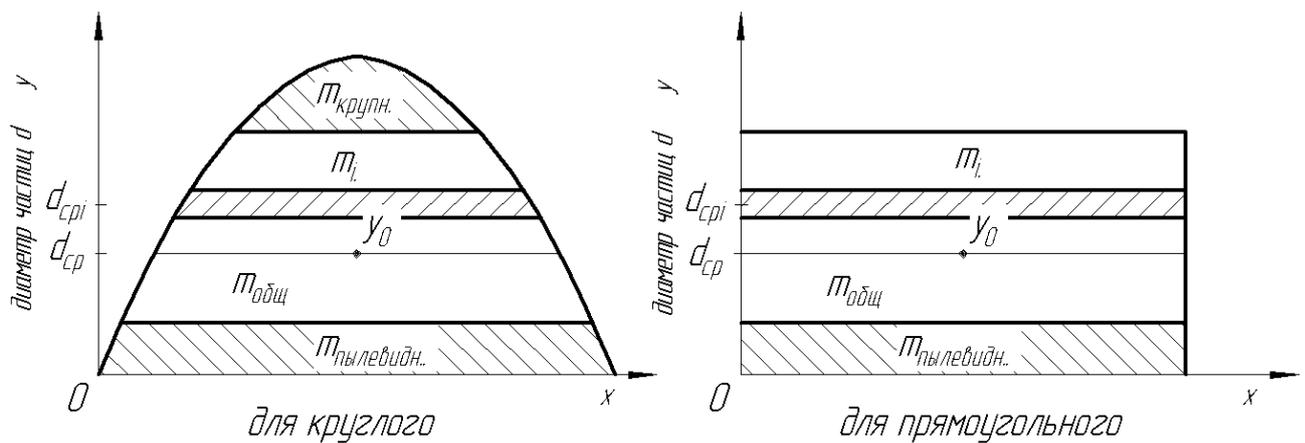


Рисунок 2.4 - Зависимости максимального диаметра частиц, способных покинуть дробильную камеру

Условием нахождения значения  $L$  эквивалентному диаметру круглого отверстия  $D$  является равенство координат центра тяжести фигур, массой  $m_{общ}$ , описываемых обоими графиками. Координата  $y_0$  фигуры, описываемой графиком и есть модуль помола. Ее найдем из выражения:

$$y_0 = \frac{1}{2} \frac{\int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} d_{\max}^2 dx}{\int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} d_{\max} dx}. \quad (2.22)$$

Проведя вычисления при помощи прикладной программы MathCad 14 получим, что при одинаковых условиях работы молотковой дробилки, с целью получения одинакового модуля помола, продольный размер  $L$  прямоугольного отверстия необходимо принять на 10,6 % меньшим чем диаметр круглого отверстия  $D$ .

Приняв допущения, описанные выше, а также задавшись начальными условиями ( $D=6\text{мм}$ ,  $L=5,36\text{ мм}$ ,  $k_n=8\text{ м}^{-1}$ ,  $v_a=32\text{ м/с}$ ,  $v_v=13\text{ м/с}$ ,  $r=0,25\text{ м}$ ), построим график распределения диаметра частиц для круглого и прямоугольного отверстий (рисунок 2.5). Для этого найдем процентное соотношение каждого класса  $R_i$  из уравнения:

$$R_i = \frac{m_i}{m_{\text{общ}}}, \quad (2.23)$$

где  $m_i$  - масса  $i$ -го класса,  $m_{\text{общ}}$  - масса навески.

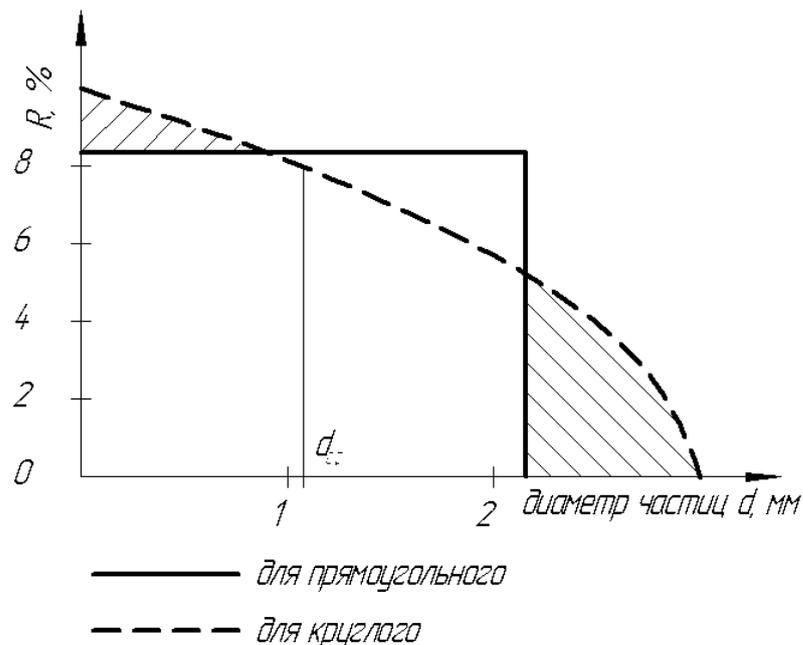


Рисунок 2.5 – Теоретическое распределение гранулометрического состава

Используя интегральное исчисление, получим:

$$R_i = \frac{\int_{d_{cp_i}^{\min}}^{d_{cp_i}^{\max}} d_{\max}^{inv} dy}{\int_0^{d_{\max}} d_{\max}^{inv} dy}, \quad (2.24)$$

где  $d_{cp_i}^{\min}$  и  $d_{cp_i}^{\max}$  - минимальный и максимальный диаметр частиц в  $i$ -том классе,  $d_{\max}$  - максимальный диаметр частиц,  $d_{\max}^{inv}$  - функция обратная  $d_{\max}$ .

Из графика на рисунке 2.5 видно, что гранулометрический состав продукта, получаемого при использовании решет с отверстиями прямоугольной формы, имеет меньшее содержание пылевидной фракции и крупных частиц. Это позволяет нам утверждать, что получаемая дерть имеет лучшее качество.

#### 2.4. Влияние прямоугольной формы отверстия на изменение площади поверхности корма и энергоёмкость измельчения

Исследуя влияние решета на энергоёмкость процесса, следует отметить функциональную связь между энергозатратами и степенью измельчения готового продукта. Поверхностная теория, сформулированная немецким ученым Риттингером, говорит о том, что работа  $A_R$ , затрачиваемая на процесс измельчения, прямо пропорциональна вновь образованной поверхности [98]:

$$A_R = f(\Delta S), \quad (2.25)$$

где  $\Delta S$  – площадь вновь образованной поверхности (приращение удельной площади поверхности).

$$\Delta S = \sum_{i=1}^n \Delta S_i, \quad (2.26)$$

где  $\Delta S_i$  - площадь поверхности частиц в  $i$ -том классе,  $n$  - количество классов.

$$\Delta S_i = 6 \cdot \frac{m_i}{\rho} \left( \frac{D_{\text{экв}} - d_{cp_i}}{D_{\text{экв}} \cdot d_{cp_i}} \right), \quad (2.27)$$

где  $d_{cp_i}$  и - средний диаметр частиц в  $i$ -том классе,  $D_{экв}$  - эквивалентный диаметр зерна.

Заменяв  $m_i$  на выражение 2.24, приняв допущения, описанные выше, а также задавшись начальными условиями, построим график распределения приращения поверхности в навеске массой 100 г. для круглого ( $D=6$ мм) и прямоугольного отверстий ( $F=5,36$  мм) (рисунок 2.6).

$$\Delta S_i = \frac{6}{\rho} \cdot \frac{\int_{d_{cp_i}^{\min}}^{d_{cp_i}^{\max}} d_{\max}^{inv} dy}{\int_0^{d_{\max}} d_{\max}^{inv} dy} \left( \frac{D_{экв} - d_{cp_i}}{D_{экв} \cdot d_{cp_i}} \right). \quad (2.28)$$

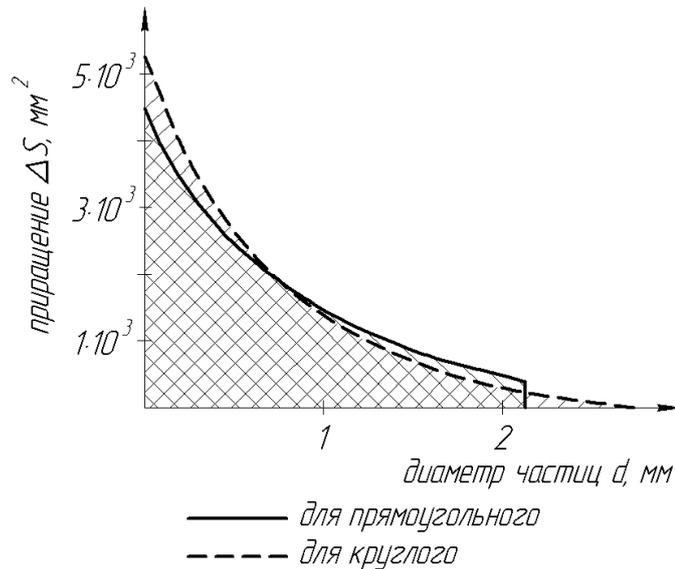


Рисунок 2.6 – Теоретическое распределение приращения поверхности.

Используя численный результат, полученный при помощи MathCad 14, а также график на рисунке 2.6, можно сказать, что суммарное приращение поверхности для материала, имеющего одинаковый модуль помола, полученного при использовании решет с круглыми отверстиями больше, нежели чем с прямоугольными на 11,2 %. Удельная энергоемкость  $q$  запишется как:

$$q = \frac{f(\Delta S)}{m_{общ}}, \quad (2.29)$$

Из выражения следует, что приращение поверхности влечет увеличение энергозатрат. Это значит, что удельная энергоёмкость измельчения на решетках с прямоугольными отверстиями, относительно решет с круглыми, снизится.

## **2.5. Влияние прямоугольной формы отверстия на энергоёмкость пневмотранспортирования**

Как было отмечено ранее, для эвакуации получаемого продукта, а иногда и для загрузки молотковой дробилки, в силу своего неоспоримого преимущества, широкое распространение получил вентилятор [73, 110, 112], устанавливаемый на валу ротора дробилки. Однако такое расположение ведет к перерасходу энергии, так как работа вентилятора в таком случае рассчитывается на максимальную производительность. Рассматривая вопрос оптимизации удельных энергозатрат необходимо рассматривать не только влияние вентилятора на рабочий процесс молотковой дробилки, но и влияние работы дробилки на работу вентилятора [76].

При измельчении происходит значительный прирост суммарной поверхности частиц. Степень измельчения  $\lambda$  характеризуется отношением среднего размера кусков исходного материала к среднему размеру частиц продукта измельчения [98]. В свою очередь при движении частицы в трубопроводе на всю ее поверхность будут действовать силы  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (рисунок 2.7).

$$\lambda = \frac{D_{\text{экв}}}{d_{\text{cp}}} \quad (2.30)$$

На рисунке 2.7 изображена схема движения измельченной частицы 2 в трубопроводе 1. Для определения сил  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , выделим на поверхности частицы элементарную площадку  $d\Sigma$ . Тогда при движении частицы в среде на площадку будут действовать нормальные  $p d\Sigma$  и касательные  $\tau d\Sigma$  силы. Спроецировав эти силы на оси координат и проинтегрировав по всей поверхности тела получим.

$$X = \int_{d\Sigma} (p \cdot \cos(p, x) + \tau \cdot \cos(\tau, x)) d\Sigma, \quad (2.31)$$

$$Y = \int_{d\Sigma} (p \cdot \cos(p, y) + \tau \cdot \cos(\tau, y)) d\Sigma, \quad (2.32)$$

$$Z = \int_{d\Sigma} (p \cdot \cos(p, z) + \tau \cdot \cos(\tau, z)) d\Sigma, \quad (2.33)$$

где  $X$  - сила лобового сопротивления;  $Y$  - подъёмная сила;  $Z$  - боковая сила. Как видно из выражений с увеличением степени измельчения растёт удельная поверхность частиц, а, следовательно, возрастает суммарное воздействие сил  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , отнесенное ко всему транспортируемому продукту, как следствие возрастает энергоёмкость пневматической транспортировки.

Предложенное выше аналитическое выражение очень сложно применить в практических вычислениях в силу неоднородности и полидисперсности материала.

В своих исследованиях авторы [104, 144] при исследовании обеспыливания производственных помещений получили следующую экспериментальную зависимость потерь давления в трубопроводе:

$$\Delta H = \lambda \frac{l_T}{D_T} \frac{\rho_a v_a^2}{2}, \quad (2.34)$$

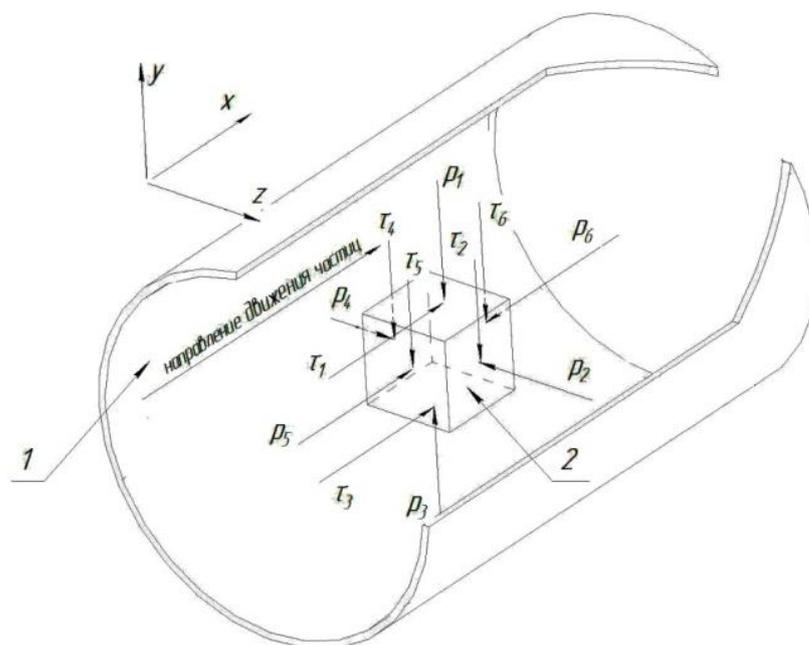
где  $\lambda$  - коэффициент, учитывающий затраты на транспортировку материала,  $l_T$  - длина трубопровода,  $D_T$  - диаметр трубопровода;  $\rho_a$  - плотность воздуха,  $v_a$  - скорость воздуха в трубопроводе.

$$\lambda = \lambda_o + \lambda_b + \lambda_e + \lambda_z, \quad (2.35)$$

где  $\lambda_o$  - к-т трения воздуха о стенки трубы,  $\lambda_b$  - к-т трения воздуха о материал,  $\lambda_e$  - к-т трения материала о стенки трубы,  $\lambda_z$  - к-т трения частиц друг о друга. Величинами  $\lambda_z$  и  $\lambda_e$  авторы [104, 144] в расчетах пренебрегают.

$$\lambda_b = \frac{4 \cdot G_M}{\pi \cdot D_T^2 \cdot v_a} \cdot \frac{\left(1 - \frac{v_n}{v_a}\right)^3}{\frac{v_n}{v_a} \cdot v_{вит}}, \quad (2.36)$$

где  $G_M$  - массовый расход материала;  $v_n$  - скорость материала;  $v_{вит}$  - скорость витания частиц материала.



1 - стенки трубопровода, 2 - измельченная частица

Рисунок 2.7 - Схема движения измельченной частицы в трубопроводе

Аналогичную зависимость получил Х. Гутзейт при расчете систем мельничного пневмотранспорта [165]. Однако авторы не выяснили как определить скорость материала  $v_n$  и скорость витания частиц для полидисперсного материала  $v_{вит}$ .

Из выражения 2.34 видно, что с уменьшением  $\lambda$  и  $v_v$  уменьшаются потери давления в пневмотранспортной системе. Однако из выражения 2.36 видно, что с уменьшением  $v_{вит}$  при неизменном режиме работы вентилятора возрастает коэффициент  $\lambda_b$ , входящий в  $\lambda$ . Это говорит о том, что мелкоизмельченные частицы, имеющие маленькую скорость витания  $v_{вит}$ , создают большие потери давления в трубопроводе.

Из приведенного теоретического обоснования можно сделать вывод, что зависимости 2.31-2.33 показывают, что на каждую поверхность частицы, движущейся в трубопроводе действуют силы X, Y и Z. С уменьшением модуля помола, возрастает степень измельчения, в результате чего растет суммарная поверхность,

и как следствие увеличивается суммарное воздействие сил  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , отнесенное ко всему транспортируемому продукту. Как видно из графика на рисунке 2.6, суммарная площадь поверхности дерти, получаемой при измельчении зерна на решетках с круглыми отверстиями больше чем на прямоугольных. Как следствие возрастут и затраты со стороны вентилятора на его транспортировку.

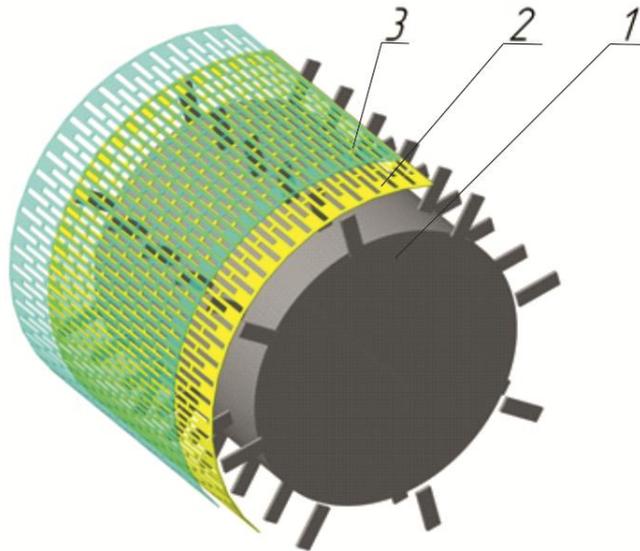
Кроме того, с уменьшением модуля помола частиц уменьшается их скорость витания [145], как следствие увеличивается показатель  $\lambda_6$ , что увеличивает потери давления в трубопроводе. Поэтому с целью уменьшения энергоемкости процесса пневмотранспортирования необходимо с уменьшением модуля помола частиц уменьшать скорость воздуха в трубопроводе путем уменьшения частоты вращения вентилятора.

## **2.6. Описание конструкции регулятора «живого» сечения**

Как было отмечено ранее, возросшие требования со стороны производителей кормов для животных требуют от машиностроителей производства таких молотковых дробилок, где время, затрачиваемое на изменение степени измельчения, было бы минимальным.

Для решения этой задачи предложено использовать регулятор «живого» сечения (рисунок 2.8), выполненный в виде неподвижного решета 2 и подвижного - 3, с возможностью перемещения по окружности дробильной камеры [75, 77, 78, 82, 117, 150, 151].

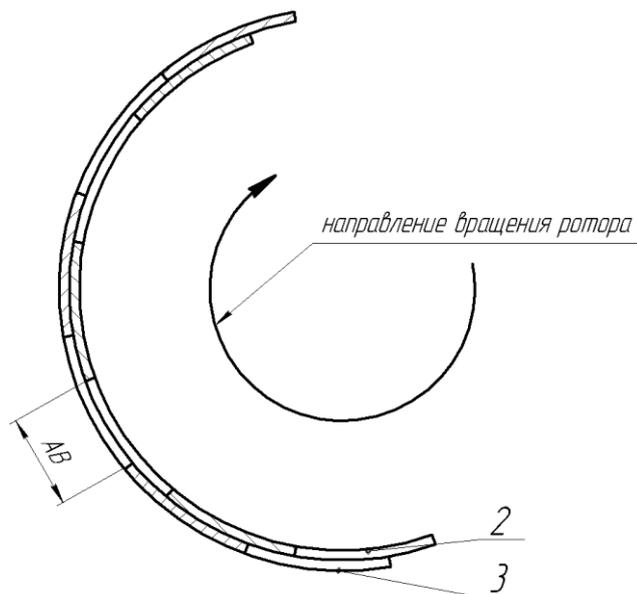
Перемещение подвижного решета 3 на требуемое расстояние относительно неподвижного 2 необходимо осуществлять вокруг дробильной камеры в направлении вращения ротора (рисунок 2.9) [151]. В противном случае произойдет набивание материала в отверстия решет, как следствие уменьшится производительность и ухудшится гранулометрический состав.



1 - молотковый ротор; 2 - неподвижное решето; 3 - подвижное решето

Рисунок 2.8 - Схема расположения регулятора «живого» сечения

Перемещение решета 3 повлечет за собой изменение продольного размера «живого» сечения АВ, как следствие изменится средний размер частиц получаемого продукта. Использование предложенного конструктивного решения позволит бесступенчато изменять степень измельчения непосредственно в процессе работы молотковой дробилки, что позволит не останавливать технологическую линию. Кроме того, вместо комплекта решет необходимо использовать два решета.



1 - неподвижное решето; 2 - подвижное решето

Рисунок 2.9 - Схема перемещения решета

На основании теоретического обоснования можно утверждать, что за счет отверстий прямоугольной формы получаемый продукт будет иметь более выравненный гранулометрический состав с меньшим содержанием пылевидной фракции и крупных частиц по сравнению с отверстиями круглой формы. Ожидается увеличение производительности и снижение энергоемкости процесса измельчения по сравнению с серийно выпускаемой молотковой дробилкой.

### **2.7. Выводы и предложения по разделу**

1. Теоретический анализ использования решета с прямоугольной формой отверстия выявил широкие возможности по улучшению качества продукта, уменьшению пылевидной фракции, снижению содержания целых и неизмельченных зерен, а также снижению энергоемкости процесса измельчения.
2. С целью улучшения эксплуатационных характеристик молотковой дробилки и повышения ее коэффициента использования предложено использовать регулятор «живого» сечения, позволяющий при использовании двух решет бесступенчато регулировать степень измельчения и получать продукт с заданным модулем помола.
3. Выявлена целесообразность изменения режима работы вентилятора дробилки в зависимости от модуля помола получаемого продукта.
4. С целью подтверждения теоретических высказываний необходимо провести экспериментальные исследования.

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

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

В соответствии с поставленными целями и задачами исследования разработана программа экспериментальных исследований, которая включает:

1. Разработка конструктивно-технологической схемы экспериментальной молотковой дробилки;
2. Выбор критериев оптимизации;
3. Подбор измерительных приборов и аппаратуры;
4. Выполнение экспериментальных исследований;
5. Исследование влияния конструктивно-технологических параметров дробилки зерна на качественно-количественные показатели процесса измельчения и определение оптимальных значений.

#### **3.2. Приборы, устройства и оборудование для исследования рабочего процесса дробилки**

Для получения объективной информации о результатах эксперимента необходимо правильно подобрать средства измерения (далее СИ). При их выборе учитывали совокупность метрологических (цена деления, погрешность, пределы измерения, измерительное усилие), эксплуатационных и экономических показателей, к которым относятся: массовость (повторяемость измеряемых размеров) и доступность их для контроля; стоимость и надежность СИ, метод измерения; время, затрачиваемое на настройку и процесс измерения; масса, габаритные размеры, рабочая нагрузка; жесткость объекта контроля, шероховатость его поверхности; режим работы; а также различные цели контрольно-измерительных операций [127].

В ходе эксперимента использовали прямые измерения, состоящие в том, что искомое значение величины находят из опытных данных путем экспериментального сравнения, а также косвенные измерения, т. е. когда искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, найденными прямыми измерениями [128].

В соответствии с рекомендациями, изложенными в [127, 148] средства измерения подбирали с учетом безошибочности контроля и их стоимости. Этот выбор осуществлялся как метод оптимизации по критериям точности (классу точности  $\gamma$  или абсолютной предельной погрешности  $\Delta_{СИ}$ ) СИ, его стоимости  $C_{СИ}$  и достоверности измерения. Целевая функция  $G$ , определяющая максимум достоверности и минимум стоимости при оптимальном классе точности, имеет вид:

$$G = \min \left[ \frac{D}{D_0} + \frac{C}{C_0} \right], \quad (3.1)$$

где  $\frac{D}{D_0}$  и  $\frac{C}{C_0}$  - относительные значения соответственно достоверности измерения и стоимости СИ;  $D = 1 - P_{Н.з.}$  и  $C_0$  - соответственно максимальные значения достоверности измерения и стоимости СИ или:

$$G = \min \left[ \frac{P_{Н.з.}}{P_{Н.з.0}} + \frac{C}{C_0} \right], \quad (3.2)$$

где  $\frac{P_{Н.з.}}{P_{Н.з.0}}$  - относительная и максимальная вероятности неверного заключения.

При косвенном измерении, если принять, что каждый из аргументов одинаково влияет на общую погрешность, то общая абсолютная ( $\Delta y_\Sigma$ ) и относительная ( $\Delta_\Sigma^*$ ) погрешности определения функции могут быть найдены с помощью выражений:

$$\Delta y_\Sigma = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^k (\Delta y_i)^2}, \quad (3.3)$$

$$\Delta_{\Sigma}^* = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^k (\Delta_{yi}^*)^2} . \quad (3.4)$$

С целью получения достоверных данных в ходе подготовки к проведению эксперимента проводились мероприятия, позволяющие исключить появление систематических ошибок. Данную цель достигали путем проверки и тарировки измерительных приборов.

Учитывая вышесказанное, для проведения эксперимента использовались измерительные приборы, регистрирующая и регулирующая аппаратура, представленные в таблице 3.1

Таблица 3.1 - Измерительные приборы, регистрирующая и регулирующая аппаратура, применяемые при проведении эксперимента

Наименование	Марка	Кл. точности	Предел измерения	Назначение
Комплект измерительный	К 505	0,5	С тр. тока до 360 кВт	Измерение мощности
Трансформатор тока	Т-0,66(М)	0,5	до 50 А до 100 А	Измерение приборами больших значений силы тока
Весы платформенные	ВТ8908-200УС	средний (III)	0,1 - 200 кг	Определение массы измельчаемого материала
Весы лабораторные	Vibra SJ 620	высокий (II)	0,5 – 620 г	Определение массы проб и остатка на ситах
Ситовой классификатор	У1-ЕРЛ	-	до 100 г	Рассев проб
Секундомер	СОС пр-26-2-000	высокий (II)	0,2 с – 60 мин	Регистрация временных интервалов
Частотный преобразователь	Веспер Е2-8300	0,5	до 400 Гц	Изменение частоты питающей электросети
Цифровой лазерный тахометр	AR926	0,5	от 2,5 до 99 999 мин <sup>-1</sup>	Измерение частоты вращения вала электродвигателя

### 3.3. Экспериментальная установка для исследования процесса измельчения зерна

Проанализировав работу молотковой дробилки, можно сказать, что с изменением режима работы дробилки меняются параметры получаемой дерти, как следствие следует изменять режим работы вентилятора.

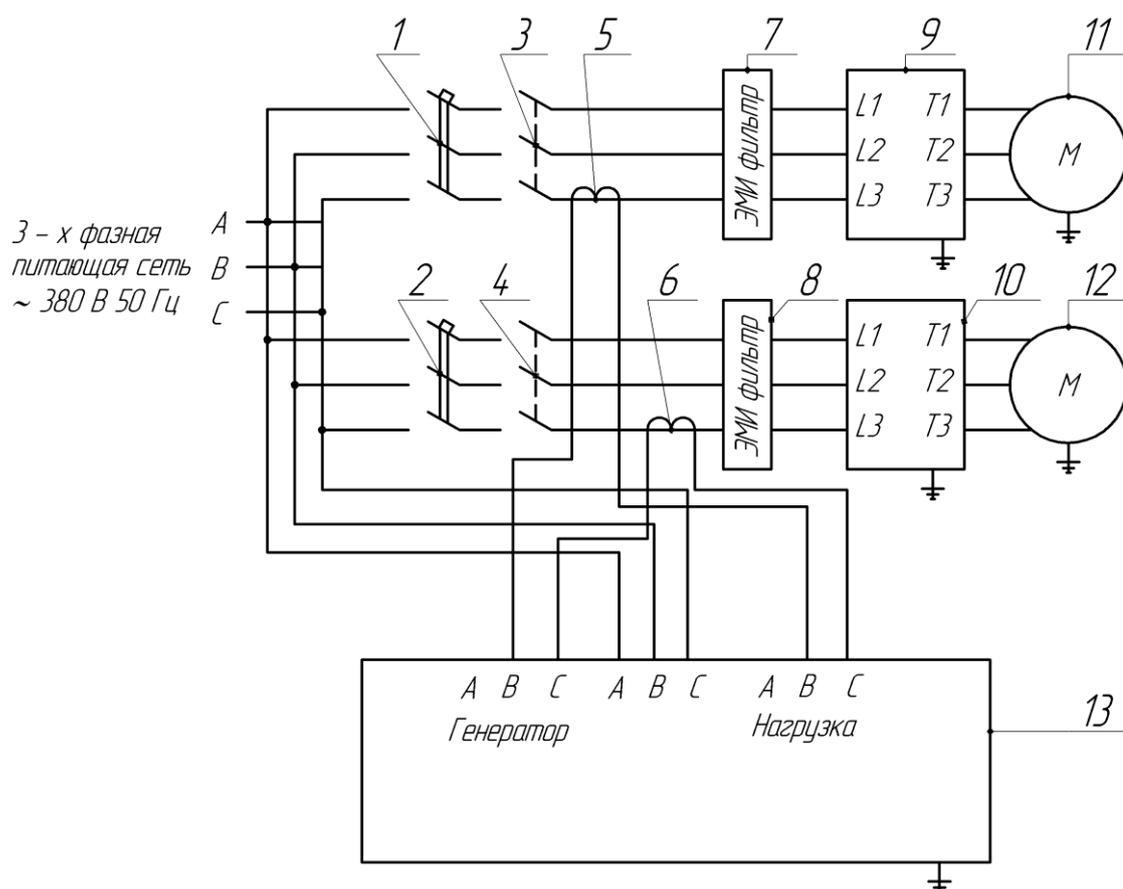
Учитывая вышесказанное, нами была изготовлена экспериментальная установка (рисунок 3.1) на базе молотковой дробилки КДУ-2,0, имеющейся в крестьянском хозяйстве «Искра», которая используется для измельчения зерна с целью скармливания животным и продажи продукта населению.



1 - дробильная камера; 2 - приемный бункер; 3 - бункер накопитель; 4 - вентилятор; 5,7 - щит управления электродвигателем дробилки и вентилятора; 6,8 - частотный преобразователь; 9 - измерительный комплекс К-505

Рисунок 3.1 - Экспериментальная установка

Принцип работы экспериментальной установки следующий: зерно засыпается в приемный бункер 2, откуда оно самотеком попадает в дробильную камеру 1. Запуск электродвигателя дробилки осуществляется аппаратурой, расположенной в щите 5, а регулировка частоты вращения частотным преобразователем 6. Измельченный продукт эвакуируется из дробильной камеры и транспортируется в бункер-накопитель 3 вентилятором 4. Запуск электродвигателя вентилятора осуществляется аппаратурой, расположенной в щите 7, а регулировка частоты вращения частотным преобразователем 8. Значения силы тока и напряжения измерялись измерительным комплексом 9. Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки изображена на рисунке 3.2



1, 2 – автоматический выключатель; 3, 4 – магнитный пускатель; 5, 6 – трансформатор тока; 7, 8 – ЭМИ фильтр; 9, 10 – частотный преобразователь; 11, 12 – электродвигатель; 13 – измерительный комплекс К 505

Рисунок 3.2 – Схема электрическая принципиальная

На рисунке 3.3 изображен регулятор «живого» сечения, установленный в дробильной камере. Для наглядности приемный патрубок был снят.



Рисунок 3.3 - Регулятор «живого» сечения в дробильной камере

Регулировку степени измельчения производили путем перемещения подвижного решета по окружности дробильной камеры вдоль неподвижного. До совмещения отверстий (рисунок 3.4), которые были выполнены симметрично с обеих сторон решета. После совмещения нужных отверстий происходила их совместная фиксация крепежным элементом.

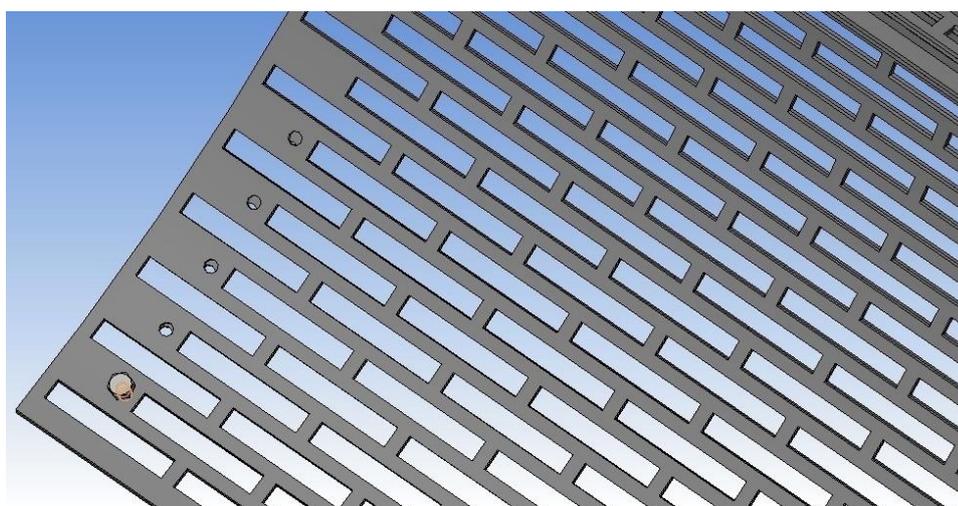


Рисунок 3.4 - Выставление заданного продольного размера «живого» сечения

В ходе эксперимента производили измельчение ячменя сорта «Урса» соответствующего ГОСТ 28672-90 [31]. Краткая характеристика представлена в таблице 3.2

Таблица 3.2 - Краткие характеристики измельчаемого ячменя

Наименование показателя	Единица измерения	Численное значение
Влажность	%	13,4
Натурный вес	г/л	730
Сорная примесь в том числе: минеральная зерновая	%	1,4 отсутствует 1,4
Эквивалентный диаметр	мм	4,0

### 3.4. Определение основных показателей работы экспериментальной установки

При определении мощности на валу электродвигателя необходимо учитывать суммарную мощность потерь энергии в асинхронном двигателе  $\Delta P_{ДВ}$  при частотном регулировании его скорости [12, 84, 122]. В связи с этим авторы предлагают формулу для расчета.

$$\Delta P_{ДВ} = \Delta P_{1.М} + \Delta P_{2.М} + \Delta P_{1.С.Г.} + \Delta P_{1.С.В.} + \Delta P_{МЕХ} + \Delta P_{ДОБ}, \quad (3.5)$$

где  $\Delta P_{1.М}$  и  $\Delta P_{2.М}$  - потери в меди обмоток статора и ротора соответственно;

$\Delta P_{1.С.Г.}$  и  $\Delta P_{1.С.В.}$  - потери на гистерезис и вихревые токи в стали статора;

$\Delta P_{МЕХ}$  - механические потери;

$\Delta P_{ДОБ}$  - добавочные потери.

Используя математическую модель оптимальной системы электропривода, [84] получили график зависимости КПД и  $\cos\varphi$  асинхронного двигателя в зависимости от загрузки (рисунки 3.5, 3.6).

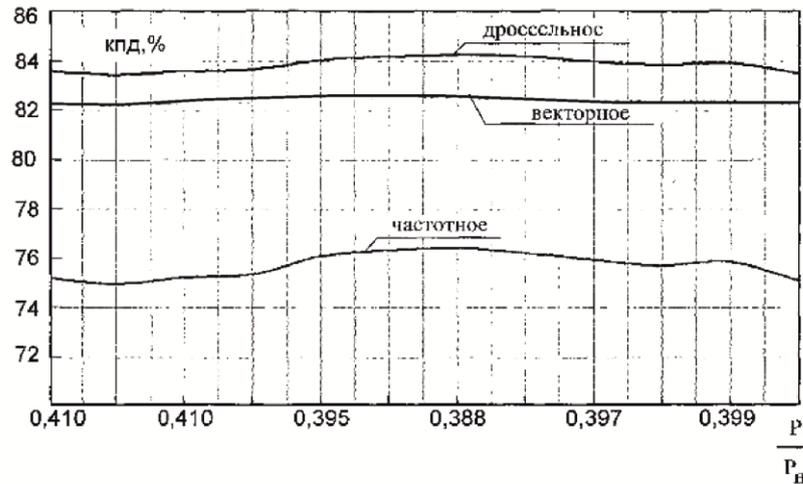


Рисунок 3.5 - Зависимости КПД электродвигателя от загрузки при различных системах управления

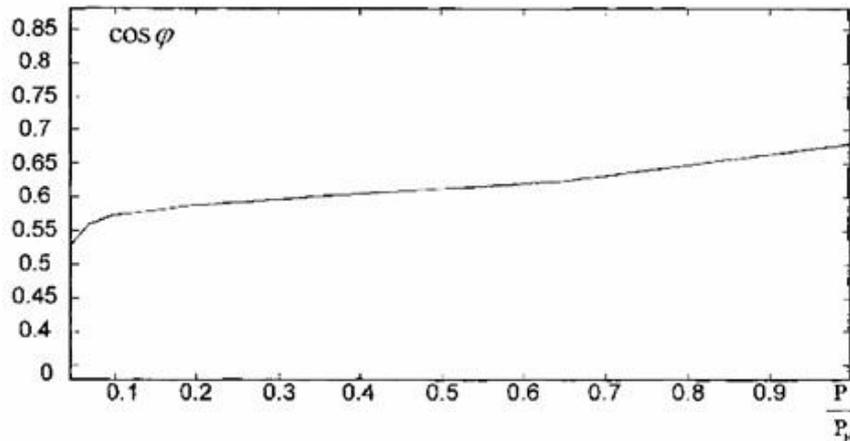


Рисунок 3.6 - Зависимость  $\cos \varphi$  от загрузки электродвигателя при векторном режиме управления

Эффективную мощность на валу ротора дробилки  $P_{эф.д.}$  определяли по формуле:

$$P_{эф.д.} = P_{эл.д.} \cdot \eta_{пер}, \quad (3.6)$$

где  $P_{эл.д.}$  - мощность на валу электродвигателя дробилки;  $\eta_{пер}$  - КПД передачи. Мощность на валу электродвигателя определяли по формуле:

$$P_{эл.д.} = \sqrt{3} \cdot U_{дв} \cdot I_{дв} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{эд} \cdot \eta_{ч}, \quad (3.7)$$

где  $U_{дв}$  и  $I_{дв}$  - напряжение и ток в обмотках электродвигателя;

$\cos\varphi$  - коэффициент мощности;

$\eta_{\text{эд}}$  - КПД электродвигателя;

$\eta_{\text{ч}}$  - КПД частотного преобразователя.

Значения  $\eta_{\text{эд}}$  и  $\cos\varphi$  принимаются в соответствии с графиками на рисунках 3.4 и 3.5 для определенной загрузки электродвигателя.

Полезную мощность  $P_{\text{пол.д}}$  на валу ротора дробилки определяли по формуле

$$P_{\text{пол.д}} = P_{\text{эф.д}} - P_{\text{х.х.д}}, \quad (3.8)$$

где  $P_{\text{х.х.д}}$  - мощность, затрачиваемая на холостой ход.

$$P_{\text{х.х.д}} = P_{\text{эл.д}} \cdot \eta_{\text{пер}}, \quad (3.9)$$

Мощность электродвигателя  $P_{\text{эл.д}}$  при холостом ходе определяем по методике, описанной выше.

Величины удельных энергозатрат эффективной  $q_{\text{эф.д}}$  и полезной  $q_{\text{пол.д}}$  мощностей, отнесенных к единице массы готового продукта, определяли по формулам.

$$q_{\text{эф.д}} = \frac{P_{\text{эф.д}}}{Q}, \quad (3.10)$$

$$q_{\text{пол.д}} = \frac{P_{\text{пол.д}}}{Q}, \quad (3.11)$$

где  $Q$  - пропускная способность дробилки.

Пропускную способность дробилки определяли путем взвешивания измельченного материала, полученного при установившемся режиме за определенный промежуток времени.

$$Q = \frac{G}{t}, \quad (3.12)$$

где  $G$  - масса измельченного материала,  $t$  - промежуток времени.

Удельную энергоемкость с учетом степени измельчения определяли по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{эф.д}} = \frac{q_{\text{эф.д}}}{\lambda}, \quad (3.13)$$

$$\mathcal{E}_{пол.д} = \frac{q_{пол.д}}{\lambda}, \quad (3.14)$$

где  $\lambda$  - степень измельчения.

$$\lambda = \frac{D_{экв}}{M}, \quad (3.15)$$

где  $D_{экв}$  - эквивалентный диаметр зерна, т. е такой диаметр, при котором объем шара равен действительному объему зерна [16, 98],  $M$  - средневзвешенный размер частиц готового продукта (модуль помола) [26].

$$D_{экв} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_z}{\pi}}, \quad (3.16)$$

где  $V_z$  - объем зерна, определяемый погружением 100 зерен в мерный цилиндр, частично заполненный жидкостью (бензин, толуол, ксилол) [98, 102].

$$M = \frac{\frac{d_0 + d_1}{2} \cdot P_0 + \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot P_1 + \dots + \frac{d_n + d_{n+1}}{2} \cdot P_n}{P_0 + P_1 + \dots + P_n}, \quad (3.17)$$

где  $d_0, d_1, \dots, d_n$  - диаметр отверстий сит, а  $P_0, P_1, \dots, P_n$  - остаток на ситах.

При лабораторных исследованиях был подобран набор сит со следующими диаметрами отверстий - 0,2; 0,8; 1,0; 1,3; 1,5; 2,0; 3,0 мм.

Влажность зерна определяли согласно существующей методике [25].

Процентное содержание частиц, оставшихся на дне ситового классификатора  $m_0$ , определяли по выражению:

$$m_0 = \frac{P_0}{\sum P_i} \cdot 100\%. \quad (3.18)$$

Аналогично определяли содержание остатка на сите с диаметром отверстий 3 мм  $m_3$ .

Коэффициент живого сечения решета  $K_{ж.с.}$  определяли по выражению:

$$K_{ж.с.} = \frac{F_{отв.}}{F_P}, \quad (3.19)$$

где  $F_{отв.}$  - площадь отверстий решета,  $F_P$  - общая площадь поверхности решета.

Окружную скорость молотков определяли по выражению:

$$v_M = R \cdot \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad (3.20)$$

где  $R$  - расстояние от центра вращения до концов молотков;  $n$  - частота вращения вала ротора,  $\text{мин}^{-1}$ .

### 3.5. Определение однородности гранулометрического состава.

Оценку однородности гранулометрического состава готового продукта осуществляли интерпретацией суммарных интегральных помольных характеристик [98], а также вычислением средневзвешенного квадратического отклонения  $\sigma$  и коэффициента вариации  $v$  по формулам:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - d_{cp})^2 \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}}, \quad (3.21)$$

$$v = \frac{1}{M} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - d_{cp})^2 \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}} \cdot 100\%. \quad (3.22)$$

Процентное содержание частиц по классам определяли так же как остаток на сите с диаметром отверстий 3 мм.

### 3.6. Оценка влияния работы вентилятора на энергоемкость процесса

В ходе теоретического анализа было выяснено, что с увеличением суммарной площади поверхности частиц возрастают энергозатраты на пневмотранспортировку. Кроме того, для измельченного продукта, имеющего определенную степень

измельчения, требуется определенная частота вращения вентилятора пневмотранспортной системы. Вентилятор должен обеспечивать бесперебойную транспортировку продукта в бункер-накопитель при минимальных энергозатратах.

С целью оценки влияния работы вентилятора на энергоемкость процесса определяли величины удельных энергозатрат эффективной  $q_{эф.в.}$  и полезной  $q_{пол.в}$  мощностей, отнесенных к единице массы готового продукта по методике, описанной выше.

Значения  $P_{эф.в}$  и  $P_{пол.в}$  определяли аналогично.

Общие удельные энергозатраты  $\mathcal{E}_{эф.общ}$  определяли путем сложения энергозатрат отнесенных к ротору дробилки и ротору вентилятора.

### 3.7. Методика проведения многофакторного эксперимента

Всякое исследование, направленное на отыскание математической модели процесса, распадается на следующие стадии [71]:

1. предварительное изучение объекта;
2. отсеивающий эксперимент;
3. составление плана основного эксперимента;
4. проведение эксперимента;
5. составление математической модели процесса:
  - 5.1.определение коэффициентов регрессии;
  - 5.2.проверка адекватности полученной модели;
  - 5.3.анализ этой модели.

Экспериментальное исследование рабочего процесса молотковой дробилки, а также определение оптимального сочетания параметров и режимов работы проводили методом планирования эксперимента. Планирование эксперимента как

средство построения математических моделей различных процессов позволяет сократить время и средства на проведение эксперимента, а также позволяет повысить производительность труда исследователя [1].

В общем случае подходящей моделью, описывающей объект исследования, является «черный ящик» (рисунок 3.7), введенный в кибернетике с целью изучения сложности. Объекту исследования соответствует прямоугольник. Выходы, обозначаемые стрелками, выходящими из прямоугольника, обозначаются параметры оптимизации. Стрелки, входящие в прямоугольник, - входы, - соответствуют возможным воздействиям на объект. В терминологии планирования эксперимента входы называют факторами [1].

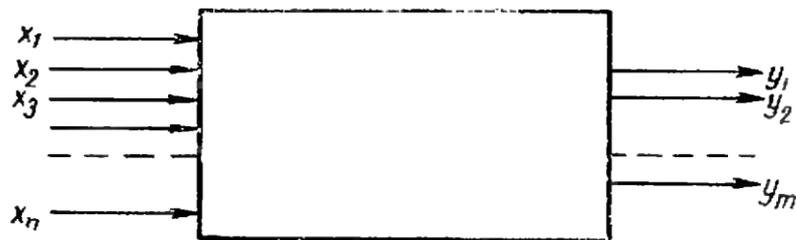


Рисунок 3.7 - Схема черного ящика

Фактором мы будем называть измеренную переменную величину, принимающую в некоторый момент времени некоторое определенное значение и соответствующую одному из возможных способов воздействия на объект исследования [1]. При выборе факторов и уровней варьирования во внимание принимались данные многочисленных работ по исследованию рабочего процесса молотковой дробилки. Кроме того, к совокупности факторов предъявлялись требования: отсутствие корреляции между любыми двумя факторами, а также их совместимость.

Перед проведением опыта, необходимо построить матрицу планирования эксперимента. В общем случае эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, называют полным факторным. Число опытов полного факторного эксперимента  $N$  составляет

$$N = n^k \cdot p, \quad (3.23)$$

где  $n$  - количество уровней варьирования;

$k$  - количество факторов;

$p$  - количество повторений;

Исследуя многочисленные работы по изучению процесса разрушения сыпучих продуктов [18, 79, 91, 143, 157] пришли к выводу, что факторы оптимизации описываются полиномом второй степени в виде уравнения регрессии.

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2. \quad (3.24)$$

Для отыскания коэффициентов этого уравнения необходимо каждый фактор варьировать, как минимум, на трех уровнях. Поэтому при проведении опыта в трехкратной повторности для четырех факторов получаем количество опытов  $N=243$ .

С целью уменьшения количества опытов в XX веке были разработаны планы второго порядка. В последнее время широкое распространение получил план Бокса-Бенкена, который является разновидностью симметричного некомпозиционного плана. Этот план является удобным при практическом применении, способствует упрощению и удешевлению эксперимента [8]. Так при использовании плана Бокса-Бенкена количество опытов сокращается с 243 до 81. Фрагмент матрицы плана представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Фрагмент матрицы эксперимента по плану Бокса-Бенкена

Номер опыта в плане	Репл.	Блок	Фактор №1	Фактор №2	Фактор №3	Фактор №4
1	1	1	-1	-1	0	0
2	1	1	1	-1	0	0
3	1	1	-1	1	0	0
4	1	1	1	1	0	0
5	1	1	0	0	-1	-1
6	1	1	0	0	1	-1
7	1	1	0	0	-1	1
8	1	1	0	0	1	1
9	1	1	0	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...
79	3	3	0	-1	0	1
80	3	3	0	1	0	1
81	3	3	0	0	0	0

В работе [159] показано, что эти планы для четырех и семи факторов являются ротатабельными, т. е. обеспечивают одинаковую точность предсказания для точек, равно удаленных от центра плана по любому направлению. Иными словами, дисперсии предсказания инвариантны (независимы) относительно вращения координатных осей факторного пространства. Кроме того, эти планы почти равномерны, т. е. в некоторой области вокруг центра плана дисперсия предсказания остается примерно постоянной [114].

Чтобы исключить влияние систематических ошибок, вызванных внешними условиями (например, неточным контролем, изменение влажности, участие разных людей в проведении эксперимента и др.), опыты, заданные планом эксперимента, проводили блоками и рандомизировано во времени [95]. При планировании и обработке результатов эксперимента использовали программу Statistica 10.

### **3.8. Выбор параметров оптимизации**

При оценке измельчения сыпучих кормов с целью их скармливания животным рассматривают множество показателей, которые характеризуют целесообразность, эффективность, безопасность и множество других составляющих технологического процесса. Необходимо отметить, что нет основного критерия, по которому можно судить об эффективности молотковой дробилки. Нередко стремление максимально улучшить один приводит к ухудшению других, поэтому рассматривая оптимизацию в комплексе, необходимо учитывать несколько показателей.

Многие научные исследования при оценке эффективности работы молотковой дробилки большое внимание уделяют ее производительности, определяемой по выражению 3.12, а также удельным энергозатратам - по 3.13, 3.14

Некоторые исследователи выделяют среди факторов окружную скорость ротора по концам молотков.

Не стоит забывать и о показателях, регламентируемых ГОСТом, а именно остаток на ситах с диаметром отверстий 3 и 5 мм. Нередко стремление уменьшить

этот показатель приводит к возрастанию пылевидной фракции, а это негативно сказывается на продуктивности животных и безопасности технологического процесса в целом.

Учитывая анализ работ по оптимизации конструктивно режимных параметров молотковой дробилки, в качестве параметров оптимизации приняли следующие показатели:

1. Удельную энергоёмкость с учетом степени измельчения  $\mathcal{E}_{эф.общ}$ , кВт·ч/т·ед.ст.изм;
2. Модуль помола  $M$ , мм;
3. Содержание пылевидной фракции  $m_0$ , %;
4. Остаток на сите с диаметром отверстий 3 мм  $m_3$ , %.

В качестве факторов, оказывающих наибольшее влияние на процесс выбраны:

1. Продольный размер отверстия «живого» сечения  $l$ , мм;
2. Окружная скорость молотков  $v_m$ , м/с;
3. Частота вращения вентилятора  $n$ , мин<sup>-1</sup>;
4. Подача материала  $Q$ , кг/с.

С целью выявления оптимального типоразмера решет проводили предварительный эксперимент (таблица 3.4). В качестве критерия оптимальности был выбран модуль помола, соответствующий требованиям [5, 23, 24, 27, 28, 29, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 40, 105, 160].

Таблица 3.4 – Исходные данные для предварительного эксперимента

Типоразмер отверстий решет, мм	Продольный размер «живого» сечения, мм	Окр. скорость молотков, м/с	Частота вращения вентилятора, мин <sup>-1</sup>	Подача материала, кг/с
4x30	1,5 - 4	70	2860	0,63
6x35	2-6			
8x40	3-8			
10x45	4-10			

По результатам предварительного эксперимента, с целью выявления математической зависимости влияния режимов работы молотковой дробилки на параметры оптимизации использовали четырехфакторный эксперимент, построенный по плану Бокса-Бенкена. Уровни варьирования устанавливались таким образом, чтобы обеспечивалась бесперебойная работа молотковой дробилки, а также в соответствии с рекомендациями авторов [1, 3, 98] (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Исходные данные для эксперимента по плану Бокса-Бенкена

Наименование фактора	Кодированное обозначение	Ед. изм	Уровни варьирования		
			-1	0	1
Продольный размер «живого» сечения	$l$	мм	3	5	8
Окружная скорость молотков	$v_m$	м/с	63	70	77
Частота вращения вентилятора	$n$	мин <sup>-1</sup>	2574	2860	3146
Подача зерна	$Q$	кг/с	0,45	0,63	0,81

### 3.9. Статистическая оценка результатов эксперимента

После проведения опыта результаты заносили в таблицу. Обработку результатов опытных данных начинали с определения грубых ошибок среди результатов повторностей опыта. При статистическом анализе экспериментальных данных для процессов, негативный результат которых не создает ситуаций, опасных для жизни людей или утраты больших материальных ценностей, доверительную вероятность обычно принимают равной  $P=0,95$  [43].

Для определения грубых ошибок существует довольно быстрый метод «по размаху», основанный на оценке максимальных различий полученных результатов [43]. Анализ по этому методу проводили в такой последовательности:

1. Располагают результаты  $y_k$  в упорядоченный ряд, в котором минимальному результату присваивается номер первый ( $y_l$ ), а максимальному наибольший - ( $y_m$ );
2. Если результатом, вызывающим сомнение, будет  $y_m$ , рассчитывают отношение:

$$\alpha = \frac{y_m - y_{(m-1)}}{y_m - y_1}, \quad (3.25)$$

если сомнительным результатом будет  $y_l$  - отношение:

$$\alpha = \frac{y_2 - y_1}{y_m - y_1}, \quad (3.26)$$

3. При заданном уровне значимости  $q$  и известном числе повторностей  $m$  находят табличное значение критерия  $\alpha_T$ ;

4. Если  $\alpha > \alpha_T$ , то «подозреваемый» результат является ошибочным и его следует исключить.

После исключения грубой ошибки находят по таблице новую величину  $\alpha_T$  и решают судьбу следующего «подозреваемого» результата, сравнивая  $\alpha_T$  и рассчитанный для него  $\alpha$ .

Если есть основание полагать, что 2 наибольших (или 2 наименьших) результата являются промахами, то их можно выявить в один прием, используя соответствующий столбец таблицы для определения  $\alpha_T$  и рассчитывая  $\alpha$  по формулам [43]:

$$\alpha = \frac{y_m - y_{(m-2)}}{y_m - y_1}, \quad (3.27)$$

или

$$\alpha = \frac{y_3 - y_1}{y_m - y_1}, \quad (3.28)$$

После исключения грубых ошибок проводим дополнительные опыты.

Результат проверки на наличие грубых ошибок проводим в программе MS Excel 2007 (приложение 4)

После проведения опыта проводили проверку воспроизводимости опытов [71]. Так как число повторностей каждого опыта  $m_u = m$  и число степеней свободы  $f_u = const$ , то проверку воспроизводимости будем проводить при помощи критерия Кохрена  $G_{kp}$ .

В каждом из  $N$  опытов (номер опыта  $u=1...N$ ) оценка дисперсии единичного результата равна:

$$S^2(y_{uk}) = \frac{\sum_{k=1}^{m_u} (y_{uk} - \bar{y}_u)^2}{m_u - 1}, \quad (3.29)$$

где  $m_u$  - число повторностей  $u$ -го опыта

Вычисляют отношение максимальной дисперсии  $S^2(y_{uk})_{\max}$  к сумме всех дисперсий и сравнивают это отношение с величиной критерия Кохрена  $G_{kp}(P; f; N)$ ..

$$G = \frac{S^2(y_{uk})_{\max}}{\sum_{u=1}^N S^2(y_{uk})}. \quad (3.30)$$

Если  $G \leq G_{kp}$ , то опыт воспроизводим.

После определения воспроизводимости опыта приступим к определению коэффициентов уравнения регрессии. Так как план Бокса-Бенкена симметричен, то расчет коэффициентов модели, когда опыты дублируются, можно вести по формулам:

$$b_0 = c_1 \sum_{u=1}^N y_u - c_2 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 y_u, \quad (3.31)$$

$$b_i = c_3 \sum_{u=1}^N x_{i_u} y_u, \quad (3.32)$$

$$b_{ij} = c_4 \sum_{u=1}^N (x_i x_j)_u y_u, \quad (3.33)$$

$$b_{ii} = c_5 \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 y_u + c_6 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 y_u - c_2 \sum_{u=1}^N y_u, \quad (3.34)$$

а их дисперсии, среднеквадратичные ошибки и ковариации - по формулам:

$$S_{b_0}^2 = c_1 S_y^2, \quad (3.35)$$

$$S_{b_0} = c_1 S_y, \quad (3.36)$$

$$S_{b_i}^2 = c_3 S_y^2, \quad (3.37)$$

$$S_{b_i} = c_8 S_y, \quad (3.38)$$

$$S_{b_{ij}}^2 = c_4 S_y^2, \quad (3.39)$$

$$S_{b_{ij}} = c_9 S_y, \quad (3.40)$$

$$S_{b_{ii}}^2 = (c_5 + c_6) S_y^2, \quad (3.41)$$

$$S_{b_{ii}} = c_{10} S_y, \quad (3.42)$$

$$\text{cov}_{b_0 b_{ii}} = -c_2 S_y^2, \quad (3.43)$$

$$\text{cov}_{b_{ij} b_{ii}} = c_6 S_y^2, \quad (3.44)$$

где коэффициенты  $c_i$  берем из справочных таблиц.

С целью определения значимости коэффициентов уравнения регрессии находили доверительные интервалы по формуле:

$$\Delta_{b_i} = t_{\alpha; f_1} \cdot S_{b_i}, \quad (3.45)$$

где  $t$  - критерий Стьюдента, берется при заданном уровне значимости  $\alpha$  и числе степеней свободы  $f_1$ . Затем сравниваем абсолютное значение коэффициента с вычисленным доверительным интервалом. Коэффициент считается значимым, если выполняется условие [114]:

$$|b_i| \geq \Delta_{b_i}. \quad (3.46)$$

При переходе от значений факторов в кодированном масштабе ( $x_i$ ) к значению факторов в натуральном ( $X_i$ ) воспользуемся формулой:

$$X_i = X_{i_0} + \Delta X_i \cdot x_i. \quad (3.47)$$

Следующим этапом обработки данных является проверка гипотезы об адекватности модели, т. е. поиск ответа на вопрос, можно ли использовать полученное уравнение или необходима более сложная модель [114]. Гипотезу об адекватности проверим с помощью F-критерия (критерия Фишера). Его расчетное значение определяли по формуле:

$$F_{f_2: f_1}^{расч} = \frac{SS_{неад}^2}{S_y^2}, \quad (3.48)$$

где  $S_y^2$  - дисперсия опыта, определенная с  $f_1$  - числом степеней свободы,  $SS_{неад}^2$  - дисперсия неадекватности,  $f_2$  - число степеней свободы, определяемое как:

$$f_2 = N - k', \quad (3.49)$$

$$SS_{неад}^2 = \sum_{u=1}^N n_u \left( y_{u_{расч}} - \bar{y}_{u_{экс}} \right)^2, \quad (3.50)$$

где  $N$  - число опытов плана;  $k'$  - число оставленных коэффициентов уравнения (включая  $b_0$ ),  $\bar{y}_{u_{экс}}$  - среднее из  $n_u$  дублей  $u$ -го опыта.

Гипотезу об адекватности уравнения принимаем только в том случае, когда выполняется условие:

$$F_{расч} \leq F_{табл}. \quad (3.51)$$

Для статистической обработки результатов эксперимента использовали программу Statistica 10. По результатам обработки были получены уравнения регрессии, позволяющие при помощи программы Mathcad 14 оптимизировать процесс измельчения.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 4.1. Предварительные испытания регулятора «живого» сечения

С целью определения оптимального типоразмера ячейки решета нами был проведен предварительный эксперимент на серийно выпускаемой молотковой дробилке КДУ-2,0 (рисунок 4.1), в ходе которого предстояло выяснить, с каким типоразмером решет обеспечивается получение продукта, соответствующего по гранулометрическому составу требованиям ГОСТа и исследованиям авторов по кормлению сельскохозяйственных животных [5, 23, 24, 27, 28, 29, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 40, 105, 160]. Была произведена замена молотков дробильного ротора на новые. Загрузка дробилки осуществлялась самотеком из загрузочного бункера, уровень зерна в котором для чистоты эксперимента поддерживался на постоянном уровне.



Рисунок 4.1 - Молотковая дробилка КДУ-2,0

В комплекте с заводской дробилкой поставляются решета с диаметром отверстий 4, 5, 6, 8, 10 мм и толщиной 3 мм, поэтому для проведения эксперимента было изготовлено четыре комплекта регуляторов «живого» сечения с размерами ячеек 4x30 мм, 6x35 мм, 8x40 мм, 10x45 мм и толщиной 3 мм.

На рисунке 4.2 представлен общий вид регулятора «живого» сечения со стороны приемной горловины (для наглядности фотографии горловина была демонтирована) в сравнении со стандартным решетом с круглыми отверстиями.



Рисунок 4.2 - Стандартное решето с круглыми отверстиями в сравнении с регулятором «живого» сечения

Продольный размер регулятора «живого» сечение с ячейкой 6x35 мм, 8x40 мм и 10x45 мм имел шаг изменения 1 мм, а 4x30 - 0,5 мм. Размер ячеек выбирался в соответствии с конструктивной жесткостью решета, рекомендованной заводом изготовителем и рассчитывался при помощи компьютерной программы SolidWorks 2010. При этом размер перегородок выбирался минимально возможным с целью обеспечения максимальной площади «живого» сечения.

В ходе эксперимента производили измельчение ячменя, имеющего параметры, представленные в таблице 3.2. Регулировочной рукояткой была выставлена подача равная 0,63 кг/с. Опыт производили рандомизировано с трехкратной по-

вторностью в соответствии с планом предварительного эксперимента (приложение 1). По результатам опытов был построен график зависимости модуля помола частиц  $M$  и коэффициента  $K_{ж.с.}$  от установленного продольного размера «живого» сечения для решет с ячейкой 8x40 мм (рисунок 4.3). Для остальных решет значения экспериментальных и расчетных данных представлены в таблице (приложение 1).

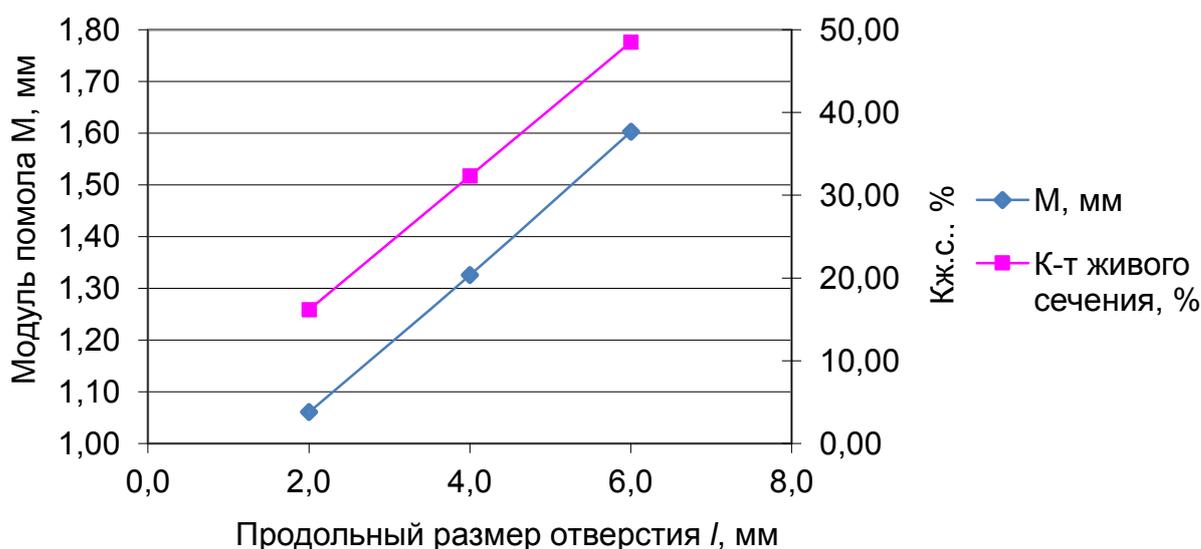


Рисунок 4.3 - График изменения  $d_{ср}$  и  $K_{ж.с.}$  от продольного размера отверстий

Из экспериментальных данных видно, что при изменении продольного размера «живого» сечения решет с ячейкой 4x30 мм от минимального 1,5 мм до максимального 4 мм, коэффициент «живого» сечения  $K_{ж.с.}$  изменялся от 18,37 до 49,98 %, а модуль помола от 0,95 мм до 1,34 мм. Для регулятора с ячейкой 6x35 мм продольный размер «живого» сечения варьировался от 2 мм до 6 мм, коэффициент  $K_{ж.с.}$  изменялся от 16,16 до 48,49 %, а модуль помола от 1,06 мм до 1,60 мм. Для регулятора с ячейкой 8x40 мм продольный размер «живого» сечения меняли в интервале 3-8 мм, при этом коэффициент  $K_{ж.с.}$  менялся в диапазоне 17,49-46,65%, а модуль помола составил при этом 1,22 - 1,99 мм. Для регулятора с ячейкой 10x45 мм модуль помола и коэффициент «живого» сечения менялся в диапазоне 1,41-2,33 мм и 16,43 и 45,13 % соответственно при продольном размере «живого» сечения от 4 мм до 10 мм.

Дерть, получаемая при использовании регулятора «живого» сечения с типоразмером ячеек 4x30 и 6x35 мм по гранулометрическому составу малопригодна при кормлении сельскохозяйственной птицы. В то же время дерть, полученная при постановке решет с ячейкой 10x45 мм, имеет повышенное содержание недоизмельченных частиц и целых зерен, поэтому ее нельзя использовать при кормлении свиней, овец, лошадей и КРС. Дерть, получаемая при установке регулятора с ячейкой 8x40 мм пригодна для кормления всех сельскохозяйственных животных в соответствии с требованиями [5, 23, 24, 27, 28, 29, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 40, 105, 160]. Поэтому дальнейшие исследования будем проводить при установке этого регулятора «живого» сечения.

## **4.2. Сравнение работы регулятора «живого» сечения и решет с круглыми отверстиями**

### **4.2.1. Качественная оценка получаемого продукта**

В ходе теоретического исследования было выяснено, что дерть, полученная при использовании решет с прямоугольными отверстиями, имеет лучшее качество по сравнению с дертью, полученной при использовании решет с круглыми отверстиями. Поэтому предстояло на экспериментальной установке оценить изменение качества получаемого продукта. Для этого использовали решета из поставляемого комплекта с диаметром отверстий 4, 6 и 8 мм и регулятор «живого» сечения с ячейкой 8x40 мм. Подача материала, окружная скорость молотков и частота вращения вентилятора были установлены на нулевом уровне плана эксперимента и равнялись 0,63 кг/с, 70 м/с и 2860 мин<sup>-1</sup> соответственно.

Анализируя содержание пылевидной фракции в готовом продукте (рисунок 4.4), следует отметить, что при использовании регулятора «живого» сечения предложенной конструкции содержание пылевидной фракции ниже чем при использовании решет с круглыми отверстиями.

При использовании регулятора «живого» сечения с продольным размером 3 мм дерть с модулем помола 1,22 мм имела 5,13 % пылевидной фракции, в то время как при использовании решета с круглыми отверстиями диаметром 4 мм – 8,59 %. Аналогичные тенденции наблюдаются и при использовании решет с диаметром отверстий 6 и 8 мм. Так модуль помола составил 1,56 и 1,90 мм, а содержание пылевидной фракции 5,46 % и 3,69 % соответственно, что превышает значения, полученные при использовании регулятора «живого» сечения.

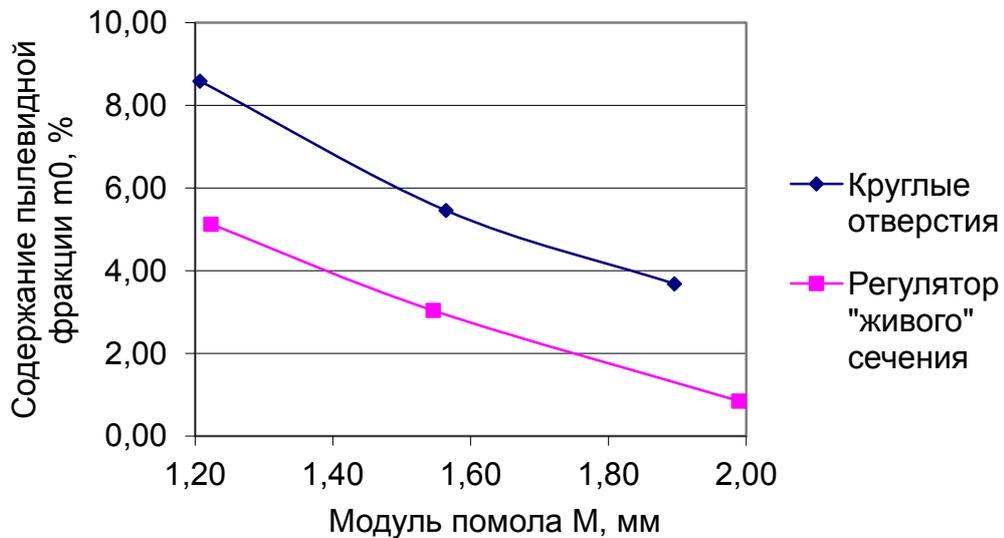


Рисунок 4.4 – Содержание пылевидной фракции

Аналогичная тенденция наблюдается и при анализе недоизмельченных частиц, характеризуемых остатком на сите с диаметром отверстий 3 мм (рисунок 4.5). Так при использовании решет с круглыми отверстиями диаметром 4 мм остаток на сите с диаметром отверстий 3 мм составил 1,80 %, а при постановке решет с диаметром отверстий 6 и 8 мм – 3,86 и 6,25 % соответственно при модуле помола 1,21, 1,56 и 1,90 мм. При использовании регулятора «живого» сечения была получена дерть с модулями помола 1,22, 1,55 и 1,99 мм, в которой остаток на сите с диаметром отверстий 3 мм составил 1,53, 3,50 и 6,69 % соответственно.

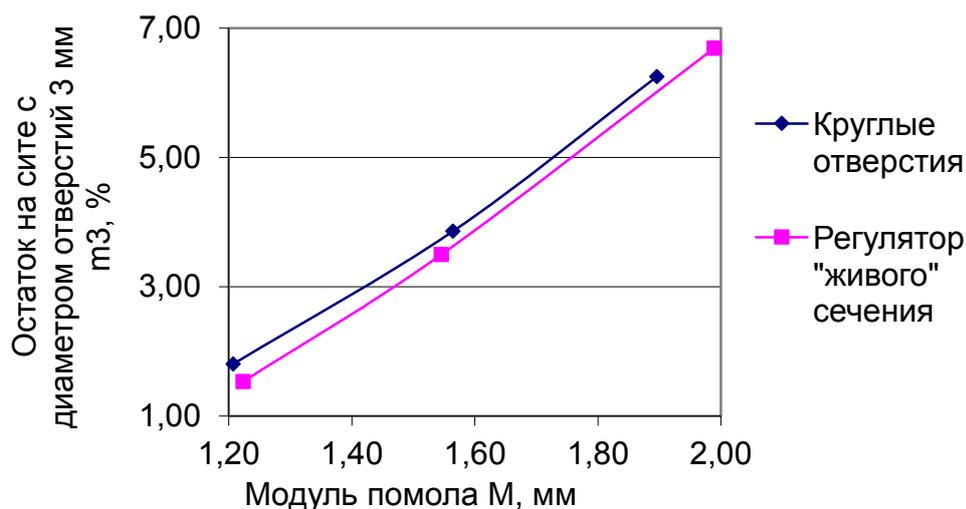


Рисунок 4.5 – Остаток на сите с диаметром отверстий 3 мм

Анализ суммарной помольной характеристики по плюсу (рисунок 4.6) говорит о том, что графики, построенные для дерти, полученной при использовании регулятора «живого» сечения имеют круто нисходящую траекторию в сравнении с графиками, построенными при использовании решет с круглыми отверстиями, что говорит о более выравненном гранулометрическом составе.

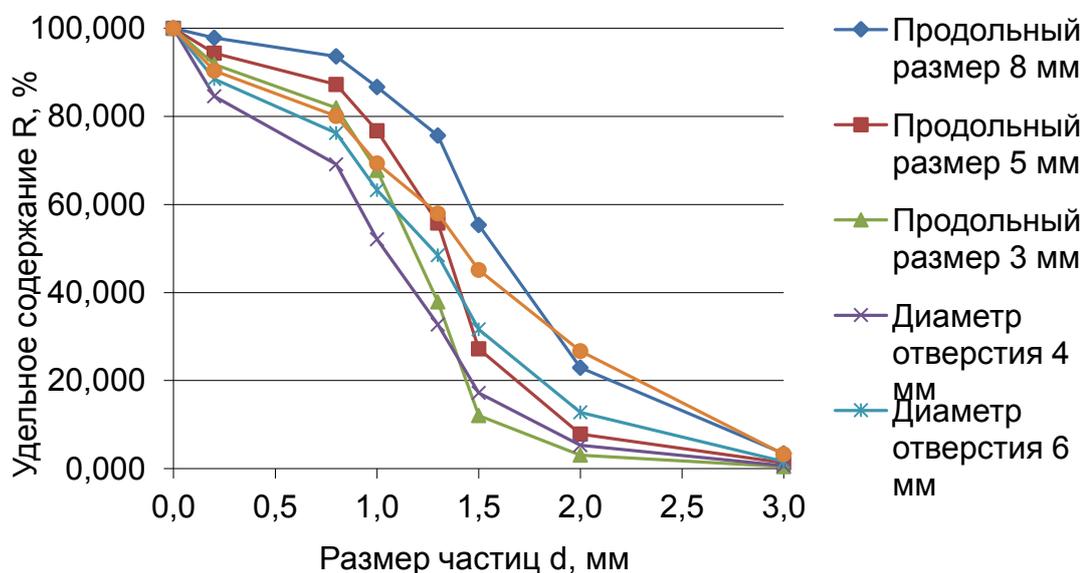


Рисунок 4.6 – Суммарная помольная характеристика по плюсу

Однородность продукта характеризуют графики средневзвешенного квадратического отклонения и коэффициента вариации. Анализируя зависимость разброса гранулометрического состава в готовом продукте (рисунок 4.7), следует отметить, что для дерти, полученной при использовании решет с круглыми отверстиями, коэффициент средневзвешенного квадратического отклонения выше. Так при модуле помола 1,21, 1,56 и 1,90 мм он составил 0,78, 0,86 и 0,88, в то время как при использовании регулятора «живого» сечения этот показатель составил 0,65, 0,74 и 0,72 для модуля помола 1,22, 1,55 и 1,99 мм соответственно.

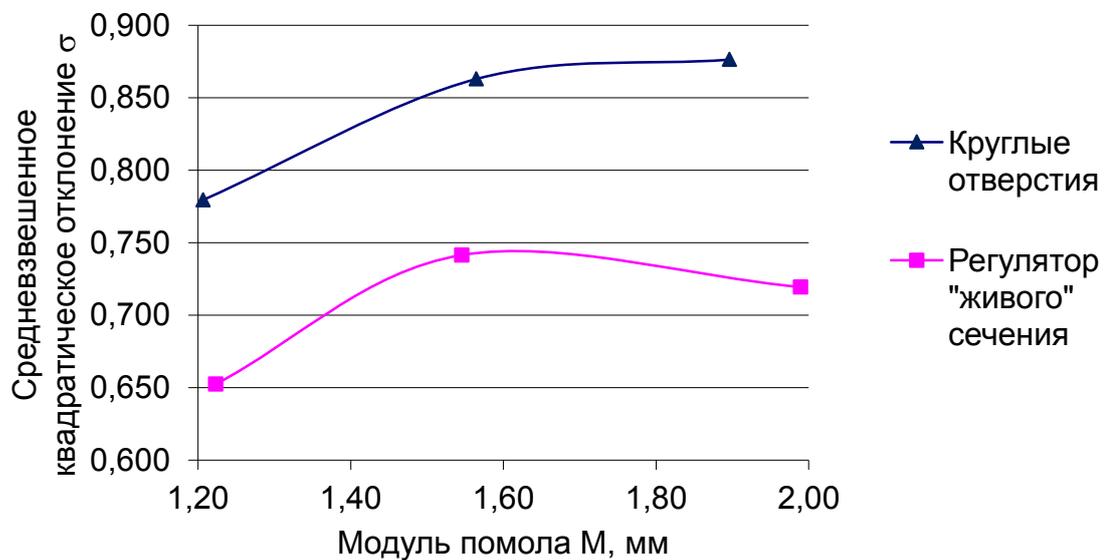


Рисунок 4.7 – Средневзвешенное квадратическое отклонение

Анализируя коэффициент вариации гранулометрического состава в готовом продукте, показывающий какую долю среднего значения составляет его разброс, (рисунок 4.8) следует отметить, что он составил для решет с круглыми отверстиями 64,6, 55,2 и 46,2 % при модуле помола 1,21, 1,56 и 1,90 мм, что выше значений, полученных при использовании регулятора «живого» сечения.

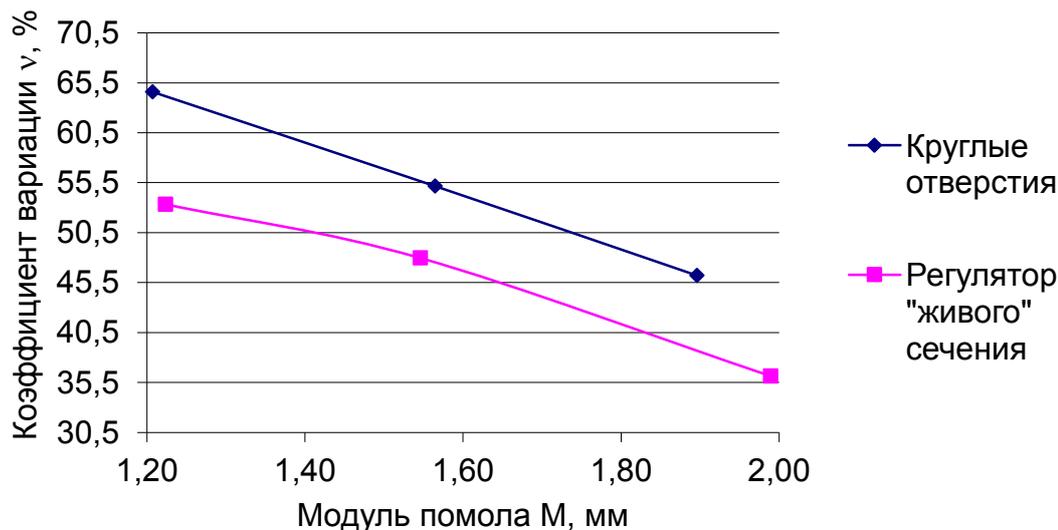


Рисунок 4.8 – Коэффициент вариации

Исходя из зависимостей, представленных на рисунках 4.4 и 4.5, можно сделать вывод, что дерть, оцененная содержанием пылевидной фракции и остатком на сите с диаметром отверстий 3 мм, полученная при использовании регулятора «живого» сечения имеет лучшее качество нежели если использовать решета с круглыми отверстиями. Кроме того, зависимости, представленные на рисунках 4.6, 4.7 и 4.8 говорят о том, что дерть имеет лучшую однородность, что положительно влияет на смешиваемость продукта, и в меньшей степени способствует его расслоению.

#### 4.2.2. Оценка энергоемкости процесса

В ходе теоретического исследования было выяснено, что дерть, получаемая при использовании решет с круглыми отверстиями, имеет большую площадь поверхности по сравнению с измельчением на решетках с прямоугольными отверстиями. Поэтому в ходе экспериментальных исследований предстояло выяснить, во сколько раз увеличивается площадь поверхности корма при использовании регулятора «живого» сечения и решет с круглыми отверстиями.

Приняв допущение, что частицы корма имеют шарообразную форму получим распределение приращения поверхности (рисунок 4.9). Из рисунка видно, что увеличение поверхности дерты при использовании регулятора «живого» сечения меньше, чем при использовании решет с круглыми отверстиями. Так при установленном продольном размере «живого» сечения 3 мм модуль помола составил 1,22 мм, а увеличение площади поверхности составило 5,82 раза. В то же время при использовании решет с круглыми отверстиями диаметром 4 мм модуль помола составил 1,21 мм, а увеличение площади поверхности составило 7,34 раза. Увеличение продольного размера «живого» сечения до 8 мм увеличивает модуль помола до 1,99 мм, а площадь поверхности при этом увеличивается в 2,73 раза. При использовании решет с круглыми отверстиями 8 мм модуль помола увеличивается до 1,90 мм, а площадь поверхности при этом увеличивается в 4,17 раза.

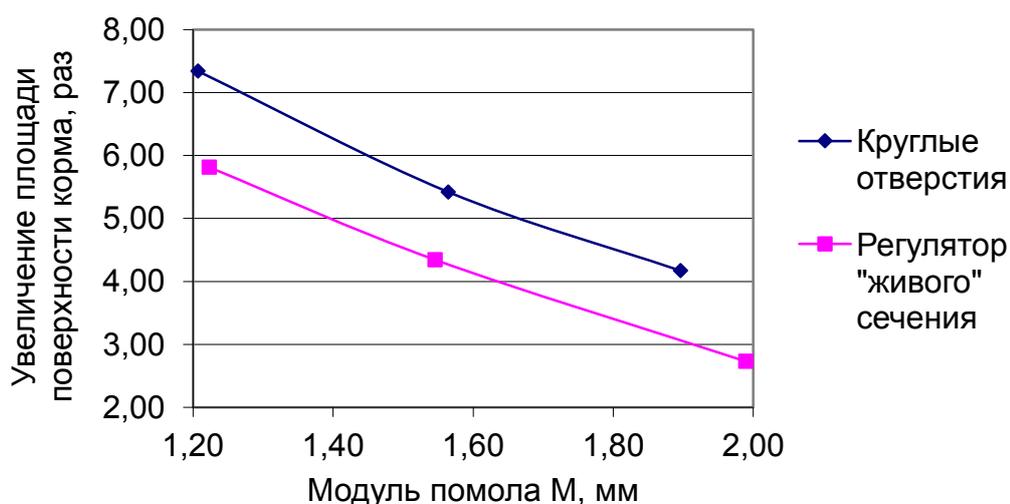


Рисунок 4.9 – Приращение поверхности дерты

Анализируя численные значения, а также графики на рисунке 4.9 следует сделать вывод, что дерть, получаемая при использовании регулятора «живого» сечения, имеет меньшее приращение поверхности.

В ходе теоретического исследования было выяснено, что энергия расходуется на приращение поверхности корма и пневмотранспортирование. С целью

оценки энергоэффективности предстояло сравнить удельную энергоемкость измельчения  $\mathcal{E}_{эф.д.}$  и пневмотранспортирования  $P_{эф.в.}$  при использовании регулятора «живого» сечения и решет с круглыми отверстиями.

Исследуя зависимости, представленные на рисунке 4.10, следует отметить, что удельная энергоемкость измельчения зерна с учетом степени измельчения  $\mathcal{E}_{эф.д.}$  при использовании решет с круглыми отверстиями диаметром 4, 6 и 8 мм составила 1,77, 2,10 и 2,42 кВт\*ч/т\*ед.ст.изм. для дерти с модулем помола 1,21, 1,56 и 1,90 мм соответственно. В то же время энергоемкость измельчения при использовании регулятора «живого» сечения с продольным размером 3, 5 и 8 мм составила 1,51, 1,77 и 2,28 кВт\*ч/т\*ед.ст.изм. при модуле помола 1,22, 1,55, 1,99 мм соответственно.

Анализ графиков, представленных на рисунке 4.10 показывает, что энергоемкость измельчения при использовании регулятора «живого» сечения, предложенной конструкции значительно ниже энергоемкости при использовании решет с круглыми отверстиями.

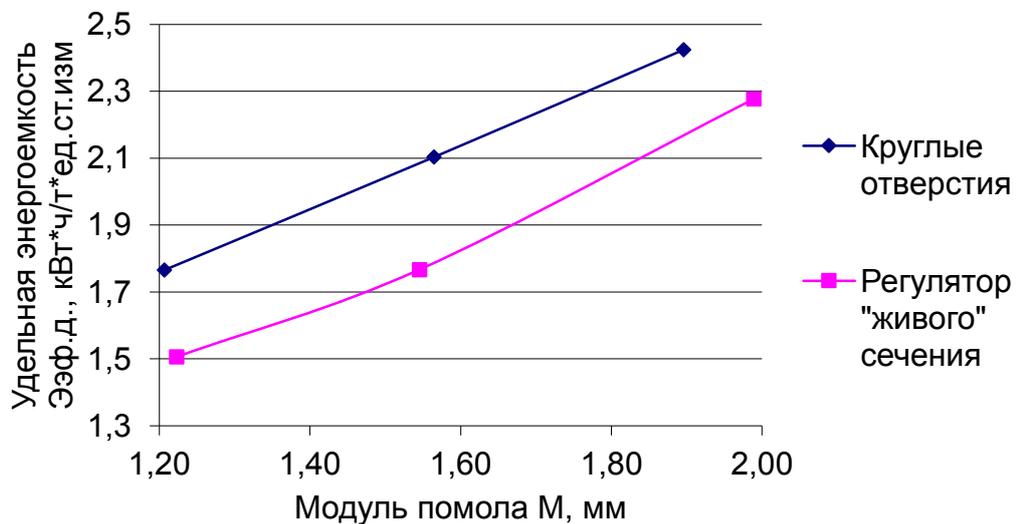


Рисунок 4.10 – Удельная энергоемкость измельчения  $\mathcal{E}_{эф.д.}$

Исследуя графики на рисунке 4.11 было выявлено, что мощность на валу вентилятора  $P_{эф.в.}$  при пневмотранспортировании дерти, полученной при использовании решет с круглыми отверстиями диаметром 4, 6 и 8 мм составила 7,01, 6,38 и

5,95 кВт для дерти с модулем помола 1,21, 1,56 и 1,90 мм соответственно. В то же время мощность пневмотранспортирования при использовании регулятора «живого» сечения с продольным размером 3, 5 и 8 мм составила 6,17, 5,89 и 5,42 кВт при модуле помола 1,22, 1,55, 1,99 мм соответственно.

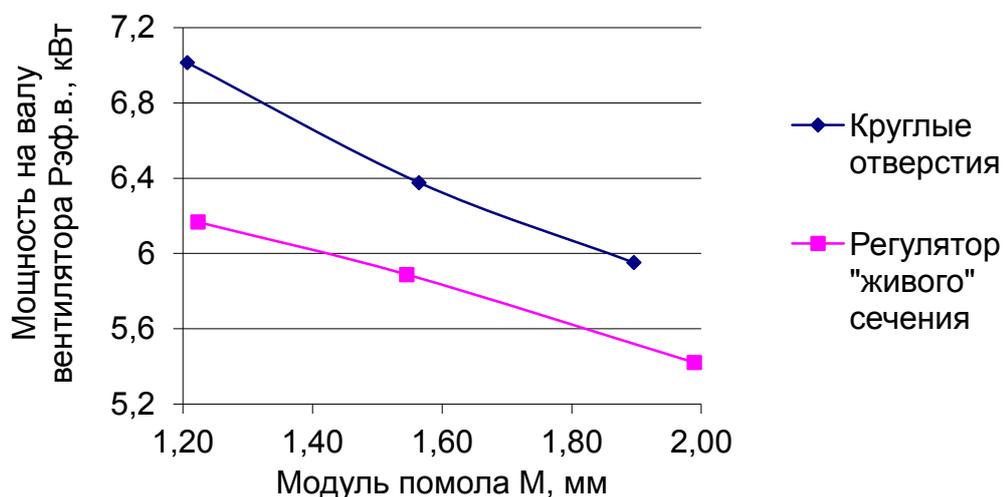


Рисунок 4.11 - Удельная энергоёмкость пневмотранспортирования  $P_{эф.в.}$

Экспериментальные зависимости, представленные на рисунке 4.10 подтверждают поверхностную теорию, сформулированную немецким ученым Риттингером, говорящую о том, что энергия, расходуемая на измельчение, идет на увеличение площади поверхности корма. Дерьт, характеризующаяся модулем помола, полученная при использовании решет с круглыми отверстиями имеет большую поверхность чем дерть, полученная при использовании регулятора «живого» сечения. Как следствие удельная энергоёмкость измельчения зерна при использовании регулятора «живого» сечения ниже. Кроме того, вследствие того, что ниже площадь поверхности корма, снижается и энергоёмкость процесса пневмотранспортирования. Полученные экспериментальные зависимости подтверждают теоретические исследования.

В своих исследованиях Филин В. М. пришел к выводу, что дерть с меньшим модулем помола имеет меньшую скорость витания [145], т. е. для ее эвакуации необходима меньшая скорость воздуха. Это дает нам право говорить о том, что для беспрепятственной эвакуации материала меньшего модуля помола в полной мере

достаточно меньшей частоты вращения вентилятора. Так снижение частоты вращения вентилятора с 3146 до 2546 мин<sup>-1</sup> при установленном продольном размере «живого» сечения 3 мм, окружной скорости молотков 70 м/с и подаче материала 0,63 кг/с снижает мощность на валу вентилятора с 8,83 до 4,83 кВт. При этом обеспечивается бесперебойная эвакуация материала. Регулировка частоты вращения вентилятора позволяет существенно изменить удельную энергоёмкость  $\mathcal{E}_{эф.общ}$ .

### 4.3. Зависимость параметров оптимизации от исследуемых факторов

С целью получения математической модели процесса измельчения зерна был реализован план эксперимента Бокса-Бенкена для четырех факторов (приложение 2). По экспериментальным данным при помощи программы Statistica 10 были получены коэффициенты уравнений регрессии (таблица 4.1)

Таблица 4.1 – Коэффициенты уравнений регрессии

	Коэффициенты уравнений регрессии			
	M	m3	m0	Ээф. общ.
Mean/Interc.	6,131288	226,8641	31,25205	22,3089
Block(1)	0,016156	0,051235	-0,043968	0,066376
Block(2)	-0,000729	0,237494	-0,090239	-0,043024
(1)Продольный размер "живого" сечения, мм(L)	0,488896	1,133806	-1,946502	0,675889
Продольный размер "живого" сечения, мм(Q)	-0,000107	-0,028165	0,068524	0,000141
(2)Окружная скорость молотков, м/с(L)	-0,080948	-4,911258	-0,429515	-0,081745
Окружная скорость молотков, м/с(Q)	0,000554	0,032206	0,002623	0,001184
(3)Частота вращения вентилятора, мин-1(L)	-0,001745	-0,032363	-0,002553	-0,013879
Частота вращения вентилятора, мин-1(Q)	0	0,000005	-0,000001	0,000003
(4)Подача, кг/с(L)	-0,009559	-11,42003	-16,81144	0,954919
Подача, кг/с(Q)	0,737763	11,46874	5,904346	9,153922
1L by 2L	-0,004236	-0,041559	-0,013935	-0,003404

продолжение таблицы 4.1

1L by 3L	0,000001	0,001273	0,000577	-0,000015
1L by 4L	-0,07046	-0,748679	-0,506963	-0,354741
2L by 3L	0,000001	0,000089	0,000006	-0,000013
2L by 4L	-0,009565	0,026836	0,156311	-0,055806
3L by 4L	-0,000261	-0,002446	0,001902	-0,003801

Результаты регрессионного анализа представлены в приложении 7. В приложении 8 представлены графики предсказанных и действительных значений. Исходя из анализа коэффициента детерминации, можно сделать вывод, что уравнения регрессии описывают процесс с достоверностью более 0,8, что соответствует принятым нормам.

Статистическая значимость и степень влияния каждого из факторов на зависимые переменные может быть представлена картами Парето. Стандартизированные эффекты характеризуют отличие вариации зависимой переменной, обусловленной вкладом данного фактора, от стандартной ошибки зависимой переменной. Карта построена в виде горизонтальной гистограммы, каждый столбец которой соответствует какому-либо фактору в линейной или квадратичной форме либо межфакторному взаимодействию. Чем больше длина столбца, тем больше влияние данного фактора на зависимую переменную отличается от влияния случайной ошибки эксперимента.

Исследуя карты Парето, следует отметить, что положительные значения коэффициента указывает на прямую зависимость, а отрицательные - на обратную. Так карта Парето стандартизированных эффектов для модуля помола (рисунок 4.12) говорит о том, что на модуль помола самое существенное влияние оказывает продольный размер «живого» сечения и окружная скорость молотков.

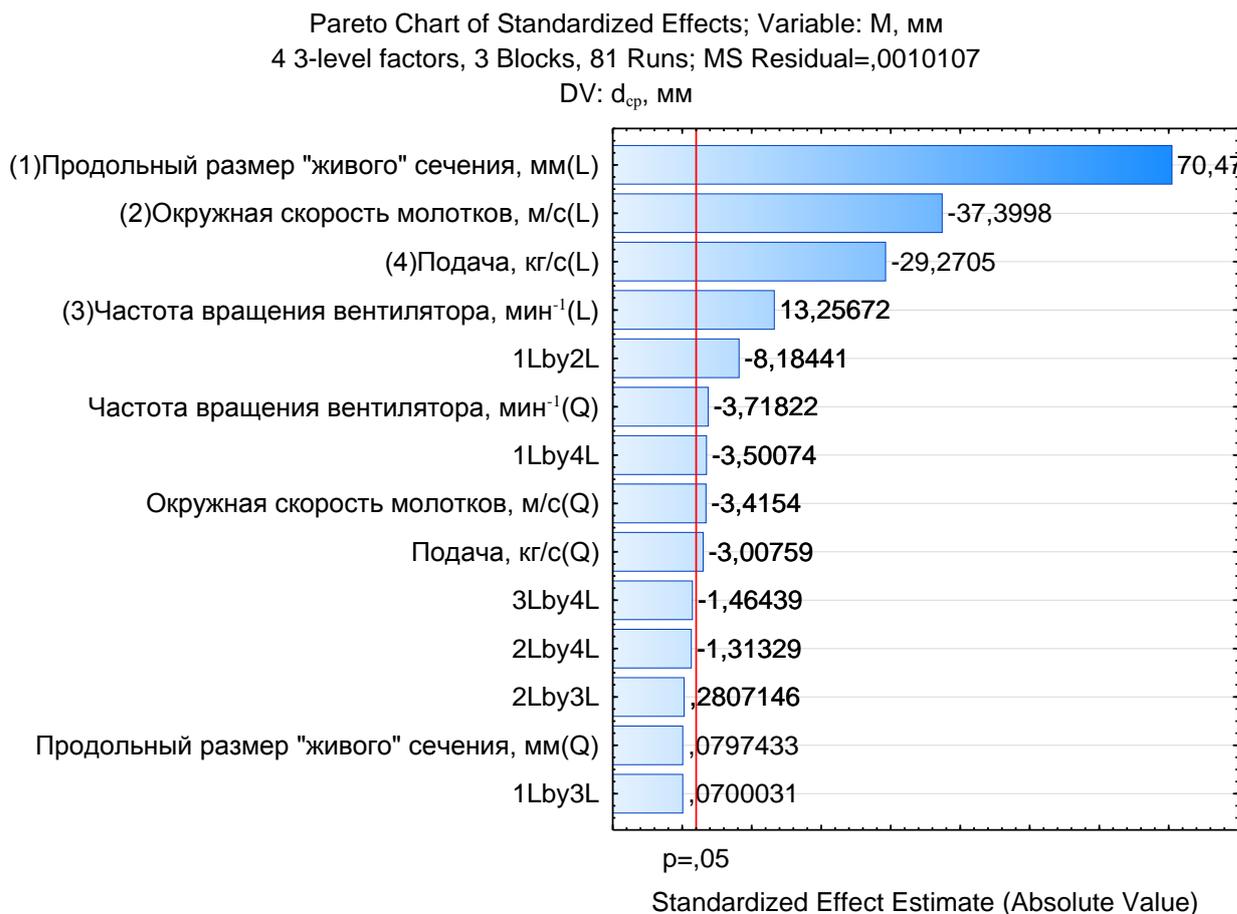


Рисунок 4.12 – Карта Парето стандартизированных эффектов для  $M$

Так при минимальной установленной скорости 63 м/с при продольном размере «живого» сечения 8 мм (при установленной частоте вращения вентилятора и подаче материала на нулевом уровне) модуль помола составил - 2,30 мм, при 5 мм - 1,78 мм, при 3 мм - 1,37 мм. Увеличение среднего размера частиц обусловлено тем, что уменьшилась скорость соударения молотков о частицы, а вместе с тем уменьшилось истирающее воздействие со стороны дек и скалывающее воздействие кромки отверстия решета. Кроме того, при увеличении окружной скорости до 77 м/с средневзвешенный размер частиц уменьшается. При продольном размере живого сечения 8 мм он составил - 1,75 мм, при 5 мм - 1,39 мм, при 3 мм - 1,11 мм.

Влияние подачи материала и частоты вращения вентилятора также приводит к изменению модуля помола, но в меньшей степени. Анализируя изменение модуля помола (при установленной частоте вращения вентилятора и окружной скорости молотков на нулевом уровне) при изменении подачи  $Q$  от 0,45 до 0,96 кг/с следует

сказать, что при продольном размере «живого» сечения 8 мм этот показатель уменьшился с 2,21 до 1,83 мм. В то же время при 5 мм это параметр варьировался в интервале 1,76-1,46 мм, а при 3 мм - 1,43-1,18 мм.

Анализ модуля помола, показал, что с увеличением скорости вращения вентилятора от 2574 до 3146 мин<sup>-1</sup> наблюдается увеличение размера частиц для любого установленного продольного размера «живого» сечения. Так при установленном продольном размере «живого» сечения 8 мм модуль помола частиц увеличился с 1,93 до 2,11 мм, при 5 мм этот параметр варьировался в диапазоне 1,48 - 1,78 мм, при 3 мм - 1,18 - 1,37 мм (при установленной окружной скорости молотков и подаче материала на нулевом уровне).

Данное изменение среднего размера частиц обусловлено к тому же изменением содержания пылевидной фракции  $m_0$ , а также остатком на сите с диаметром отверстий 3 мм  $m_3$ .

Анализируя карты Парето для пылевидной фракции (рисунок 4.13) и остатка на сите с диаметром отверстий 3 мм (рисунок 4.14) следует отметить, что продольный размер «живого» сечения и окружная скорость молотков оказывает существенное влияние на оба фактора. Так с увеличением окружной скорости молотков содержание пылевидной фракции увеличивается. Это объясняется повышением интенсивности воздействия рабочих органов дробилки на измельчаемый продукт. Так при продольном размере «живого» сечения 8 мм с увеличением скорости молотков с 63 м/с до 77 м/с содержание пылевидной фракции меняется с 0,63 % до 1,75 %. Для 5 мм – этот интервал составил 2,28 - 4,42 %, для 3 мм - 4,45 - 6,39 %. Исследуя влияние окружной скорости молотков на остаток частиц на сите с диаметром отверстий 3 мм  $m_3$  следует отметить, что с ростом окружной скорости молотков данный показатель уменьшается. Максимальный остаток составил 11,14 % при продольном размере «живого» сечения 8 мм и окружной скорости молотков 63 м/с, при увеличении скорости до 77 м/с этот показатель снизился до 4,97 %. Для 5 мм это интервал составил 6,86 - 2,18 %, для 3 мм - 3,75 - 0,64 % (при установленной частоте вращения вентилятора и подаче материала на нулевом уровне).

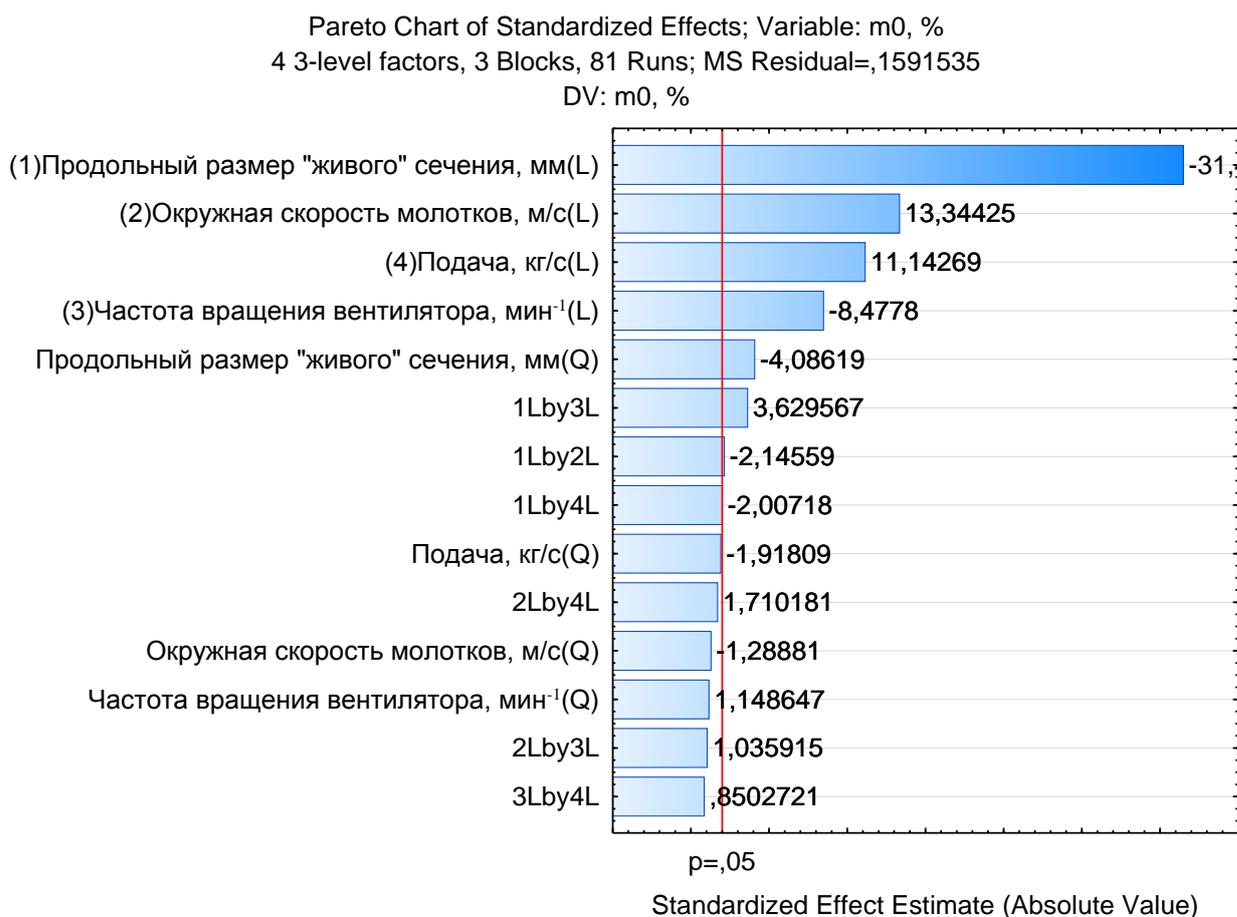


Рисунок 4.13 - Карта Парето стандартизированных эффектов для  $m_0$

Влияние частоты вращения вентилятора на содержание пылевидной фракции и остатка на сите с диаметром отверстий 3 мм также существенно. Так при продольном размере «живого» сечения 8 мм содержание пылевидной фракции уменьшилось с 1,45 до 0,19 %, при 5 мм - с 3,73 до 1,52 %, при 3 мм - с 6,50 до 3,13 %. Это объясняется возросшим воздухообменом в дробильной камере, вследствие чего ускоряется эвакуация мелких частиц, что в меньшей степени приводит к их переизмельчению. Выявленные зависимости остатка на сите с диаметром отверстий 3 мм  $m_3$  позволяют сказать, что с увеличением частоты вращения вентилятора этот показатель увеличивается. При продольном размере «живого» сечения 8 мм остаток варьировался в диапазоне 4,40 - 9,76 %, при 5 мм - 2,08 - 5,61 %, при 3 мм - 0,93 - 2,95% (при установленной окружной скорости молотков и подаче материала на нулевом уровне).

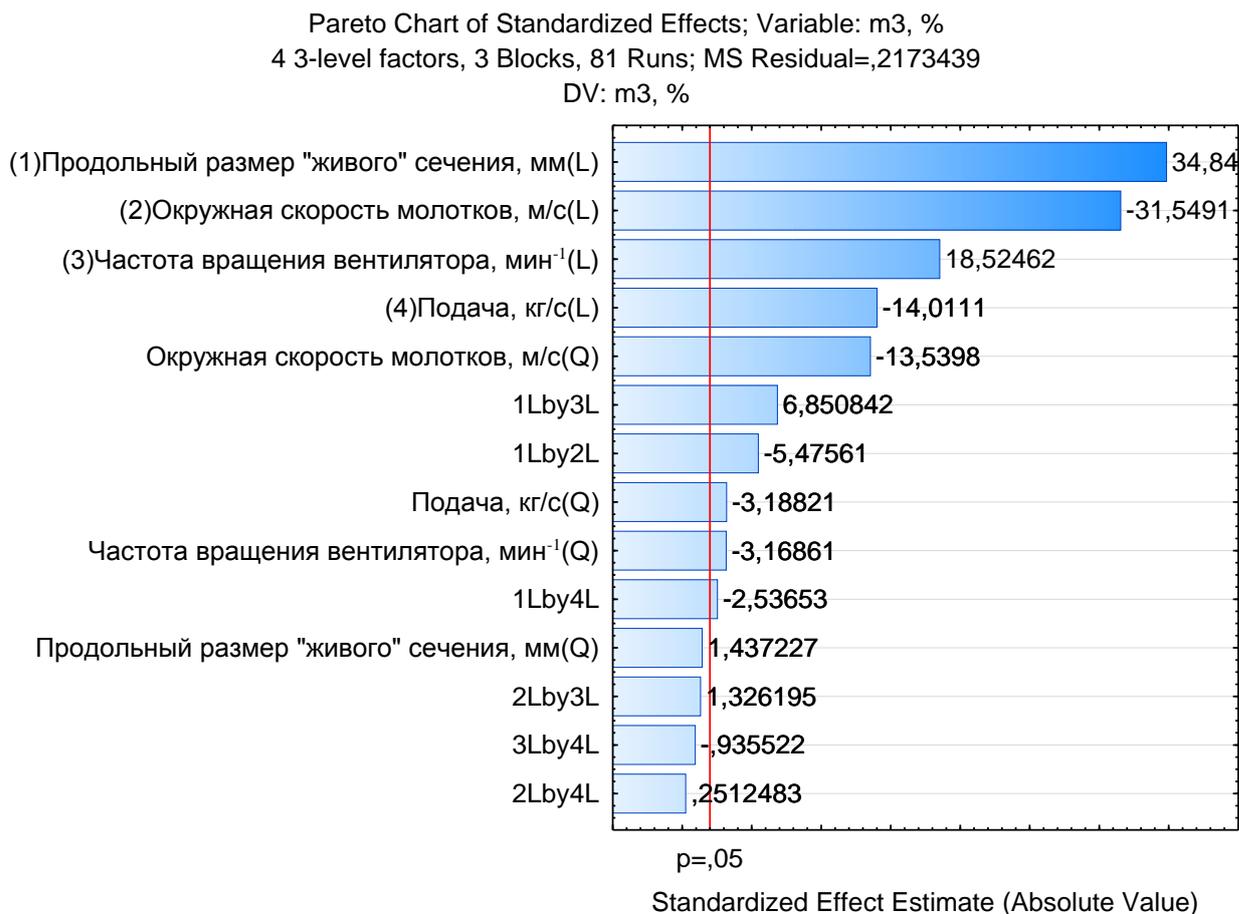


Рисунок 4.14 - Карта Парето стандартизированных эффектов для  $m_3$

Увеличение подачи приводит к возрастанию пылевидной фракции, а также уменьшению остатка на сите с диаметром отверстий 3 мм. Так при изменении подачи от 0,45 до 0,96 кг/с содержание пылевидной фракции увеличилось с 0,52 до 1,48 % при продольном размере «живого» сечения 8 мм, при 5 мм - увеличилось с 2,42 до 3,95 %, при 3 мм - с 4,44 до 6,26 %. В то же время остаток на сите с диаметром отверстий 3 мм уменьшился с 8,28 до 5,57 % при продольном размере «живого» сечения 8 мм, при 5 мм - уменьшился с 4,38 до 2,54 %, при 3 мм - с 2,31 до 1,04 % (при установленной окружной скорости молотков и частоте вращения вентилятора на нулевом уровне). Данное изменение не противоречит исследованиям измельчающих машин с рабочими органами иной конструкции и объясняется интенсификацией процесса измельчения за счет интенсивного взаимодействия частиц между собой, а также взаимодействия с рабочими органами.

Исследуя карту Парето для общих удельных энергозатрат  $\mathcal{E}_{эф.общ}$  (рисунок 4.15), следует отметить, что подача материала оказывает самое существенное влияние.

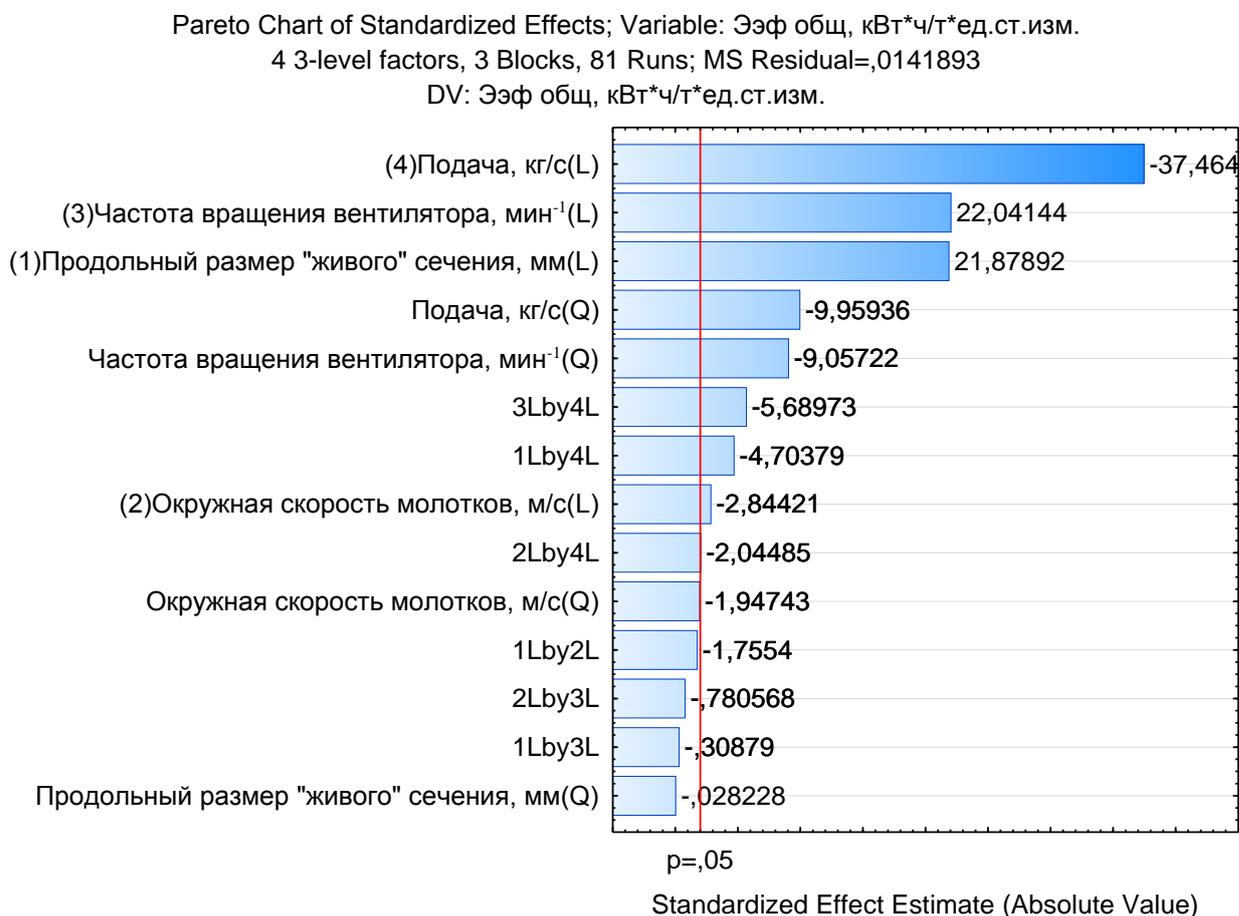


Рисунок 4.15 - Карта Парето стандартизированных эффектов для  $\mathcal{E}_{эф.общ}$

Анализируя зависимость следует сказать, что при подаче 0,45 кг/с этот параметр составил 4,63, 4,00, 3,49 кВт·ч/т·ед.ст.изм для продольного размера «живого» сечени 8, 5 и 3 мм. С увеличением подачи этот параметр уменьшается и при 0,81 кг/с составил 2,67, 2,36, 2,13 кВт·ч/т·ед.ст.изм для продольного размера «живого» сечени 8, 5 и 3 мм.

В то же время изменение частоты вращения вентилятора так же приводит с существенному изменению общих удельных энергозатрат  $\mathcal{E}_{эф.общ}$ . Так снижение частоты вращения вентилятора с 3146 до 2546 мин<sup>-1</sup> при установленном продольном размере «живого» сечения 3 мм, окружной скорости молотков 70 м/с и подаче

материала 0,63 кг/с снижает удельную энергоемкость с 2,93 до 2,35 кВт\*ч/т\*ед.ст.изм. При этом обеспечивается бесперебойная эвакуация материала.

Проанализировав карты Парето стандартизированных эффектов можно сделать вывод, что влияние факторов оптимизации на параметры оптимизации существенно. Кроме того, существенно и совместное влияние факторов.

Статистический анализ результатов опыта по плану Бокса-Бенкена позволил получить математическую зависимость параметров оптимизации от исследуемых факторов. Дальнейший анализ этих зависимостей в программе MathCad 14 позволит оптимизировать работу экспериментальной молотковой дробилки.

#### 4.4. Оптимизация конструктивно-режимных параметров дробилки

При оптимизации конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки необходимо, чтобы выполнялся ряд условий, удовлетворяющих уравнениям, представленным ниже:

$$M_1 \leq M \leq M_2, \quad (4.5)$$

где  $M_1$  и  $M_2$  - заданные значения.

Иными словами, средний размер частиц должен находиться в заданном диапазоне, соответствующему половозрастной группе животного.

$$m_0 \leq m_{0\text{рекоменд}} \quad (4.6)$$

$$m_3 \leq m_{3\text{рекоменд}} \quad (4.7)$$

где  $m_{0\text{рекоменд}}$  и  $m_{3\text{рекоменд}}$  - максимальные значения содержания пылевидной фракции и остатка на сите с диаметром отверстий 3 мм, рекомендованные ГОСТом, зоотехническими требованиями или другими источниками.

Для численной реализации представленных условий использовали прикладную программу Mathcad 14. Листинг программы, представленный в приложении 9, позволяет на основании полученных уравнений регрессии оптимизировать работу молотковой дробилки для заданного модуля помола, который может принимать

конкретное значение или принадлежать заданному интервалу, и получить продукт с заданными параметрами с минимальной удельной энергоемкостью  $\mathcal{E}_{\text{эф.общ}}$  (рисунок 4.16).

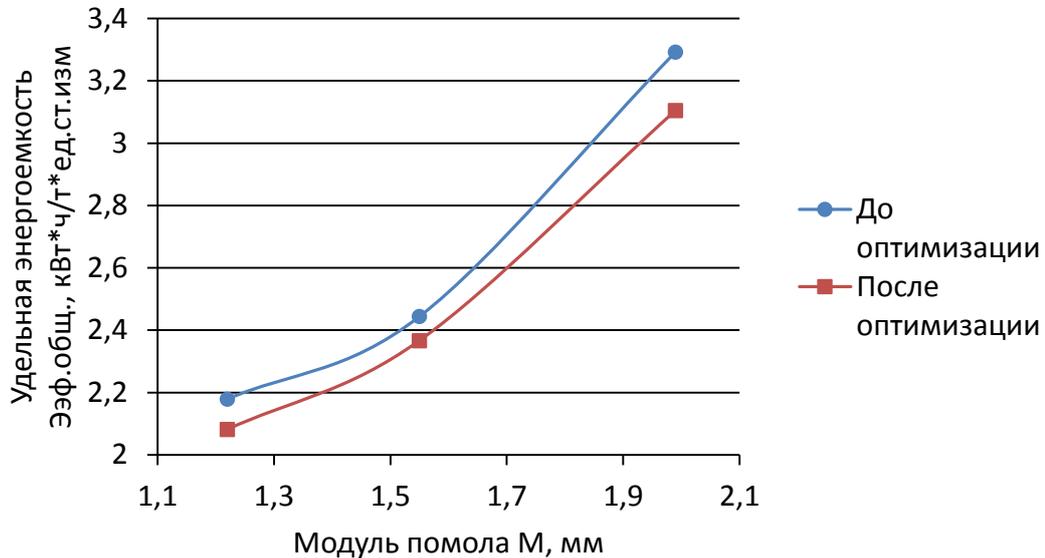


Рисунок 4.16 – Результат оптимизации конструктивно-режимных параметров

Результат оптимизации говорит, что путем оптимизации конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки можно значительно снизить удельную энергоемкость процесса измельчения зерна. Так с цель получения дерти модулем помола 1,22 мм удельную энергоемкость при использовании регулятора «живого» сечения возможно снизить с 2,18 до 2,08 кВт·ч/т·ед.ст.изм. Подобный результат достигается и при получении дерти с другим модулем помола. Удельную энергоемкость возможно снизить с 2,44 до 2,37 кВт·ч/т·ед.ст.изм для модуля помола 1,55 мм, а для 1,99 мм с 3,29 до 3,11 кВт·ч/т·ед.ст.изм.

## 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ

### 5.1. Методика оценки эффективности проекта

При оценке экономической эффективности дробилки усовершенствованной конструкции использовались методики, изложенные в ГОСТ Р 53056-2008, а также в трудах С. А. Горланова, Е. В. Злобина, А. В. Шпилько [22, 39, 60, 155, 156]. При измельчении использовалось зерно ячменя сорта «Урса» влажностью 13,2 % и соответствующее ГОСТ 28672-90. В качестве исходных данных выбраны параметры, представленные в таблице 5.1. Здесь в качестве базового принят варианта молотковая дробилка КДУ-2,0, проектного – оптимизированная работа молотковой дробилки с регулятором «живого» сечения.

Таблица 5.1 - Исходные данные для расчета экономической эффективности

Показатели	Вариант		Темп изменения, %
	Базовый	Проект	
Модуль помола М, мм	1,56	1,56	-
Остаток на сите с диаметром отверстий 3 мм $m_3$ , %	3,86	3,00	-22,28
Содержание пылевидной фракции $m_0$ , %	5,46	3,00	-45,05
Общие удельные энергозатраты $\Sigma_{эф общ}$ , кВт*ч/т*ед.ст.изм	3,20	2,42...2,79	-12,81... -24,38
Средневзвешенное квадратическое отклонение гранулометрического состава $\sigma$	0,86	0,74	-13,95
Коэффициент вариации гранулометрического состава $v$ , %	55,16	47,42	-14,03
Производительность, кг/с	0,63	0,81	28,57
Цена электроэнергии, руб./кВт-ч	5	5	-
Стоимость переоборудования, руб	0	81286	-
Стоимость получаемого продукта, руб/кг	10	10	-
Объем перерабатываемого сырья, т/год	1000	1000	-
Уровень оплаты труда, руб/ч	150	150	-

Абсолютные экономические показатели работы серийной молотковой дробилки КДУ-2,0 и молотковой дробилки усовершенствованной конструкции определяли в расчете на 1 тонну получаемого продукта установленной степени измельчения.

Совокупные затраты денежных  $I_{C.з.}$  средств на 1 тонну получаемого продукта определяли по формуле:

$$I_{C.з.} = I + I_{K.п.} + I_{V.T.} + I_{O.}, \quad (5.1)$$

где  $I$  - прямые эксплуатационные затраты денежных средств;

$I_{K.п.}$  - затраты средств, учитывающие изменение количества и качества продукции;

$I_{V.T.}$  - затраты средств, учитывающие уровень условий труда обслуживающего персонала;

$I_{O.}$  - затраты средств, учитывающие воздействие на окружающую среду.

Прямые эксплуатационные затраты денежных средств  $I$  вычисляются по формуле:

$$I = Z + \Gamma + P + A + \Phi, \quad (5.2)$$

где  $Z$  - затраты на оплату труда обслуживающего персонала;

$\Gamma$  - затраты на смазочные материалы и электроэнергию;

$P$  - затраты средств на ремонт и техническое обслуживание;

$A$  - затраты средств на амортизацию;

$\Phi$  - прочие прямые затраты на вспомогательные материалы.

Затраты на оплату труда обслуживающего персонала  $Z$  вычисляются по формуле:

$$Z = \frac{L \cdot \tau}{W_{cm}}, \quad (5.3)$$

где  $L$  - число обслуживающего персонала;

$\tau$  - оплата труда обслуживающего персонала;

$W_{cm}$  - производительность оборудования за 1 час сменного времени.

Затраты на смазочные материалы и электроэнергию  $\Gamma$  определяли по выражению:

$$\Gamma = q \cdot Ц \cdot K_{см.м.}, \quad (5.4)$$

где  $q$  - удельный расход энергии;

$Ц$  - стоимость электроэнергии;

$K_{см.м.}$  - коэффициент учета стоимости смазочных материалов.

Затраты средств на ремонт и техническое обслуживание  $P$  вычисляли по формуле:

$$P = \frac{B \cdot r_p}{W_{см} \cdot T_3}, \quad (5.5)$$

где  $B$  - стоимость техники без учета НДС;

$r_p$  - коэффициент отчислений на ремонт и техническое обслуживание;

$T_3$  - годовая зональная фактическая загрузка.

Затраты средств на амортизацию  $A$  вычисляли по формуле:

$$A = \frac{B \cdot a}{W_{см} \cdot T_3 \cdot 100}, \quad (5.6)$$

где  $a$  - норма амортизационных отчислений.

Прочие прямые затраты на вспомогательные материалы  $\Phi$  вычисляли по формуле:

$$\Phi = \sum_i h_i \cdot Ц_{м_i}, \quad (5.7)$$

где  $h_i$  - удельный расход  $i$ -го вспомогательного материала на единицу выработки;

$Ц_{м_i}$  - стоимость  $i$ -го вспомогательного материала.

## 5.2. Сравнительная оценка с серийно выпускаемой молотковой дробилкой

Сравнительная оценка молотковой дробилки усовершенствованной конструкции проводилась с серийно выпускаемой дробилкой КДУ-2,0 с мощностью

электропривода 30 кВт, которая установлена в крестьянском хозяйстве «Искра» Дмитровского района Орловской области. В ходе сравнительной оценки производилось измельчение ячменя сорта «Урса» влажностью 13,2 % и соответствующего ГОСТ 28672-90. На дробилке были установлены новые молотки и решета. В таблице 5.2 представлены показатели, рассчитанные по методике, описанной выше.

Таблица 5.2 - Сравнение эксплуатационных затрат базового и проектного вариантов

Показатели	Вариант		Темп изменения, %
	Базовый	Проект	
Прямые эксплуатационные затраты денежных средств И, руб/год	144923,2	128014,0	-11,67
в т. ч.			
Затраты на оплату труда З, руб/год	66137,6	51440,3	-22,22
Затраты на электроэнергию Г, руб/год	41025,4	31076,9	-24,25
Затраты на ремонт и ТО Р, руб/год	3600,0	1286,0	-64,28
Затраты на амортизацию А, руб/год	33750,0	43910,7	30,11
Прочие затраты Ф, руб/год	410	300	-26,83
<i>I<sub>к.п.</sub></i> - затраты средств, учитывающие изменение количества и качества продукции, руб/год	35100,0	21900,0	-37,61
<i>I<sub>о.</sub></i> - затраты средств, учитывающие воздействие на окружающую среду, руб/год	4573,0	2853,0	-37,61
Итого затрат, руб/год	184596,2	152767,0	-17,24

По итогам сравнительной оценки видно, что удельная энергоемкость снизилась на 24,25%, производительность возросла на 28,57 %, а эксплуатационные затраты проекта на 17,24 % меньше базового варианта и в стоимостном выражении экономия составила 31829,2 руб/год. Содержание в готовом продукте пылевидной фракции и крупных частиц снизилось на 45,05 % и 22,28 % соответственно. Выравненность гранулометрического состава, оцененная средневзвешенным квадратическим отклонением, улучшилась на 13,95 %. Окупаемость проекта составляет 2,55 года. Экономический эффект достигнут за счет снижения удельных энергозатрат, уменьшения содержания пылевидной фракции и остатка на сите с диаметром отверстий 3 мм, а также повышения производительности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Энергоемкость измельчения и эффективность скармливания кормов можно улучшить за счет уменьшения содержания пылевидной фракции и недоизмельченных частиц путем совершенствования конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки;
2. Проведенный обзор существующих конструкций измельчающих машин выявил их существенные недостатки. Принимая во внимание наметившиеся тенденции, была разработана молотковая дробилка, отличающаяся тем, что в ее конструкции используется регулятор «живого» сечения, выполненный в виде подвижного и неподвижного решет с отверстиями прямоугольной формы (патент на изобретение РФ № 2520653). В конструкции дробилки ротор и вентилятор имеют независимый привод с изменяемой скоростью вращения.
3. В ходе теоретического обоснования получены аналитические зависимости, отличающиеся тем, что отображают влияние прямоугольной и круглой формой отверстий на качественные и энергетические показатели корма.
4. Анализ уравнений регрессии позволяет установить рациональные конструктивно-режимные параметры молотковой дробилки, способствующие получению продукта с заданными параметрами и минимальной удельной энергоемкостью.
5. Результаты эксперимента подтверждают аналитические зависимости, а работа оптимизированной молотковой дробилки показывает, что дерть с модулем помола 1,56 мм, полученная с использованием регулятора «живого» сечения имеет по сравнению с решетками с круглыми отверстиями на 45,05 % и 22,28 % меньшее содержание пылевидной фракции и недоизмельченных частиц соответственно. Коэффициент вариации улучшился на 14,02 %, а среднезвешенное квадратическое отклонение – на 13,95 %, что позволяет говорить о улучшении выравниваемости дерти. Теоретические исследования по изучению изменения

площади поверхности корма подтвердились экспериментально. Дерьт с модулем помола 1,56 мм полученная при использовании регулятора «живого» сечения имеет на 20,22 % меньшую суммарную площадь по сравнению с решетом с круглой формой отверстий. Данное изменение привело к снижению удельной энергоемкости измельчения и пневмотранспортирования, а общие удельные энергозатраты  $\mathcal{E}_{эф.общ}$  снизились (в т. ч. за счет оптимизации работы вентилятора) на 24,25 %.

6. Дана экономическая оценка использования предложенного решения, а также проведено сравнение эксплуатационных затрат с серийно выпускаемой дробилкой КДУ-2,0, которое говорит, что производительность возросла на 28,57 %, а эксплуатационные затраты проекта на 17,24 % меньше базового варианта и в стоимостном выражении экономия составила 31829,20 руб/год. Окупаемость проекта составляет 2,55 года.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Адлер, Ю. П. Введение в планирование эксперимента / Ю. П. Адлер. – М. : Металлургия, 1969. – 159 с.
2. Адра, Ф. Исследования технологических и структурно-механических свойств твердой и мягкой пшеницы Сирийской Арабской Республики : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.02 / Адра Фарук. - М., 1978. – 28 с.
3. Алешкин, В. Р. Механизация животноводства: учебн. пособия для высш. с.-х. учеб. заведений / В. Р. Алешкин, П. М. Роцин. – М. : Агропромиздат, 1985. – 136 с.
4. Алешкин, В. Р. Некоторые закономерности прохода частиц через решето молотковой дробилки / В. Р. Алешкин // Механизация сельскохозяйственного производства: Записки ЛСХИ. - Л., 1968. - Т. 119. - Вып. 1. - С 118 - 124.
5. Алиев, А. А. Липидный обмен и продуктивность жвачных животных / А. А. Алиев – М. : Колос, 1980. – 381 с.
6. Амелянц, А. Улучшаем конструкцию дробилки / А. Амелянц, Г. Матыцин. // Комбикормовая пром-сть. – 1997. - № 2. – С. 17-18.
7. Антимонов, С. В. Энергосберегающая оптимизация процесса ударно-стирающего измельчения зернового сырья для приготовления кормов : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Антимонов Станислав Владиславович. - Оренбург, 1999. – 176 с.
8. Аутамбаев, М. Основы планирования научно-исследовательского эксперимента: учебное пособие для студентов технических и сельскохозяйственных вузов / М. Аутамбаев, А. З. Иванов, Ю. И. Терехов. - Ташкент: Укитувчи, 2004. - 336 с.
9. Балданов, М. Б. Исследование процесса измельчения фуражного зерна в молотковых дробилках / М. Б. Балданов // Сб. тр. Бурятской с.-х. академии. – Вып. 38. – 1995. – С. 11-14.

10. Барабашкин, В. П. Молотковые и роторные дробилки / В. П. Барабашкин – 2-е изд., доп. и перераб. изд. – М : Наука, 1973. – 143 с.
11. Баранов, Н. Ф. Совершенствование технологических процессов и технических средств приготовления кормов для сельскохозяйственного производства на базе роторных измельчителей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01. / Николай Федотович Баранов. – Киров, 2001. – 622 с.
12. Браславский, И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод : учеб. пособие / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М. : Academia, 2004. – 248 с.
13. Брицман, Д. Лекции по производству комбикормов / Д. Брицман. – Самара: u.s. feed council, - 1995. - С. 59-60.
14. Брусин, М. А. Исследование процесса размола в мелющих вентиляторах / М. А. Брусин, А. В. Гофайзен // Теплоэнергетика. - 1966. - №11. - С. 41-45.
15. Булатов, С. Ю. Исследование влияния коэффициента перекрытия камеры измельчения молотковой дробилки зерна на ее аэродинамические характеристики / С. Ю. Булатов, В. Н. Нечаев. // Вестник НГИЭИ. - 2012. - №8. С. 3-11.
16. Бурков, А. И. Зерноочистительные машины : Конструкция, исслед., расчет и испытание. / А. И. Бурков, Н. П. Сычугов. – Киров, 2000. – 258 с.
17. Гийо, Р. Проблема измельчения материалов и ее развитие. / Р. Гийо, Г. Г. Мунц, Г. С. Холаков – М. : Стройиздат, 1964. – 112 с.
18. Гиршин, М. Е. Влияние параметров решет дробилки на показатели процесса измельчения / М. Е. Гиршин, П. М. Рошин // Записки ЛСХИ. – Л., - 1970. - том 149. С. 18-23.
19. Глебов, Л. А. Интенсификация процесса измельчения сырья в производстве комбикормов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.12 / Глебов Леонид Александрович – М., 1990. – 450 с.

20. Глебов, Л. А. Повышение эффективности измельчения компонентов комбикормов. Комбикормовая пром-сть. Обзор. информ / Л. А. Глебов – М. : ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1984. – 42 с.
21. Глебов, Л. А. Скорость удара полного измельчения зерна при производстве комбикормов / Л. А. Глебов. // Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность. - 1979. - С. 29-30.
22. Горланов, С. А. Экономическая оценка проектных разработок в АПК / С. А. Горланов, Е. В. Злобин. – Воронеж: Воронеж. гос. аграр. ун-т, 2002. – 66 с.
23. ГОСТ 10199-81 Комбикорма-концентраты для овец. Технические условия - М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. - 118 с.
24. ГОСТ 13299-71 Комбикорма-концентраты для поросят-сосунов. Технические условия. - М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. - 118 с.
25. ГОСТ 13496.0-80 Комбикорма. Комбикормовое сырье. Методы анализа. - М. : Издательство стандартов, 2002. - 5 с.
26. ГОСТ 13496.8-72 Комбикорма. Методы определения крупности размола и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений. - М. : Издательство стандартов, 2002. - 2 с.
27. ГОСТ 16955-71 Комбикорм для контрольного откорма свиней. Технические условия. - М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. - 118 с.
28. ГОСТ 18221-99 Комбикорма полнорационные для сельскохозяйственной птицы. Технические условия. - М. : Стандартиформ, 2006. - 7 с.
29. ГОСТ 21055-96 Комбикорма полнорационные для беконного откорма свиней. Общие технические условия. - М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. - 118 с.
30. ГОСТ 28098-89 Дробилки кормов молотковые. Общие технические условия. - М. : Изд-во стандартов, 1989. - 2 с.
31. ГОСТ 28672-90 Ячмень. Требования при заготовках и поставках. Межгосударственный стандарт. - М. : Стандартиформ, 2006. - 7 с.

32. ГОСТ 50257-92 Комбикорма полнорационные для свиней. Технические условия. - М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. - 118 с.
33. ГОСТ 9265-72 Комбикорма-концентраты для рабочих лошадей. Технические условия. - М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. - 118 с.
34. ГОСТ 9267-68 Комбикорма-концентраты для свиней. Технические условия. - М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. - 118 с.
35. ГОСТ 9268-90 Комбикорма-концентраты для крупного рогатого скота. Технические условия. - М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. - 118 с.
36. ГОСТ Р 51166-98 Комбикорма для пушных зверей, кроликов и нутрий. Технические условия. - М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. - 118 с.
37. ГОСТ Р 51419-99 (ИСО 6498-98) Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Подготовка испытываемых проб. - М. : Изд-во стандартов, 2002. - 6 с.
38. ГОСТ Р 51550-2000 Комбикорма-концентраты для свиней. Общие технические условия. - М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. - 118 с.
39. ГОСТ Р 53056-2008 Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. - М. : Стандартиформ, 2009. – III, 19 с.
40. ГОСТ Р 51550-2000. Комбикорма-концентраты для свиней. Общие технические условия. - М. : Изд-во стандартов, 2002. - 8 с.
41. ГОСТ Р 52255-2004 Комбикорма для свиней. Номенклатура показателей. - М.: Стандартиформ, 2007. - 4 с.
42. Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013-2020 годы // [www.rg.ru URL: http://www.rg.ru/pril/71/20/88/717\\_prg.pdf](http://www.rg.ru/pril/71/20/88/717_prg.pdf) (дата обращения: 30.01.2014).
43. Грачев, Ю.П. Математические методы планирования эксперимента / Ю. П. Грачев, Ю. М. Плаксин. - М.: ДеЛи принт, 2005. – 296 с.
44. Гурьянов, А. М. Основы рационального использования фуражного зерна в животноводстве / А. М. Гурьянов, А. А. Артемьев. // Достижения науки и техники АПК. - 2008. - № 6. - С. 52-55.

45. Деменко, В. Я. Измельчение сена и соломы на молотковой дробилке. Технология производства комбикормов и эффективность их использования / В. Я. Деменко, А. А. Сундеев, Е. Т. Аретинский - М. : Тр. ВНИИ комбикормовой промышленности, 1972. - Вып. 4. - С. 3-10.
46. Демидов, А. Р. Способы измельчения и методы оценки их эффективности. Элеваторная мукомольно-крупяная и комбикормовая промышленность / А. Р. Демидов, С. Е. Чирков. – М. : ЦИНТИ Госкомзага СССР, 1969. – 52 с.
47. Демидов, П. Г. Технология комбикормового производства / П. Г. Демидов – М. : Колос, 1968. – 224 с.
48. Денисов, В. А. Повышение эффективности процесса измельчения зерновых коомпонентов комбикормов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Денисов Валерий Алексеевич – М., 1992. – 420 с.
49. Денисов, Н. И. Производство и использование комбикормов / Н. И. Денисов. – М.: Колос, 1964. – 400 с.
50. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации (Российская газета, 3 февраля 2010 г. № 21). – Москва: Ось-89, 2010. – 15 с.
51. Дробилка безрешётная ДБ-5 // <http://www.krmz.by/> URL: [http://www.krmz.by/viewpage.php?page\\_id=17](http://www.krmz.by/viewpage.php?page_id=17) (дата обращения: 20.04.2015).
52. Дробилка для зерна // <http://www.melinvest.ru/> URL: [http://www.melinvest.ru/catalog/kombikormovoe\\_oborudovanie/drobilka/#zerno\\_drobilki](http://www.melinvest.ru/catalog/kombikormovoe_oborudovanie/drobilka/#zerno_drobilki) (дата обращения: 06.12.2014).
53. Дробилка ММ // <http://www.sovocrim.ru/> URL: [http://www.sovocrim.ru/products/?SECTION\\_ID=1&ELEMENT\\_ID=48](http://www.sovocrim.ru/products/?SECTION_ID=1&ELEMENT_ID=48) (дата обращения: 07.12.2014).
54. Дробилка молотковая безрешетная ДМБ-10 // <http://hlebtch.ru/> URL: <http://hlebtch.ru/drobilki-drobilka-molotkovaja-bezreshetnaja-dmb-10.html> (дата обращения: 20.04.2015).

55. Дробилки зерна. Зернодробилки ДКР // <http://dozaagro.ru/> URL: [http://dozaagro.ru/equipment/rassipnoi\\_korm/drobilki-zerna/](http://dozaagro.ru/equipment/rassipnoi_korm/drobilki-zerna/) (дата обращения: 06.12.2014).
56. Дробилки зерна // <http://www.polymya.ru/> URL: <http://www.polymya.ru/catalog/dkmp/> (дата обращения: 16.12.2014).
57. Дробилки молотковые // <http://www.technex.ru/> URL: <http://www.technex.ru/catalog/izmelchenie/drobilki-molotkovye> (дата обращения: 07.12.2014).
58. Дробилки молотковые МДМ 200/400 // <http://infelko.ru/> URL: <http://infelko.ru/drobilki/drobilki-molotkovye-mdm-200-400.html> (дата обращения: 16.12.2014).
59. Дробилки молотковые УЗ-ДБМ // <http://www.oaovniikp.ru> URL: [http://www.oaovniikp.ru/cgi-bin/katalog.pl?d=eq2\\_1&tp=eq](http://www.oaovniikp.ru/cgi-bin/katalog.pl?d=eq2_1&tp=eq) (дата обращения: 06.12.2014).
60. Дрогайцева, В. И. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники / В. И. Дрогайцева, П. Ф. Тулапина, Т. Я. Бутенко. – Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства, – 1998. – 345 с.
61. Дружинин, Р. А. Совершенствование рабочего процесса ударно-центробежного измельчителя: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Дружинин Роман Александрович – Воронеж, 2014. – 169 с.
62. Егоров, Г. А. Технологические свойства зерна / Г. А. Егоров. – М. : Агропромиздат, 1985. – 334 с.
63. Елисеев, В. А. О роли сита в процессе измельчения кормов молотковой дробилкой / В. А. Елисеев, А. М. Тарасенко // Механизация животноводческих ферм: Тр. Саратовского ИМСХ. - Саратов, 1970. - Вып. 46. - С. 9-13.
64. Жиров, Д. К. Физические процессы разрушения многокомпонентных структурно-неоднородных материалов и сравнительный анализ технических

- характеристик мельниц для их измельчения / Д. К. Жиров // Вестник Удмуртского университета. 2013. № 3 - С. 6-13.
65. Жислин, Я. М. Оборудование для производства комбикормов, обогатительных смесей и премиксов / Я. М. Жислин. – 2-е изд., доп. и перераб. изд. – М. : Колос, 1981. – 319 с.
66. Зверев, С. В. Измельчение зернового сырья комбикормов ударом / С. В. Зверев, Л. А. Глебов. // Краснодар: Изв. ВУЗов. Сер. Пищевая технология. - 1986. - № 6. - С. 91 - 92.
67. Зернодробилки // <http://www.dozamech.pl/ru/> URL: [http://www.dozamech.pl/ru/index.php?option=com\\_content&task=view&id=346&Itemid=421](http://www.dozamech.pl/ru/index.php?option=com_content&task=view&id=346&Itemid=421) (дата обращения: 16.12.1988).
68. Золотарев, С. В. Ударно-центробежные измельчители фуражного зерна (основы теории и расчета) / С. В. Золотарев. - Барнаул: ГИПП «Алтай», 2001. - 200 с.
69. Иванов, А. В. Исследование процесса измельчения единичных зерен / А. В. Иванов, Ж. В. Арбузова, Е. Ю. Сеница // Хранение и переработка сельхозсырья. 1999. – № 5.– С. 13 - 14.
70. Игнатьевский, Н. Ф. Исследование воздушного режима в молотковых кормодробилках : автореферат дис. ... канд. техн. наук. (410). / Н. Ф. Игнатьевский – Л., 1968. – 17 с.
71. Изяков, Ф. Я. Планирование эксперимента и обработка опытных данных : учеб. пособие для студентов вузов по агроинженер. специальностям. / Ф. Я. Изяков. – Челябинск: Челяб. гос. агроинженер. ун-т, 2003. – 103 с.
72. Карнов, А. М. Скорость движения продуктово-воздушного слоя в камере дробилки / А. М. Карнов // Тр. Тульской государств. сельскохозяй. опытной станции, - Тула, 1972. – Т. 4. - С. 406 – 413.
73. Касьянов, В. Л. Повышение эффективности функционирования молотковой дробилки зерна путём совершенствования пневматической загрузки и

- сепарирующей поверхности : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Касьянов Владимир Леонидович – Киров, 2010. – 23 с.
74. Кирпичников, Ф. С. Исследование вентиляционных свойств комбинированного ротора молотковой дробилки / Ф. С. Кирпичников, А. А. Яровский, Н. И. Клименко // Механизация сельскохозяйственного производства: Науч. тр. УСХА. 1974. - № 59. - С. 24-27.
75. Коношин, И. В. Использование в молотковых дробилках решёт с регулируемым живым сечением / И. В. Коношин, А. В. Звекон, А. В. Черепков // Кормопроизводство. 2014. - №1. - С. 44-48.
76. Коношин, И. В. Обоснование оптимизации скоростного режима вентилятора молотковой дробилки / И. В. Коношин, А. В. Черепков // Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. Самара: ИЦРОН, 2015. – С. 40-43.
77. Коношин, И. В. Перспективный способ регулирования степени измельчения сыпучих продуктов в молотковых дробилках / И. В. Коношин, А. В. Черепков // Агротехника и энергообеспечение. – 2014. – Т. 1 - № 1 – С. 178-181.
78. Коношин, И. В. Повышение эффективности функционирования молотковых дробилок при измельчении зерна / И. В. Коношин, А. В. Звекон, А. В. Черепков // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2014. - №1. - С. 127-132.
79. Коношин, И. В. Совершенствование процесса измельчения и обоснование конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки с решетом спиралевидной формы: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Коношин Иван Вячеславович - Воронеж, 2004. - 20 с.
80. Коношин, И. В. Совершенствование процесса измельчения фуражного зерна с обоснованием конструктивно-режимных параметров измельчения / И. В. Коношин, А. В. Черепков // Сборник статей по материалам Международной конференции. Орел: ФГБОУ ВПО "ОрелГАУ", 2011. – С. 58-63

81. Коношин, И. В. Современные тенденции использования дробилок зерна / И. В. Коношин, А. В. Черепков // Особенности технического оснащения современного сельскохозяйственного производства. Сборник материалов к Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. Орел: ФГБОУ ВПО "ОрелГАУ", 2012. – С. 87-92.
82. Коношин, И. В. Теоретическое обоснование использования подвижного и неподвижного решет с прямоугольными отверстиями в молотковых дробилках / И. В. Коношин, А. В. Черепков // Особенности технического и технологического оснащения современного сельскохозяйственного производства. Сборник материалов международной научно-практической конференции. Орел: ФГБОУ ВПО "ОрелГАУ", 2013 г. – С. 103-109.
83. Коротков, В. Г. Распределение окружных скоростей в измельчителе ударно-стирающего действия / В. Г. Коротков, В. Ю. Полищук, С. В. Антимонов. // Техника в сельском хозяйстве. 2001. - №1. - С. 35-35.
84. Корчагина, В. А. Разработка и исследование частотного асинхронного электропривода с системой управления углом между векторами тока статора и тока намагничивания : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03. / Корчагина Вера Анатольевна – Липецк, 2009. – 203 с.
85. Кошелев, А. Н. Производство комбикормов и кормовых смесей / А. Н. Кошелев, Л. А. Глебов. – М. : Агропромиздат, 1986. - 176 с.
86. Кукта, Г. М. Машины и оборудование для приготовления кормов / Г. М. Кукта. - М. : Агропромиздат, 1987. – 303 с.
87. Кукта, Г. М. Технология переработки и приготовления кормов / Г. М. Кукта. - М. : Колос, 1978. - 265 с.
88. Кулаковский, И. В. Машины и оборудование для приготовления кормов : справочник. Ч.1 / И. В. Кулаковский, Ф. С. Кирпичников, Е. И. Резник. - М. : Россельхозиздат, 1987. – 285 с.
89. Куприц, Я. Н. Физико-химические основы размола зерна / Куприц Я. Н. – М. : Заготиздат, 1946. – 214 с.

90. Лухт, Т. Ступенчатое измельчение в молотковой и вальцовой дробилках / Т. Лухт // Комбикорма. 2012. - №1. - С. 55-57.
91. Макаров, А. П. Исследование технологического процесса измельчения фуражного зерна : автореферат дис. канд. техн. наук. / Макаров Андрей Павлович – М. : 1962. – 28 с.
92. Малаховцев, В. П. Исследование упругих свойств и сил при ударном нагружении зерна пшеницы : автореферат дис. канд. техн. наук. / В. П. Малаховцев – Одесса: 1964. – 16 с.
93. Малич, Н. Г. Анализ и перспективы развития отечественных машин для дробления твердых материалов / Н. Г. Малич, В. С. Блохин, А. О. Дегтярев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2008. - №1. - С. 365-380.
94. Мартыненко, Я. Ф. Прочность некоторых компонентов, используемых в комбикормах / Я. Ф. Мартыненко, А. Л. Чечула // В сб.: Хранение и переработка зерна. - М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1980. - (вып. 4). С. 83-97.
95. Маслов, Г. Г. Моделирование в агроинженерии методами планирования эксперимента: учебн. пособие для сельскохозяйственных ВУЗов / Г. Г. Маслов, Е. И. Трубилин, В. В. Цыбулевский. – Краснодар. 2010. – 304 с.
96. Машины, оборудование и приспособления для переработки и приготовления кормов. Дробилки зерна и пищевых отходов // <http://fermer.ru/> URL: <http://fermer.ru/sovet/oborudovanie-i-tekhnologii/47042> (дата обращения: 05.12.2014).
97. Мельников, С. В. Исследование воздушного режима агрегата АВМ-0,4 / С. В. Мельников, М. Е. Гиршин // Механизация сельскохозяйственного производства: Записки ЛСХИ. Л. : 1971. - Вып. 2 - С. 9-17.
98. Мельников, С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм / С. В. Мельников – Л. : Колос. 1978. – 560 с.

99. Мельников, С. В. Механизация технологических процессов / С. В. Мельников, П. В. Андреев. - М. : Агропромиздат, 1990. – 287 с.
100. Мельников, С. В. Расход энергии на создание воздушного потока ротором дробилки / С. В. Мельников, Ф. С. Кирпичников // Записки ЛСХИ. 1976. Т. 290. С. 16-24.
101. Мельников, С. В. Экспериментальные основы теории процесса измельчения кормов на фермах молотковыми дробилками : дис. ... д-ра техн. наук. (410). / Мельников Сергей Всеволодович - Л., 1969. - 509 с.
102. Методические указания. Планирование исследовательских испытаний: Основные положения. РД - 50 -353 - 82. М.: Стандарт, 1983. 56 с.
103. Миколайчик, И. Н. Совершенствование системы кормления молодняка свиней на основе кормовых ресурсов местного производства : дис. ... д-ра сельскохозяйственных наук : 06.02.02. / Миколайчик Иван Николевич – Курган, 2006. – 342 с.
104. Минко, В. А. Комплексное обеспыливание производственных помещений при транспортировании и механической переработке сыпучего минерального сырья : дис. д-ра ... техн.наук : 05.26.02. / Минко Всеволод Афанасьевич – Белгород, 1988. – 513 с.
105. Миронов, К. Е. Приготовление кормов и физико – механические свойства зерна / К. Е. Миронов // Вестник НГИЭИ . 2012. - №12. - С. 88-91.
106. Молотковая дробилка // <http://www.wynveen.com> URL: <http://www.wynveen.com/ru/page/productenrussisch/hamermolensrussisch/ghmh-amer-molenrussisch.html> (дата обращения: 07.12.2014).
107. Мухтасипов, Н. М. Совершенствование процесса измельчения и обоснование параметров кормодробилки молоткового типа : дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. / Мухтасипов Нурулла Мубаракшович – Оренбург, 2001. – 126 с.
108. Мяндр, А. Э. Кормоприготовительные машины и агрегаты. / А. Э. Мяндр. – М. : Машиностроение, 1970. – 256 с.

109. Наумов, И. А. Совершенствование кондиционирования и измельчения пшеницы и ржи / И. А. Наумов. – М. : Колос, 1975. – 175 с.
110. Нечаев, В. Н. Выбор вентилятора для пневмотранспортирования материала в комбикормовом агрегате / В. Н. Нечаев // Вестник НГИЭИ. 2011. - № 5. С. 46-56.
111. Нечаев, В. Н. Изучение влияния конструктивных факторов лопаток ротора-вентилятора на показатели рабочего процесса дробилки / В. Н. Нечаев // Вестник НГИЭИ. 2012. - № 8. С. 12-21
112. Нечаев, В. Н. Повышение эффективности рабочего процесса ротора-вентилятора молотковой дробилки зерна закрытого типа : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. / Нечаев Владимир Николаевич – Киров, 2013. – 169 с.
113. Никитин, В. М. Изыскание рациональной аэродинамической схемы и конструктивного оформления быстроходной молотковой мельницы / В. М. Никитин // Теплоэнергетика. -1962. - №10. - С. 13-17.
114. Новик, Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение, 1980. – 304 с.
115. Основы научных исследований / Под ред. И. Н. Кравченко: Учебное пособие. – СПб. : «Лань», 2015. – 304 с.
116. Пат. № 2338441 Российская Федерация, МПК А 23 F 17/00. Малогабаритная комбикормовая установка / Савиных П. А., Палкин А. В., Турубанов Н. В., Лодыгин Д. Г. № 2007103954/13; заявлено 01.02.2007; опубл. 20.11.2008, Бюл. № 32, 5 с.
117. Пат. № 2520653 Российская Федерация, МПК В 02 С 13/04. Молотковая дробилка / Коношин И. В., Черепков А. В. № 2012149728/13; заявлено 21.11.2012; опубл. 27.06.2014 Бюл. № 18, 8 с.

118. Пат. на полезную модель № 76248 Российская Федерация. Смеситель / Савиных П.А., Турубанов Н.В., Лодыгин Д.Г. № 2008103294/22; заявлено 28.01.2008; опубл. 20.09.2008, Бюл. № 26, 2 с.
119. Певцев, В. Г. Совершенствование рабочего процесса молотковой дробилки закрытого типа : дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Певцев Виктор Григорьевич – Воронеж, 1998. – 169 с.
120. Передня, В. И. Механизация приготовления кормосмесей для крупного рогатого скота / В. И. Передня. - Мн.: Ураджай, 1990.- 152 с.
121. Петинаова, Н. Р. Обоснование многостадийного измельчения зернового материала / Н. Р. Петинаова, И. Б. Шагдыров // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2009. №4. - С. 111-114.
122. Петрушин, В. С. Приведенные затраты асинхронных двигателей в частотном электроприводе при различных законах управления / В. С. Петрушин // Електромашинобудування та електрообладнання: Респ. міжвід. наук.-техн. зб. – 2001. – Вип. 56. – С. 51-54.
123. Поярков, М. С. Совершенствование рабочего процесса молотковых дробилок с жалюзийными сепараторами при одно- и двухступенчатом измельчении зерна : дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Поярков Михаил Сергеевич – Киров, 2001. – 253 с.
124. Продукция. Кормодробилка КД-2-01 // <http://www.silmash.net/> URL: <http://www.silmash.net/index.php/produktsiya/15-kormodrobilka-kd-2-01> (дата обращения: 07.12.2014).
125. Рощин, И. М. Исследование процесса измельчения сухой листостебельной массы дробилками агрегатов травяной муки : дис. ... канд. техн. наук. / Рощин И. М. -Ленинград-Пушкин, 1970. – 189 с.
126. Рылякин, Е. Г. Обзор технических средств приготовления плющеного зерна, представленных на российском рынке сельхозтехники / Е. Г. Рылякин // Инженерный вестник Дона. 2013. - № 3. С. 123.

127. Сергеев, А. Г. Метрология, стандартизация, сертификация : учеб. пособие для студентов вузов / А. Г. Сергеев, М. В. Латышев, В. В. Терегеря. – М. : Логос, 2001. – 525 с.
128. Сергеев, А. Г. Метрология: учебн. пособие для студентов вузов / А. Г. Сергеев – М. : Логос, 2005. – 269 с.
129. Соловьёв, И. К. Работа ситовой поверхности молотковой дробилки / И. К. Соловьёв // Тракторы и сельхозмашины. - 1963. - № 6. - С. 25-27.
130. Сундеев, А. А. Процесс измельчения зерна и его развитие / А. А. Сундеев // Механизация подготовки кормов в животноводстве : Сб. науч. тр. – Воронеж, 1984. – С. 3-17.
131. Сундеев, А. А. Работа молотковой дробилки в замкнутом цикле / А. А. Сундеев, А. П. Барбицкий, С. В. Мерчалов // Совершенствование средств механизации в животноводстве: Сб. науч. тр. – Воронеж, 1987. – С. 30-40.
132. Сундеев, А. А. Экспериментальные исследования работы сепаратора с эластичными рабочими органами / А. А. Сундеев // Совершенствование технологий и технических средств для механизации процессов в растениеводстве: Сб. науч. тр. ВГАУ. Воронеж, 1994. – С. 169-172.
133. Сыроватка, В. И. Исследования основных закономерностей процесса измельчения зерна в молотковой дробилке кормов : дис... канд. техн. наук / Сыроватка В. И. - М., 1963. - 129 с.
134. Сыроватка, В. И. Механизация приготовления кормов. Справочник / В. И. Сыроватка – М. : Агропромиздат, 1985. – 367 с.
135. Сыроватка, В. И. Основные закономерности процесса измельчения зерна в молотковой дробилке / В. И. Сыроватка // Электрификация сельского хозяйства: Тр. ВИЭСХ. - М. : Колос, 1964. - Т.14. - С. 89-157.
136. Тарасенко, А. М. Исследование влияния конструктивных параметров молотковой дробилки на эффективность измельчения зерновых кормов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Тарасенко Анатолий Михайлович – Воронеж., 1976. – 23 с.

137. Тенденции развития комбикормовой отрасли России и мира / экспресс-исследование ОАО «Корпорация «Развитие» - Белгородская область 2015 г.
138. Ткаленко, В. И. Малогабаритные комбикормовые установки колхозно-совхозного и промышленного типов / В. И. Ткаленко, М. З. Рудой, Б. З. Рудой – Сочи: Сов. Кубань, 1958. – 63 с.
139. Турубанов, Н. В. Повышение эффективности процесса дробления зерна в молотковой дробилке путем разделения дерти воздушным потоком : автореф. дис. ... канд техн наук: 05.20.01. / Турубанов Николай Валентинович – Киров, 2004. – 23 с.
140. Устинова, Л. Сердце завода - молотковая дробилка / Л. Устинова // Комбикорма. 2011. - №5. - С. 30.
141. Устюгов, С. Ю. Обоснование основных параметров и режимов работы малогабаритного комбикормового агрегата: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Устюгов Сергей Юрьевич – Киров, 2005. – 170 с.
142. Федоров, В. А. Разработка и обоснование параметров центробежного дискового измельчителя фуражного зерна. автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Фёдоров Виктор Александрович – Челябинск, 2000. – 20 с.
143. Федоров, О. С. Повышение эффективности функционирования молотковой дробилки путем совершенствования способа сепарации: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Федоров Олег Сергеевич – Чебоксары, 2010. – 22 с.
144. Феоктистов, Ю. А. Моделирование процесса переноса частиц твердого материала в трубопроводах систем вакуумной пылеуборки : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18 / Феоктистов Юрий Александрович - Воронеж, 2002. - 161 с.
145. Филин, В. М. Обоснование процесса работы и параметров роторного дробильно-шелушильного измельчителя зерна для фермерских хозяйств : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Филин Виктор Михайлович – Зерноград, 2007. – 22 с.

146. Халтурин, В. С. Совершенствование конструктивных и технологических параметров молотковой дробилки зерна с колосниковой решеткой : автореф. дис. ... техн. наук : 05.20.01 / Халтурин Валерий Семенович – Киров, 1998. – 20 с.
147. Хитов, А. А. Измельчение зернового материала на бесситовых дробилках с промежуточным просеиванием продуктов размола : автореф. дисс.... канд. техн. наук: 05.20.01 / А. А. Хитов. – М., 1987. – 24 с.
148. Цветков, Э. И. Методы электрических измерений : учеб. пособие для вузов / Э. И. Цветков, Л. Г. Журавин. – Л.: Энергоатомиздат Л. отд-ние, 1990. – 287 с.
149. Черемисинов, А. А. Совершенствование методики оценки гранулометрического состава измельченного фуражного зерна / А. А. Черемисинов, М. Н. Яровой, А. А. Сундеев // Вестник ВГАУ. – 2014. – 3(42). – С. 113-117.
150. Черепков, А. В. Использование в молотковых дробилках решет с регулируемым живым сечением / А. В. Черепков, И. В. Коношин // Техника и оборудование для села. 2014. - № 2. - С. 7-8.
151. Черепков, А. В. Применение в молотковых дробилках решет с прямоугольными отверстиями / А. В. Черепков, И. В. Коношин // Главный механик. - 2013. - №13. С. 34-36
152. Чернышев Н. И. Антипитательные факторы кормов. // Н. И. Чернышев, И. Г. Панин, Н. И. Шумский, В. В. Гречишников // Воронеж, 2013, 186 с.
153. Шагайда, Н. И. Продовольственная безопасность в России: мониторинг, тенденции и угрозы / Н. И. Шагайда, В. Я. Узун. — М. : Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. — 110 с.
154. Шень Цзай-Чунь Исследование технологического процесса размола сена бобовых и злаковых культур на молотковой кормодробилке : автореф. дис. ... канд техн. наук : 05.20.01 / Шень Цзай-Чунь. – М., 1964. – 18 с.

155. Шпилько, А. В. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники. Часть 1 / А. В. Шпилько. - М. : ВНИИ экономики сельского хозяйства, 1998. – 220 с.
156. Шпилько, А. В. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники. Часть 2 / А. В. Шпилько. - М. : ВНИИ экономики сельского хозяйства, 1998. – 252 с.
157. Шуб, Г. И. Исследование технологического процесса измельчения сырья комбикормового производства на молотковой дробилке : автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Г. И. Шуб. - Целиноград, 1966. -21 с.
158. Щеглов, В. В. Корма. Приготовление, хранение, использ. : Справочник. / В. В. Щеглов, Л. Г. Боярский. – М.: Агропромиздат, 1990. – 254 с.
159. Box G., Benken D. Some new three level designs for study of quantitative variables.- Technometrics, 1960, v.2, N. 4, p. 455-475.
160. Good band R.D., Tokach M.D., Nelssen J.L. The effects of diet particle size on animal performance. Feed manufacturing, №2050. - May 1995. - p. 156-161.
161. Griffith, A. A., The phenomena of rupture and flow in solids, Phil. Trans. Roy. Soc. of London, A 221 (1921) pp. 163-197.
162. Grinding Equipment // <http://www.muyangbiz.com/> URL: <http://www.muyangbiz.com/MyEng/ArticleListByImg.aspx?ClassID=130066630117> (дата обращения: 07.12.2014).
163. Grinding units // <http://www.aarsen.com/> URL: [http://www.aarsen.com/HOME/PRODUCTS\\_&\\_PROCESSES/Grinding\\_units/849/](http://www.aarsen.com/HOME/PRODUCTS_&_PROCESSES/Grinding_units/849/) (дата обращения: 18.12.2014).
164. Gruber Gebläsehammermühle Ultra // <http://www.getreidetechnik.com/> URL: <http://www.getreidetechnik.com/p/getreide-mahlen-quetschen-mischen/mahlmischtechnik/geblaesehammermuehle-ultra/> (дата обращения: 16.12.1988).
165. Gutzeit H. Jahrbuch der Müllezei, Leipzig, 1952.

166. Hamermolens // <http://www.ottevanger.com> URL:  
[http://www.ottevanger.com/nl/pagina/producten/malen\\_breken/hamermolens.html](http://www.ottevanger.com/nl/pagina/producten/malen_breken/hamermolens.html)  
1 (дата обращения: 07.12.2014).
167. Hammer mills for optimum size reduction of raw material for pet food production  
// <http://www.andritz.com/> URL: <http://www.andritz.com/products-and-services/pf-detail.htm?industryid=1195632&applicationid=1299750&pid=15453>  
(дата обращения: 07.12.2014).
168. Healy, B.J., J.D. Hancock, G.A. Kennedy. P.J. Bramel-Cox, K.C. Behnke, and R.H. Hines. 1994. Optimum particle size of corn and hard and soft sorghum for nursery pigs. *J. Anim. Sei.* 72:2227.
169. Milling & Grinding // <http://www.dinnissen.nl/> URL:  
<http://www.dinnissen.nl/process-technology/milling-a-grinding/s/3097> (дата  
обращения: 07.12.2014).
170. Multi Feed // <http://www.buhlergroup.com/> URL:  
<http://www.buhlergroup.com/europe/ru/101.htm#.VIQXcTGsWSq> (дата  
обращения: 07.12.2014).
171. Vinod K. J. Mechanics of Hammer Mill Grinding of Corn as Related to its Mechanical Properties: The Pennsylvania State University, 1975.
172. Wondra, KJ., 1993. Effects of particle size, mill type, and diet form on performance of finishing pigs and lactating sows. M.S. Thesis. Kansas State University, Manhattan, KS 66506.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1 - РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Таблица 1.1 - Матрица плана предварительного эксперимента и значения экспериментальных и расчетных данных

№ опыта	Типоразмер отверстий решет, мм	Продольный размер «живого» сечения, мм	Окружная скорость молотков, м/с	Частота вращения вентилятора, мин <sup>-1</sup>	Подача зерна, кг/с	Остаток на ситах, г								К <sub>ж.с.</sub> , %	М, мм
						3 мм	2 мм	1,5 мм	1,3 мм	1,0 мм	0,8 мм	0,2 мм	Дно		
29	6x35	4	70	2860	0,63	2,37	13	18,21	14,75	20,08	7,84	19,15	5,58	32,33	1,32
9	8x40	8	70	2860	0,63	6,78	37,4	30,96	8,2	6,67	2,81	4,76	0,84	46,65	1,99
12	10x45	10	70	2860	0,63	10,27	59,6	16,18	4,16	3,23	1,35	1,55	0,04	47,54	2,33
34	10x45	4	70	2860	0,63	1,97	13,61	23,13	11,57	22,26	7,65	13,47	3,73	16,43	1,41
5	6x35	4	70	2860	0,63	2,46	13,3	16,67	15,11	19,77	8,36	17,88	5,4	32,33	1,33
25	4x30	1,5	70	2860	0,63	0	4,9	6,27	7,06	27,85	12,89	31,72	9,36	18,37	0,93
10	10x45	4	70	2860	0,63	2,08	14,08	22,98	12,85	22,13	7,77	15,1	3,76	16,43	1,40
8	8x40	5	70	2860	0,63	3,55	17,63	26,66	15,83	17,09	5,38	11,16	3,13	29,16	1,55
31	8x40	3	70	2860	0,63	1,52	8,03	15,08	15,25	26,47	8,89	17,87	5,44	17,49	1,23
26	4x30	2,5	70	2860	0,63	0,93	4,93	15,14	16,2	20,76	9,58	23,65	7,92	30,61	1,11
14	4x30	2,5	70	2860	0,63	0,88	4,89	15,22	16,77	20,05	10,43	24,2	7,28	30,61	1,11
2	4x30	2,5	70	2860	0,63	0,96	4,67	16,23	15,52	20,14	10,1	26,09	7,45	30,61	1,10
33	8x40	8	70	2860	0,63	6,45	38,09	31,5	7,48	6,36	2,71	5,13	0,86	46,65	1,99
35	10x45	7	70	2860	0,63	5,24	37,83	28,6	8,96	7,63	3,12	6,11	1,21	31,18	1,93

продолжение таблицы 1.1

23	10x45	7	70	2860	0,63	5,63	38,68	29,37	9,54	7,48	3,23	5,99	1,32	31,18	1,93
7	8x40	3	70	2860	0,63	1,51	7,66	13,56	16,73	28,09	8,66	18,06	4,94	17,49	1,22
17	6x35	4	70	2860	0,63	2,32	12,91	17,55	15,48	19,05	8,63	18,4	5,74	32,33	1,32
4	6x35	2	70	2860	0,63	0,28	4,65	12,22	15,81	25,87	10,53	25,37	7,2	16,16	1,07
27	4x30	4	70	2860	0,63	2,78	13,86	17,38	18,68	15,39	8,01	19,25	5,55	48,98	1,35
19	8x40	3	70	2860	0,63	1,56	8,38	13,43	16,37	29,21	9,09	19,18	5,01	17,49	1,22
6	6x35	6	70	2860	0,63	4,52	17,91	36,03	10,12	10,89	5,38	11,76	3,09	48,49	1,62
18	6x35	6	70	2860	0,63	4,26	16,79	33,8	10,87	11,55	5,54	12,2	3,17	48,49	1,59
3	4x30	4	70	2860	0,63	2,8	14,54	17,06	18,32	16,19	7,77	19,5	5,4	48,98	1,35
15	4x30	4	70	2860	0,63	2,56	13,75	15,53	16,47	15,84	7,7	19,59	6,09	48,98	1,32
16	6x35	2	70	2860	0,63	0,27	5,23	11,47	14,66	24,8	10,86	25,57	7,75	16,16	1,06
24	10x45	10	70	2860	0,63	10,3	62,81	16,45	4,39	3,5	1,2	1,62	0,06	47,54	2,33
36	10x45	10	70	2860	0,63	10,24	65,12	17,31	4,25	3,46	1,31	1,57	0,08	47,54	2,33
13	4x30	1,5	70	2860	0,63	0	4,87	6,31	7,41	32	12,42	28,98	8,71	18,37	0,96
1	4x30	1,5	70	2860	0,63	0	4,75	6,42	7,21	29,99	12,13	29,93	8,84	18,37	0,95
30	6x35	6	70	2860	0,63	4,4	17,61	37,37	10,62	10,58	5,46	12,81	3,28	48,49	1,60
11	10x45	7	70	2860	0,63	5,41	38,55	28,86	9,71	7,36	2,97	5,94	1,28	31,18	1,93
28	6x35	2	70	2860	0,63	0,27	4,73	11,21	14,86	23,78	10,41	24,64	7,56	16,16	1,06
22	10x45	4	70	2860	0,63	2,17	14,91	23,7	12,49	22,53	7,22	15,27	3,58	16,43	1,42
32	8x40	5	70	2860	0,63	3,49	18,04	26,47	15,5	16,86	5,69	12,14	2,94	29,16	1,54
21	8x40	8	70	2860	0,63	6,83	39,85	33	8,35	6,4	2,75	4,96	0,85	46,65	1,99
20	8x40	5	70	2860	0,63	3,44	17,08	26,45	16,15	16,14	5,85	11,27	3,05	29,16	1,54

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2 – РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПЛАНУ БОКСА-БЕНКЕНА

Таблица 2.1 - Матрица плана эксперимента по плану Бокса-Бенкена и значения экспериментальных данных

№ опыта	Продольный размер «живого» сечения, мм	Окружная скорость мотков, м/с	Частота вращения вентилятора, мин <sup>-1</sup>	Подача зерна, кг/с	Ток холостого хода, А		Ток рабочего хода, А		Остаток на ситах, г							
					Дроб	Вент	Дроб	Вент	3	2	1,5	1,3	1	0,8	0,2	дно
5	5	70	2574	0,45	14,61	8,74	33,34	11,87	3,74	24,09	32,99	9,92	10,93	4,59	10,63	2,86
60	5	70	3146	0,45	14,58	13,25	34,50	19,84	5,88	32,77	34,70	10,35	7,68	3,42	6,07	1,69
65	8	70	2860	0,45	15,14	11,28	32,03	13,70	8,31	52,54	25,10	4,95	4,47	1,52	2,36	0,55
51	5	77	2860	0,45	16,85	10,57	37,80	13,62	4,95	14,41	28,96	17,35	15,41	5,45	11,18	3,06
77	5	63	2860	0,45	13,89	10,59	30,59	12,09	9,31	28,47	31,35	9,33	9,43	3,49	7,39	1,88
24	5	77	2860	0,45	16,69	10,60	38,25	13,50	4,53	15,39	27,31	17,95	14,95	5,66	11,58	3,13
33	5	70	3146	0,45	14,54	13,31	35,53	20,03	5,38	30,44	33,58	9,46	7,48	3,24	6,69	1,89
78	5	77	2860	0,45	17,22	10,72	37,95	13,77	4,78	15,22	26,80	16,11	15,60	5,52	11,55	3,14
64	3	70	2860	0,45	13,83	9,88	35,85	16,01	2,21	16,56	21,49	12,99	21,62	7,22	15,54	4,44
50	5	63	2860	0,45	13,51	10,72	30,19	11,85	9,53	27,14	34,15	9,13	8,78	3,42	7,08	1,89
10	3	70	2860	0,45	13,85	9,89	36,15	16,64	2,34	16,11	22,15	13,08	20,54	6,96	14,59	4,32
38	8	70	2860	0,45	14,81	11,16	32,25	13,56	8,29	53,97	23,32	4,80	4,00	1,56	2,38	0,50
37	3	70	2860	0,45	13,96	10,02	36,30	16,55	2,38	16,36	21,76	12,37	19,65	6,61	14,16	4,55
6	5	70	3146	0,45	14,41	13,46	35,24	19,53	5,72	31,24	33,45	9,63	7,82	3,15	6,46	1,83
11	8	70	2860	0,45	14,84	11,37	31,43	13,73	8,25	55,30	24,84	4,74	3,97	1,46	2,31	0,52
23	5	63	2860	0,45	13,73	10,52	30,99	11,76	9,21	25,81	32,28	8,87	8,86	3,60	7,58	2,00

продолжение таблицы 2.1

32	5	70	2574	0,45	14,29	8,80	33,15	11,57	3,80	24,32	35,08	9,36	10,74	4,67	11,04	2,80
59	5	70	2574	0,45	14,57	8,71	34,31	11,66	4,25	21,51	34,68	9,75	10,25	5,13	9,92	2,95
1	3	63	2860	0,63	13,27	10,07	37,24	16,61	3,68	10,13	19,79	18,95	19,01	8,09	15,92	4,35
20	8	70	2574	0,63	14,74	9,13	39,81	11,32	4,22	39,87	30,88	8,59	6,83	2,87	6,13	1,44
44	5	77	3146	0,63	17,15	13,41	46,55	25,94	4,58	14,27	21,22	17,07	17,09	6,96	14,61	3,92
3	3	77	2860	0,63	16,28	10,09	45,72	19,05	0,65	4,60	12,58	15,92	28,19	9,55	22,87	6,18
9	5	70	2860	0,63	14,50	10,59	36,86	16,54	3,33	17,40	26,95	14,82	16,51	5,87	11,52	2,92
45	5	70	2860	0,63	14,42	10,58	36,84	16,80	3,59	17,22	26,69	14,97	17,15	5,62	11,28	3,15
18	5	70	2860	0,63	14,49	10,48	36,82	16,82	3,52	18,36	26,57	14,92	16,38	5,61	12,06	2,99
76	8	70	3146	0,63	14,68	14,19	33,03	21,36	9,32	41,54	30,84	6,97	6,46	1,95	3,04	0,19
27	5	70	2860	0,63	14,69	10,75	36,81	16,38	3,61	17,24	26,68	16,02	17,27	5,38	12,11	3,04
30	3	77	2860	0,63	16,00	9,86	45,94	18,74	0,65	4,93	11,75	15,42	27,99	9,66	22,12	6,08
2	8	63	2860	0,63	13,96	11,39	32,96	13,48	11,58	60,44	17,15	4,49	3,38	1,37	2,49	0,64
68	5	63	2574	0,63	13,38	8,56	33,37	11,81	6,74	23,46	31,79	9,87	9,82	3,94	8,32	2,08
14	5	63	2574	0,63	13,52	8,73	34,19	12,12	6,80	24,85	35,95	10,42	10,56	3,84	8,12	2,25
71	5	77	3146	0,63	16,64	13,27	46,84	25,88	4,55	14,43	21,11	16,63	18,09	6,46	14,66	4,41
41	5	63	2574	0,63	13,75	8,81	33,84	12,07	7,06	24,15	35,56	10,25	9,89	3,97	8,21	2,12
42	5	77	2574	0,63	16,66	8,15	41,79	15,49	1,21	14,79	19,23	18,07	17,16	7,19	16,57	4,66
73	3	70	2574	0,63	14,05	8,29	45,21	13,51	0,92	6,16	21,10	15,66	18,86	9,58	22,85	6,83
46	3	70	2574	0,63	13,70	8,16	46,31	13,80	0,91	6,42	19,27	14,82	19,08	8,92	21,28	6,29
75	3	70	3146	0,63	13,71	12,01	37,78	24,69	2,92	11,83	18,70	14,18	24,76	10,49	14,02	2,97
57	3	77	2860	0,63	15,93	10,00	45,44	18,91	0,64	4,97	11,91	15,74	30,45	9,83	20,42	6,92
4	8	77	2860	0,63	17,60	11,32	40,00	15,50	5,14	20,36	41,12	11,75	10,41	3,74	6,15	1,77
49	8	70	3146	0,63	15,00	14,29	32,38	21,32	9,76	39,80	29,08	7,64	6,32	2,07	2,87	0,18
70	5	63	3146	0,63	13,75	13,32	38,28	22,46	9,78	24,73	35,23	10,39	9,40	3,97	7,08	1,31
28	3	63	2860	0,63	13,03	9,98	37,82	16,57	3,74	9,91	19,04	19,42	18,68	8,00	16,66	4,61

продолжение таблицы 2.1

16	5	63	3146	0,63	13,83	13,48	37,74	21,80	9,05	23,13	35,87	10,54	9,62	4,22	6,27	1,26
15	5	77	2574	0,63	16,83	8,12	41,40	15,62	1,19	15,43	19,52	17,56	17,52	7,79	16,30	4,48
17	5	77	3146	0,63	16,96	13,13	45,81	26,18	4,35	14,56	19,83	18,07	17,50	7,09	14,56	3,97
74	8	70	2574	0,63	15,01	9,35	39,25	11,58	4,53	40,14	30,57	8,20	6,65	3,05	5,57	1,39
36	5	70	2860	0,63	14,53	10,52	37,58	16,57	3,57	17,67	24,83	15,77	16,65	5,81	11,12	2,97
81	5	70	2860	0,63	14,41	10,37	37,96	16,89	3,21	18,43	25,47	14,49	16,44	6,09	11,23	2,99
72	5	70	2860	0,63	14,57	10,74	37,94	16,24	3,38	17,65	25,13	16,34	17,34	5,69	11,43	2,98
22	8	70	3146	0,63	15,02	14,42	32,30	21,49	10,20	41,92	30,54	7,68	6,44	2,14	2,88	0,20
31	8	77	2860	0,63	17,40	11,20	39,48	15,41	5,07	19,35	40,35	11,94	10,12	3,46	6,30	1,80
58	8	77	2860	0,63	17,29	11,38	39,92	14,99	4,69	19,87	43,66	11,11	9,93	3,52	6,71	1,67
63	5	70	2860	0,63	14,44	10,69	37,16	16,76	3,59	18,16	26,62	15,64	17,71	5,23	12,13	3,23
54	5	70	2860	0,63	14,37	10,68	36,83	16,59	3,67	17,56	26,25	15,72	17,16	5,45	11,42	3,10
55	3	63	2860	0,63	13,06	9,75	38,04	16,62	3,82	10,97	18,24	17,99	19,56	8,56	16,49	4,39
48	3	70	3146	0,63	13,90	12,37	37,64	25,26	2,98	11,84	16,91	14,25	27,77	9,60	13,80	3,16
19	3	70	2574	0,63	13,95	8,21	45,59	13,91	0,95	6,74	20,39	14,94	20,09	9,51	22,01	6,40
56	8	63	2860	0,63	14,15	11,30	32,54	13,52	10,14	59,78	17,59	4,05	3,48	1,44	2,68	0,66
21	3	70	3146	0,63	14,03	12,22	37,69	24,86	2,93	11,84	17,16	13,98	27,05	9,89	13,71	3,27
29	8	63	2860	0,63	13,80	11,27	32,22	13,20	11,69	57,39	17,08	4,56	3,50	1,32	2,44	0,69
69	5	77	2574	0,63	17,24	8,43	41,31	15,68	1,12	16,01	20,70	17,84	15,63	7,31	18,45	4,28
47	8	70	2574	0,63	15,08	9,21	39,44	11,54	4,44	38,85	29,98	8,88	6,33	3,09	6,02	1,51
43	5	63	3146	0,63	13,64	13,21	37,97	21,75	9,59	23,96	33,19	9,85	10,01	3,88	6,35	1,33
7	5	70	2574	0,81	14,47	8,66	41,49	20,77	2,30	12,56	16,82	13,56	20,42	11,15	17,70	4,57
40	8	70	2860	0,81	15,04	11,31	37,87	18,01	5,58	28,32	32,41	11,82	9,38	3,59	6,21	1,51
53	5	77	2860	0,81	17,05	10,52	49,79	20,61	2,16	8,70	22,64	14,48	19,89	9,03	18,04	4,82
34	5	70	2574	0,81	14,45	8,78	42,26	20,88	2,44	12,86	17,70	13,40	20,51	10,89	18,28	4,63
66	3	70	2860	0,81	14,27	9,80	45,19	22,11	1,03	7,41	17,14	15,56	21,14	9,54	22,55	6,28

продолжение таблицы 2.1

25	5	63	2860	0,81	13,77	10,75	40,96	18,13	6,31	18,38	29,19	11,46	12,69	5,12	10,02	3,08
80	5	77	2860	0,81	16,77	10,83	49,51	20,75	2,03	8,90	21,22	13,26	22,08	9,33	18,67	5,38
67	8	70	2860	0,81	14,92	11,22	38,46	17,96	5,28	27,27	35,06	10,89	9,15	3,59	6,78	1,40
26	5	77	2860	0,81	16,91	10,46	48,60	20,45	2,24	8,30	22,15	14,74	20,17	8,58	18,42	4,77
8	5	70	3146	0,81	14,44	13,24	42,53	28,44	3,77	17,61	19,27	12,26	16,84	9,32	14,82	3,99
13	8	70	2860	0,81	14,74	11,38	37,97	18,03	5,84	29,72	34,41	11,11	9,57	3,53	6,05	1,54
12	3	70	2860	0,81	13,84	9,91	46,19	22,33	1,01	8,01	16,40	15,06	21,60	9,51	21,51	6,10
61	5	70	2574	0,81	14,49	8,81	41,38	21,35	2,52	13,48	17,35	12,10	20,69	10,09	19,57	4,41
39	3	70	2860	0,81	13,74	10,08	45,72	21,80	1,07	7,53	15,63	16,29	21,23	9,70	22,31	6,41
35	5	70	3146	0,81	14,40	13,49	42,82	28,38	3,72	18,17	19,02	13,07	17,60	9,50	14,41	3,75
62	5	70	3146	0,81	14,75	13,29	43,05	28,99	3,45	16,72	21,24	12,84	18,63	10,35	15,80	3,85
52	5	63	2860	0,81	13,56	10,52	41,78	18,50	6,57	19,35	29,90	12,20	12,76	5,34	10,30	2,98
79	5	63	2860	0,81	13,68	10,62	41,46	18,57	6,95	19,79	32,79	11,40	13,57	5,56	11,31	2,98

Таблица 2.2 - Результаты расчетных значений к эксперименту, построенному по плану Бокса-Бенкена

№ опыта	Продольный размер «живого» сечения, мм	Окружная скорость молотков, м/с	Частота вращения вентилятора, мин <sup>-1</sup>	Подача зерна, кг/с	M, мм	P <sub>xx</sub> , кВт			P <sub>эф</sub> , кВт			Э <sub>пол</sub> , кВт*ч/т*ед.ст.изм			Э <sub>эф</sub> , кВт*ч/т*ед.ст.изм		
						Дроб.	Вент.	Общ.	Дроб.	Вент.	Общ.	Дроб.	Вент.	Общ.	Дроб.	Вент.	Общ.
5	5	70	2574	0,45	1,68	3,87	2,85	6,72	9,22	4,06	13,27	1,38	0,31	1,69	2,38	1,05	3,43
60	5	70	3146	0,45	1,88	3,86	4,62	8,48	9,56	7,03	16,59	1,65	0,70	2,35	2,77	2,04	4,81
65	8	70	2860	0,45	2,19	4,02	3,82	7,83	8,83	4,81	13,64	1,63	0,34	1,97	2,99	1,63	4,62
51	5	77	2860	0,45	1,56	4,49	3,54	8,03	10,56	4,78	15,34	1,46	0,30	1,76	2,54	1,15	3,68
77	5	63	2860	0,45	1,88	3,67	3,55	7,22	8,40	4,14	12,55	1,37	0,17	1,55	2,44	1,20	3,65
24	5	77	2860	0,45	1,55	4,44	3,55	7,99	10,71	4,73	15,43	1,50	0,28	1,78	2,56	1,13	3,69
33	5	70	3146	0,45	1,85	3,85	4,65	8,50	9,87	7,10	16,97	1,72	0,70	2,42	2,82	2,03	4,85
78	5	77	2860	0,45	1,55	4,59	3,60	8,18	10,61	4,84	15,45	1,44	0,30	1,74	2,54	1,16	3,70
64	3	70	2860	0,45	1,42	3,66	3,27	6,93	9,97	5,67	15,64	1,38	0,52	1,90	2,18	1,24	3,42
50	5	63	2860	0,45	1,89	3,57	3,60	7,17	8,29	4,05	12,33	1,37	0,13	1,50	2,41	1,18	3,59
10	3	70	2860	0,45	1,43	3,66	3,28	6,94	10,06	5,90	15,95	1,41	0,58	1,99	2,22	1,30	3,52
38	8	70	2860	0,45	2,21	3,93	3,77	7,70	8,89	4,75	13,64	1,70	0,33	2,03	3,04	1,62	4,66
37	3	70	2860	0,45	1,44	3,69	3,33	7,02	10,10	5,86	15,96	1,42	0,56	1,98	2,24	1,30	3,54
6	5	70	3146	0,45	1,87	3,81	4,71	8,52	9,78	6,92	16,70	1,72	0,64	2,36	2,82	1,99	4,81
11	8	70	2860	0,45	2,21	3,93	3,85	7,78	8,65	4,82	13,47	1,61	0,33	1,94	2,95	1,65	4,60
23	5	63	2860	0,45	1,86	3,63	3,52	7,15	8,52	4,01	12,53	1,41	0,14	1,55	2,45	1,15	3,61

продолжение таблицы 2.2

32	5	70	2574	0,45	1,68	3,78	2,88	6,66	9,16	3,93	13,09	1,39	0,27	1,67	2,37	1,02	3,39
59	5	70	2574	0,45	1,67	3,86	2,84	6,70	9,50	3,97	13,47	1,46	0,29	1,75	2,45	1,02	3,48
1	3	63	2860	0,63	1,37	3,50	3,34	6,85	10,39	5,88	16,27	1,04	0,38	1,42	1,57	0,89	2,46
20	8	70	2574	0,63	1,93	3,90	2,99	6,90	11,21	3,84	15,05	1,55	0,18	1,73	2,38	0,81	3,19
44	5	77	3146	0,63	1,47	4,57	4,69	9,26	13,46	9,19	22,64	1,44	0,73	2,17	2,18	1,49	3,66
3	3	77	2860	0,63	1,11	4,33	3,35	7,68	13,18	6,75	19,92	1,08	0,41	1,49	1,61	0,82	2,43
9	5	70	2860	0,63	1,54	3,84	3,55	7,39	10,27	5,86	16,13	1,09	0,39	1,49	1,75	1,00	2,75
45	5	70	2860	0,63	1,55	3,82	3,54	7,36	10,26	5,95	16,21	1,10	0,41	1,51	1,75	1,01	2,76
18	5	70	2860	0,63	1,55	3,84	3,50	7,34	10,26	5,96	16,22	1,10	0,42	1,52	1,75	1,02	2,77
76	8	70	3146	0,63	2,10	3,89	5,02	8,91	9,12	7,57	16,69	1,21	0,59	1,80	2,11	1,75	3,87
27	5	70	2860	0,63	1,54	3,89	3,61	7,50	10,25	5,80	16,06	1,08	0,37	1,45	1,74	0,98	2,72
30	3	77	2860	0,63	1,11	4,25	3,26	7,52	13,25	6,64	19,89	1,10	0,41	1,51	1,62	0,81	2,43
2	8	63	2860	0,63	2,31	3,69	3,86	7,56	9,10	4,72	13,82	1,38	0,22	1,59	2,32	1,20	3,52
68	5	63	2574	0,63	1,78	3,53	2,79	6,33	9,22	4,03	13,26	1,12	0,24	1,36	1,81	0,79	2,60
14	5	63	2574	0,63	1,78	3,57	2,85	6,42	9,47	4,15	13,62	1,16	0,26	1,42	1,86	0,82	2,68
71	5	77	3146	0,63	1,46	4,43	4,63	9,06	13,56	9,17	22,72	1,47	0,73	2,20	2,18	1,48	3,66
41	5	63	2574	0,63	1,79	3,63	2,88	6,51	9,37	4,14	13,50	1,13	0,25	1,38	1,85	0,82	2,66
42	5	77	2574	0,63	1,37	4,43	2,65	7,08	11,86	5,49	17,35	1,12	0,43	1,55	1,79	0,83	2,61
73	3	70	2574	0,63	1,18	3,72	2,70	6,41	13,00	4,73	17,73	1,20	0,26	1,47	1,69	0,61	2,30
46	3	70	2574	0,63	1,19	3,62	2,65	6,27	13,37	4,85	18,23	1,27	0,29	1,56	1,75	0,63	2,38
75	3	70	3146	0,63	1,38	3,62	4,11	7,74	10,56	8,75	19,30	1,05	0,70	1,76	1,60	1,33	2,93
57	3	77	2860	0,63	1,11	4,23	3,32	7,55	13,08	6,70	19,78	1,09	0,41	1,50	1,61	0,82	2,43
4	8	77	2860	0,63	1,75	4,69	3,84	8,53	11,27	5,49	16,76	1,27	0,32	1,59	2,18	1,06	3,24
49	8	70	3146	0,63	2,11	3,98	5,06	9,04	8,93	7,55	16,48	1,15	0,58	1,73	2,07	1,75	3,83

продолжение таблицы 2.2

70	5	63	3146	0,63	1,87	3,64	4,65	8,29	10,72	7,96	18,68	1,46	0,68	2,14	2,21	1,64	3,85
28	3	63	2860	0,63	1,36	3,44	3,31	6,75	10,57	5,87	16,44	1,07	0,38	1,45	1,58	0,88	2,46
16	5	63	3146	0,63	1,85	3,65	4,72	8,37	10,55	7,72	18,27	1,41	0,61	2,02	2,15	1,58	3,73
15	5	77	2574	0,63	1,38	4,48	2,63	7,12	11,73	5,53	17,27	1,10	0,44	1,54	1,78	0,84	2,62
17	5	77	3146	0,63	1,46	4,52	4,57	9,09	13,21	9,27	22,48	1,40	0,76	2,15	2,12	1,49	3,62
74	8	70	2574	0,63	1,94	3,98	3,07	7,05	11,03	3,94	14,97	1,51	0,19	1,70	2,36	0,84	3,21
36	5	70	2860	0,63	1,55	3,85	3,52	7,37	10,49	5,87	16,36	1,13	0,40	1,54	1,79	1,00	2,79
81	5	70	2860	0,63	1,55	3,81	3,46	7,28	10,61	5,98	16,60	1,16	0,43	1,59	1,81	1,02	2,84
72	5	70	2860	0,63	1,54	3,86	3,61	7,46	10,61	5,75	16,36	1,15	0,36	1,51	1,80	0,98	2,78
22	8	70	3146	0,63	2,11	3,98	5,12	9,10	8,91	7,61	16,52	1,15	0,58	1,73	2,07	1,77	3,85
31	8	77	2860	0,63	1,74	4,64	3,79	8,42	11,11	5,46	16,56	1,24	0,32	1,56	2,13	1,05	3,18
58	8	77	2860	0,63	1,74	4,61	3,86	8,47	11,25	5,31	16,56	1,27	0,28	1,55	2,16	1,02	3,18
63	5	70	2860	0,63	1,54	3,82	3,59	7,41	10,36	5,94	16,30	1,11	0,40	1,51	1,76	1,01	2,77
54	5	70	2860	0,63	1,55	3,80	3,58	7,39	10,26	5,88	16,14	1,10	0,39	1,49	1,75	1,00	2,75
55	3	63	2860	0,63	1,37	3,45	3,22	6,67	10,64	5,89	16,53	1,08	0,40	1,49	1,60	0,89	2,49
48	3	70	3146	0,63	1,37	3,68	4,26	7,93	10,51	8,95	19,46	1,03	0,71	1,74	1,59	1,35	2,94
19	3	70	2574	0,63	1,19	3,69	2,67	6,36	13,13	4,90	18,03	1,24	0,29	1,53	1,72	0,64	2,36
56	8	63	2860	0,63	2,29	3,74	3,83	7,57	8,98	4,73	13,71	1,32	0,23	1,55	2,26	1,19	3,45
21	3	70	3146	0,63	1,37	3,71	4,20	7,91	10,53	8,81	19,34	1,03	0,70	1,72	1,59	1,33	2,92
29	8	63	2860	0,63	2,30	3,65	3,81	7,46	8,88	4,60	13,48	1,33	0,20	1,53	2,25	1,17	3,42
69	5	77	2574	0,63	1,38	4,59	2,74	7,34	11,70	5,56	17,26	1,08	0,43	1,50	1,77	0,84	2,62
47	8	70	2574	0,63	1,93	4,00	3,02	7,02	11,09	3,92	15,02	1,51	0,19	1,70	2,35	0,83	3,19
43	5	63	3146	0,63	1,87	3,61	4,61	8,21	10,62	7,70	18,32	1,45	0,64	2,09	2,19	1,59	3,78
7	5	70	2574	0,81	1,32	3,83	2,83	6,66	11,76	7,36	19,12	0,90	0,51	1,41	1,33	0,83	2,16
40	8	70	2860	0,81	1,83	3,99	3,83	7,82	10,59	6,38	16,97	1,04	0,40	1,44	1,66	1,00	2,66
53	5	77	2860	0,81	1,30	4,54	3,52	8,06	14,57	7,30	21,87	1,12	0,42	1,54	1,62	0,81	2,44

продолжение таблицы 2.2

34	5	70	2574	0,81	1,32	3,83	2,87	6,70	12,02	7,40	19,41	0,93	0,51	1,44	1,36	0,84	2,20
66	3	70	2860	0,81	1,18	3,78	3,24	7,02	13,00	7,83	20,83	0,93	0,46	1,40	1,31	0,79	2,11
25	5	63	2860	0,81	1,66	3,64	3,61	7,25	11,59	6,42	18,01	1,13	0,40	1,53	1,65	0,91	2,56
80	5	77	2860	0,81	1,28	4,46	3,64	8,10	14,47	7,35	21,82	1,09	0,41	1,50	1,58	0,80	2,39
67	8	70	2860	0,81	1,82	3,95	3,79	7,75	10,78	6,36	17,14	1,06	0,40	1,46	1,68	0,99	2,67
26	5	77	2860	0,81	1,29	4,50	3,50	8,00	14,16	7,24	21,40	1,07	0,42	1,49	1,57	0,80	2,37
8	5	70	3146	0,81	1,47	3,82	4,62	8,44	12,11	10,07	22,18	1,04	0,69	1,73	1,52	1,27	2,79
13	8	70	2860	0,81	1,85	3,90	3,86	7,76	10,62	6,39	17,01	1,06	0,40	1,46	1,68	1,01	2,69
12	3	70	2860	0,81	1,19	3,66	3,29	6,94	13,34	7,91	21,25	0,99	0,47	1,46	1,36	0,81	2,17
61	5	70	2574	0,81	1,33	3,84	2,88	6,71	11,73	7,56	19,29	0,90	0,53	1,43	1,33	0,86	2,19
39	3	70	2860	0,81	1,17	3,63	3,35	6,98	13,17	7,72	20,90	0,96	0,44	1,40	1,33	0,78	2,10
35	5	70	3146	0,81	1,48	3,81	4,72	8,53	12,20	10,05	22,26	1,06	0,67	1,74	1,54	1,27	2,81
62	5	70	3146	0,81	1,44	3,91	4,64	8,55	12,28	10,27	22,55	1,03	0,69	1,73	1,52	1,27	2,78
52	5	63	2860	0,81	1,67	3,58	3,52	7,10	11,86	6,55	18,41	1,18	0,43	1,62	1,70	0,94	2,63
79	5	63	2860	0,81	1,66	3,61	3,56	7,17	11,75	6,58	18,33	1,16	0,43	1,59	1,68	0,94	2,62

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3 – РЕЗУЛЬТАТЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ РЕГУЛЯТОРА «ЖИВОГО»  
СЕЧЕНИЯ С ЯЧЕЙКОЙ 8x40 ММ**

Таблица 3.1 - Значения экспериментальных данных дополнительного эксперимента для регулятора «живого» сечения с ячейкой 8x40 мм

№ опыта	Продольный размер «живого» сечения, мм	Окружная скорость молотков, м/с	Частота вращения вентилятора, мин <sup>-1</sup>	Подача зерна, кг/с	Ток холостого хода, А		Ток рабочего хода, А		Остаток на ситах, г							
					Дроб	Вент	Дроб	Вент	3	2	1,5	1,3	1	0,8	0,2	дно
5	5	70	2860	0,45	14,56	10,71	34,65	14,76	4,53	26,39	34,31	9,61	9,63	4,07	8,41	2,39
13	5	70	2860	0,45	14,31	10,69	34,21	14,59	4,27	26,99	35,89	9,70	9,85	4,16	8,66	2,51
21	5	70	2860	0,45	14,60	10,40	33,74	14,69	4,34	28,73	32,38	9,32	9,79	3,81	7,89	2,35
2	5	77	2860	0,63	16,90	10,45	42,95	17,02	2,28	10,61	26,91	16,73	18,12	6,66	15,11	4,22
18	5	77	2860	0,63	16,94	10,66	42,11	16,91	2,01	10,93	24,89	16,36	18,25	6,25	14,65	4,45
17	5,0	63	2860	0,63	13,85	10,63	34,56	14,53	6,88	23,97	32,29	10,27	10,09	4,01	7,81	2,38
24	8	70	2860	0,63	14,92	11,16	34,73	15,39	6,45	38,09	31,50	7,48	6,36	2,71	5,13	0,86
23	3	70	2860	0,63	13,92	9,90	39,28	18,77	1,52	8,03	15,08	15,25	26,47	8,89	17,87	5,44
16	8	70	2860	0,63	14,76	11,40	33,83	15,43	6,83	39,85	33,00	8,35	6,40	2,75	4,96	0,85
1	5,0	63	2860	0,63	13,76	10,65	35,33	14,78	7,05	25,07	35,66	10,20	9,86	3,90	8,57	2,30
19	5	70	2574	0,63	15,16	11,43	31,42	13,55	8,60	56,38	24,05	4,74	4,11	1,49	2,33	0,53
15	3	70	2860	0,63	13,85	9,98	39,48	18,61	1,51	7,66	13,56	16,73	28,09	8,66	18,06	4,94

продолжение таблицы 3.1

7	3	70	2860	0,63	13,88	9,92	40,25	18,42	1,56	8,38	13,43	16,37	29,21	9,09	19,18	5,01
8	8	70	2860	0,63	15,01	11,33	34,04	15,08	6,78	37,40	30,96	8,20	6,67	2,81	4,76	0,84
3	5	70	2574	0,63	14,84	11,23	32,00	13,81	8,03	53,67	25,34	4,76	4,12	1,57	2,39	0,51
10	5	77	2860	0,63	16,92	10,69	43,03	16,77	2,25	11,16	27,08	16,61	18,31	6,71	14,87	4,61
4	5	70	3146	0,63	13,62	13,54	35,40	23,27	5,43	25,59	31,79	10,64	11,53	4,99	6,94	1,53
12	5	70	3146	0,63	13,53	13,27	35,29	23,11	5,87	26,52	30,46	11,18	11,64	5,25	7,06	1,49
9	5,0	63	2860	0,63	13,52	10,52	35,12	14,50	6,64	23,31	35,20	10,04	10,27	3,82	8,25	2,17
11	5	70	2574	0,63	14,79	11,15	32,29	13,62	8,22	51,75	23,88	5,00	4,22	1,47	2,33	0,53
20	5	70	3146	0,63	13,99	13,22	36,11	23,23	5,53	27,98	31,69	10,20	11,96	5,41	7,77	1,54
6	5	70	2860	0,81	14,29	10,58	41,19	19,95	2,61	19,71	21,27	10,95	15,61	9,57	16,71	3,90
14	5	70	2860	0,81	14,66	10,57	42,42	19,79	2,51	20,49	20,36	11,33	16,47	10,12	16,41	3,77
22	5	70	2860	0,81	14,52	10,65	41,79	19,96	2,49	19,05	19,66	10,84	17,14	9,93	14,93	4,18

Таблица 3.2 - Результаты расчетных значений к дополнительному эксперименту

№ опыта	Продольный размер «живого» сечения, мм	Окружная скорость молотков, м/с	Частота вращения вентилятора, мин <sup>-1</sup>	Подача зерна, кг/с	M, мм	P <sub>xx</sub> , кВт			P <sub>эф</sub> , кВт			Э <sub>пол</sub> , кВт*ч/т*ед.ст.изм			Э <sub>эф</sub> , кВт*ч/т*ед.ст.изм		
						Дроб.	Вент.	Общ.	Дроб.	Вент.	Общ.	Дроб.	Вент.	Общ.	Дроб.	Вент.	Общ.
5	5	70	2860	0,45	1,76	3,85	3,59	7,45	9,61	5,26	14,87	1,56	0,45	2,01	2,60	1,43	4,03
13	5	70	2860	0,45	1,75	3,79	3,59	7,37	9,47	5,19	14,66	1,53	0,43	1,97	2,56	1,40	3,96
21	5	70	2860	0,45	1,78	3,87	3,47	7,34	9,34	5,23	14,57	1,50	0,48	1,99	2,57	1,44	4,00
2	5	77	2860	0,63	1,39	4,50	3,49	7,99	12,25	6,03	18,28	1,19	0,39	1,58	1,88	0,92	2,80
18	5	77	2860	0,63	1,38	4,51	3,57	8,09	11,97	5,99	17,96	1,14	0,37	1,50	1,82	0,91	2,74
17	5	63	2860	0,63	1,78	3,66	3,56	7,22	9,58	5,16	14,74	1,16	0,32	1,48	1,88	1,02	2,90
24	8	70	2860	0,63	1,99	3,96	3,77	7,73	9,63	5,45	15,08	1,24	0,37	1,61	2,11	1,19	3,30
23	3	70	2860	0,63	1,23	3,68	3,28	6,96	11,04	6,65	17,69	1,00	0,46	1,45	1,50	0,90	2,40
16	8	70	2860	0,63	1,99	3,91	3,87	7,78	9,36	5,47	14,83	1,20	0,35	1,55	2,06	1,20	3,26
1	5	63	2860	0,63	1,79	3,64	3,57	7,21	9,81	5,27	15,08	1,22	0,33	1,55	1,93	1,04	2,97
19	5	70	2574	0,63	2,22	4,02	3,88	7,90	8,65	4,75	13,39	1,13	0,21	1,34	2,12	1,16	3,28
15	3	70	2860	0,63	1,22	3,66	3,31	6,97	11,11	6,59	17,70	1,00	0,44	1,44	1,50	0,89	2,38
7	3	70	2860	0,63	1,22	3,67	3,29	6,96	11,36	6,52	17,88	1,03	0,44	1,47	1,53	0,88	2,40
8	8	70	2860	0,63	1,99	3,98	3,84	7,82	9,42	5,34	14,77	1,19	0,33	1,52	2,06	1,17	3,23
3	5	70	2574	0,63	2,20	3,93	3,80	7,73	8,82	4,86	13,68	1,18	0,26	1,44	2,14	1,18	3,31
10	5	77	2860	0,63	1,39	4,51	3,59	8,09	12,27	5,94	18,21	1,19	0,36	1,55	1,88	0,91	2,79
4	5	70	3146	0,63	1,78	3,60	4,74	8,34	9,83	8,24	18,07	1,22	0,69	1,91	1,93	1,61	3,54

продолжение таблицы 3.2

12	5	70	3146	0,63	1,79	3,57	4,63	8,20	9,80	8,19	17,98	1,22	0,70	1,92	1,93	1,61	3,54
9	5	63	2860	0,63	1,77	3,57	3,52	7,09	9,74	5,15	14,90	1,21	0,32	1,52	1,90	1,01	2,91
11	5	70	2574	0,63	2,20	3,92	3,77	7,69	8,90	4,78	13,68	1,21	0,25	1,45	2,16	1,16	3,32
20	5	70	3146	0,63	1,78	3,70	4,61	8,31	10,04	8,23	18,27	1,24	0,71	1,96	1,97	1,61	3,58
6	5	70	2860	0,81	1,46	3,78	3,54	7,32	11,66	7,07	18,73	0,99	0,44	1,43	1,46	0,88	2,34
14	5	70	2860	0,81	1,46	3,88	3,54	7,42	12,07	7,01	19,08	1,02	0,43	1,46	1,51	0,88	2,39
22	5	70	2860	0,81	1,45	3,85	3,57	7,42	11,86	7,07	18,93	1,00	0,44	1,43	1,48	0,88	2,35

**ПРИЛОЖЕНИЕ 4 – РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕШЕТ С ОТВЕРСТИЯМИ  
КРУГЛОЙ ФОРМЫ**

Таблица 4.1 – Результаты экспериментальных данных

№ опыта	диаметр отверстия решета, мм	Окружная скорость молотков, м/с	Частота вращения вентилятора, мин <sup>-1</sup>	Подача зерна, кг/с	Ток холостого хода, А		Ток рабочего хода, А		Остаток на ситах, г							
					Дроб	Вент	Дроб	Вент	3	2	1,5	1,3	1	0,8	0,2	дно
9	8	70	2860	0,63	14,33	9,84	40,73	16,80	5,98	45,98	18,29	5,35	6,35	4,20	11,90	3,93
4	6	70	2860	0,63	14,06	10,14	43,03	17,76	3,69	25,78	21,51	7,91	10,55	6,19	18,19	5,48
7	8	70	2860	0,63	14,15	10,20	41,09	16,78	6,41	42,89	17,45	4,72	6,61	3,97	11,92	3,56
2	4	70	2860	0,63	14,31	10,14	46,24	19,81	1,89	13,60	16,77	8,25	16,50	9,34	26,23	8,89
8	8	70	2860	0,63	13,95	10,20	41,19	16,82	6,35	46,04	17,21	4,73	6,63	4,22	11,76	3,57
6	6	70	2860	0,63	14,35	10,10	43,19	18,14	4,01	25,67	22,31	7,87	10,50	6,22	16,27	5,37
1	4	70	2860	0,63	14,28	10,13	45,72	20,00	1,80	13,55	15,78	8,98	16,59	9,50	24,75	8,53
5	6	70	2860	0,63	14,16	10,06	42,18	18,11	3,88	27,69	23,04	8,12	10,52	5,95	17,77	5,53
3	4	70	2860	0,63	13,91	10,13	46,04	19,59	1,72	11,82	17,01	8,74	15,38	9,65	26,37	8,36

Таблица 4.2 – Результаты расчетных данных

№ опыта	диаметр отверстия решета, мм	Окружная скорость молотков, м/с	Частота вращения вентилятора, мин <sup>-1</sup>	Подача зерна, кг/с	M, мм	P <sub>xx</sub> , кВт			P <sub>эф</sub> , кВт			Э <sub>пол</sub> , кВт*ч/т*ед.ст.изм			Э <sub>эф</sub> , кВт*ч/т*ед.ст.изм		
						Дроб.	Вент.	Общ.	Дроб.	Вент.	Общ.	Дроб.	Вент.	Общ.	Дроб.	Вент.	Общ.
9	8	70	2860	0,63	1,89	3,79	3,26	7,05	11,51	5,95	17,46	1,61	0,56	2,17	2,40	1,24	3,64
4	6	70	2860	0,63	1,55	3,72	3,37	7,09	12,27	6,29	18,56	1,46	0,50	1,95	2,09	1,07	3,16
7	8	70	2860	0,63	1,89	3,74	3,40	7,14	11,63	5,95	17,58	1,64	0,53	2,17	2,42	1,24	3,66
2	4	70	2860	0,63	1,21	3,79	3,37	7,16	13,35	7,02	20,37	1,28	0,49	1,76	1,78	0,94	2,72
8	8	70	2860	0,63	1,91	3,69	3,40	7,08	11,66	5,96	17,62	1,68	0,54	2,22	2,45	1,25	3,71
6	6	70	2860	0,63	1,57	3,80	3,36	7,16	12,33	6,43	18,75	1,48	0,53	2,01	2,14	1,11	3,25
1	4	70	2860	0,63	1,22	3,78	3,37	7,15	13,18	7,08	20,26	1,26	0,50	1,76	1,77	0,95	2,72
5	6	70	2860	0,63	1,57	3,75	3,34	7,09	11,99	6,41	18,40	1,43	0,53	1,96	2,08	1,11	3,19
3	4	70	2860	0,63	1,19	3,68	3,37	7,05	13,28	6,94	20,22	1,26	0,47	1,73	1,74	0,91	2,66

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5 - ФУНКЦИИ MS OFFICE EXCEL 2007 ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОШИБОЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА

Определение ошибочного значения результата эксперимента  $u_m$ :  
=ЕСЛИ((НАИБОЛЬШИЙ(А<sub>х</sub>:А<sub>у</sub>;k)-НАИБОЛЬШИЙ(А<sub>х</sub>:А<sub>у</sub>;m))/  
(НАИБОЛЬШИЙ(А<sub>х</sub>:А<sub>у</sub>;k)-НАИМЕНЬШИЙ(А<sub>х</sub>:А<sub>у</sub>;k))<А<sub>Е</sub>;  
"Нет";НАИБОЛЬШИЙ(А<sub>х</sub>:А<sub>у</sub>;k))

Определение ошибочного значения результата эксперимента  $u_l$ :  
=ЕСЛИ((НАИМЕНЬШИЙ(А<sub>х</sub>:А<sub>у</sub>;m)-НАИМЕНЬШИЙ(А<sub>х</sub>:А<sub>у</sub>;k))/  
(НАИБОЛЬШИЙ(А<sub>х</sub>:А<sub>у</sub>;k)-НАИМЕНЬШИЙ(А<sub>х</sub>:А<sub>у</sub>;k))<А<sub>Е</sub>;  
"Нет";НАИМЕНЬШИЙ(А<sub>х</sub>:А<sub>у</sub>;k))

Где:

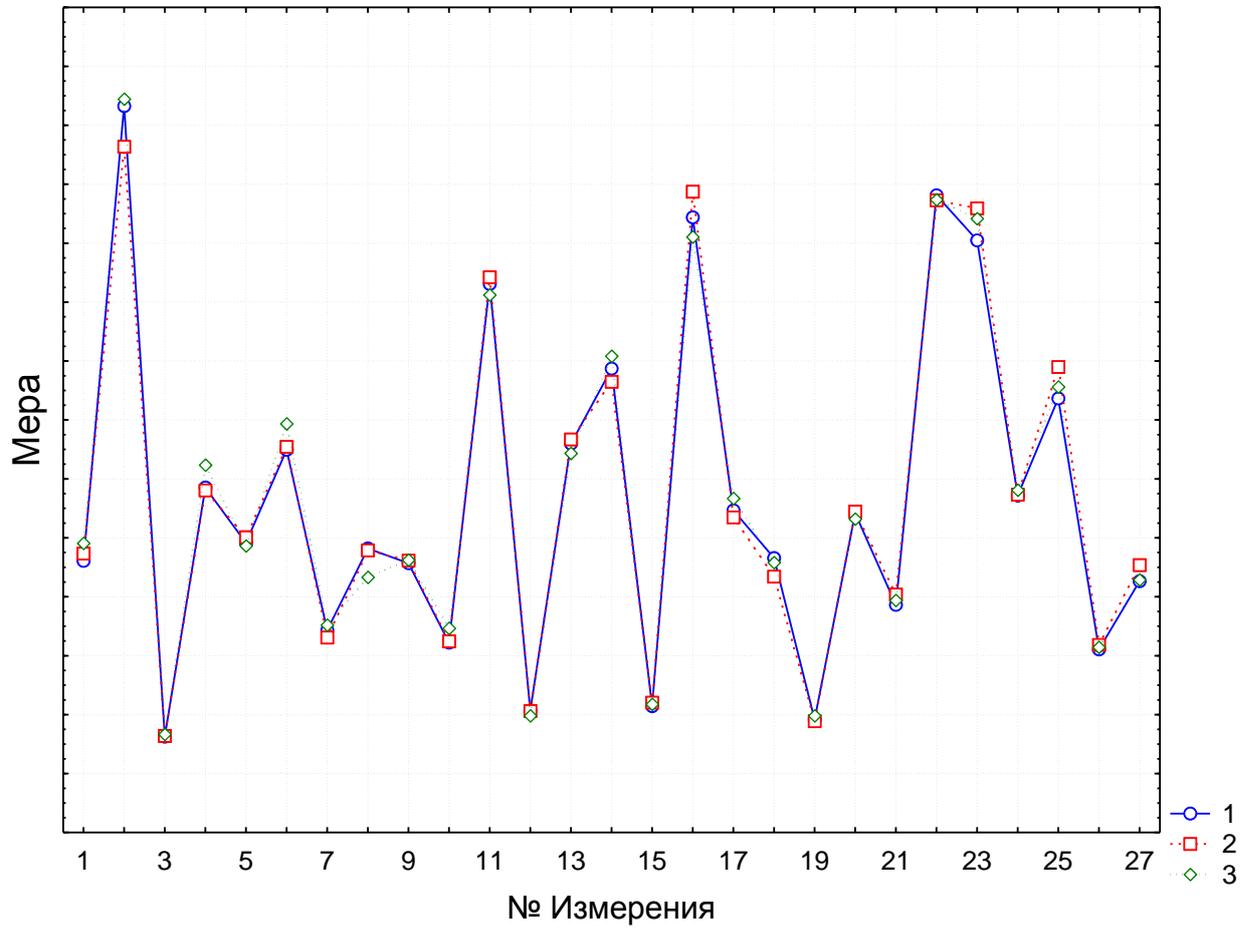
А<sub>х</sub>:А<sub>у</sub> - массив данных, подлежащих анализу;

к, m - порядковый номер экспериментального значения в ранжированном ряду;

«Нет» - ответ программы, если ошибки нет;

А<sub>Е</sub> - номер ячейки с табличным значением критерия.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 6 - РЕЗУЛЬТАТ ПРОВЕРКИ ЭКСПЕРИМЕНТА НА  
ПОВТОРЯЕМОСТЬ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ В ПРОГРАММЕ  
STATISTICA 10**



## ПРИЛОЖЕНИЕ 7 - РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА В ПРОГРАММЕ STATISTICA 10

Таблица 7.1 – Результат для определения уравнения регрессии *M*

	Regressn (Coeff.)	Std.Err.	t(64)	p	-95,% (Cnf.Limt)	+95,% (Cnf.Limt)
Mean/Interc.	6,131288	1,717038	3,570852	0,000682	2,701111	9,561465
Block(1)	0,016156	0,004995	3,234104	0,001932	0,006176	0,026135
Block(2)	-0,000729	0,004995	-0,14597	0,884404	-0,010709	0,00925
(1)Продольный размер "живого" сечения, мм(L)	0,488896	0,054906	8,904199	0	0,379208	0,598584
Продольный размер "живого" сечения, мм(Q)	-0,000107	0,001336	-0,079743	0,93669	-0,002776	0,002563
(2)Окружная скорость молотков, м/с(L)	-0,080948	0,026764	-3,02451	0,003582	-0,134415	-0,027481
Окружная скорость молотков, м/с(Q)	0,000554	0,000162	3,415396	0,001111	0,00023	0,000878
(3)Частота вращения вентилятора, мин-1(L)	-0,001745	0,000655	-2,664075	0,009757	-0,003054	-0,000436
Частота вращения вентилятора, мин-1(Q)	0	0	3,718223	0,000424	0	0,000001
(4)Подача, кг/с(L)	-0,009559	0,791896	-0,012071	0,990406	-1,591553	1,572434
Подача, кг/с(Q)	0,737763	0,2453	3,007588	0,003761	0,247719	1,227807
1L by 2L	-0,004236	0,000518	-8,184407	0	-0,00527	-0,003202
1L by 3L	0,000001	0,000013	0,070003	0,944409	-0,000024	0,000026
1L by 4L	-0,07046	0,020127	-3,500736	0,000851	-0,110669	-0,030251
2L by 3L	0,000001	0,000005	0,280715	0,779835	-0,000008	0,00001
2L by 4L	-0,009565	0,007284	-1,313286	0,193775	-0,024116	0,004985
3L by 4L	-0,000261	0,000178	-1,464395	0,147981	-0,000617	0,000095

Таблица 7.2 - Результат для определения уравнения регрессии  $m_0$ 

	Regressn (Coeff.)	Std.Err.	t(64)	p	-95,% (Cnf.Limt)	+95,% (Cnf.Limt)
Mean/Interc.	31,252049	21,54689	1,450421	0,151825	-11,79281	74,29691
Block(1)	-0,043968	0,062687	-0,701379	0,485609	-0,1692	0,081265
Block(2)	-0,090239	0,062687	-1,439514	0,154878	-0,215472	0,034993
(1)Продольный размер "живого" сечения, мм(L)	-1,946502	0,689012	-2,825064	0,006297	-3,322962	-0,570043
Продольный размер "живого" сечения, мм(Q)	0,068524	0,01677	4,086193	0,000125	0,035023	0,102025
(2)Окружная скорость молотков, м/с(L)	-0,429515	0,335857	-1,278863	0,205563	-1,100465	0,241436
Окружная скорость молотков, м/с(Q)	0,002623	0,002035	1,288807	0,202105	-0,001443	0,006689
(3)Частота вращения вентилятора, мин-1(L)	-0,002553	0,00822	-0,310606	0,757109	-0,018975	0,013869
Частота вращения вентилятора, мин-1(Q)	-0,000001	0,000001	-1,148647	0,254977	-0,000004	0,000001
(4)Подача, кг/с(L)	-16,811441	9,9374	-1,691734	0,095561	-36,66368	3,040797
Подача, кг/с(Q)	5,904346	3,078244	1,918089	0,059563	-0,245154	12,05385
1L by 2L	-0,013935	0,006495	-2,145593	0,035705	-0,02691	-0,00096
1L by 3L	0,000577	0,000159	3,629567	0,000565	0,000259	0,000895
1L by 4L	-0,506963	0,252575	-2,007177	0,048958	-1,011539	-0,002386
2L by 3L	0,00006	0,000058	1,035915	0,30414	-0,000055	0,000175
2L by 4L	0,156311	0,0914	1,710181	0,092077	-0,026282	0,338904
3L by 4L	0,001902	0,002237	0,850272	0,398344	-0,002567	0,006371

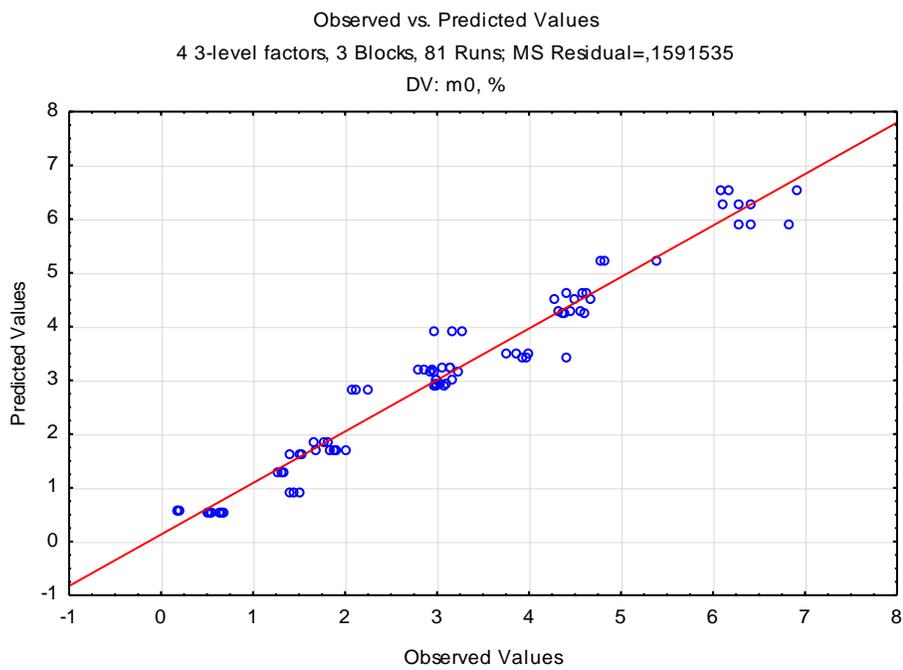
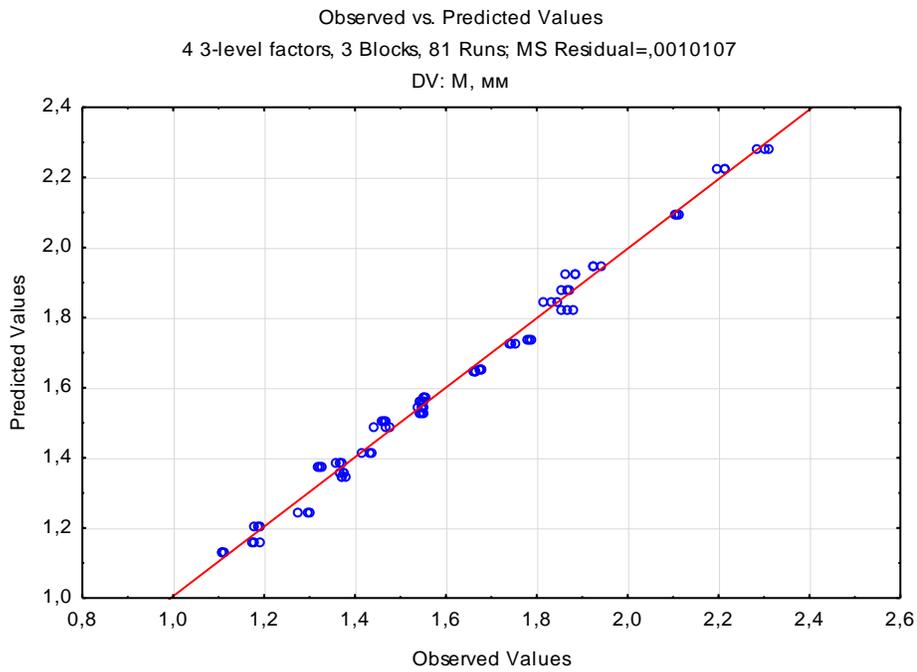
Таблица 7.3 - Результат для определения уравнения регрессии  $m_3$ 

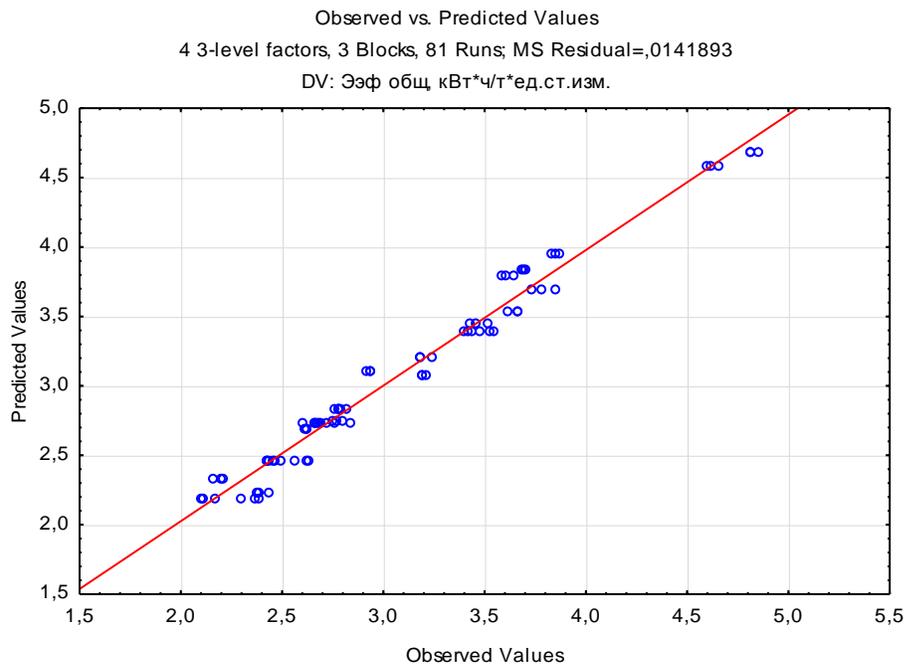
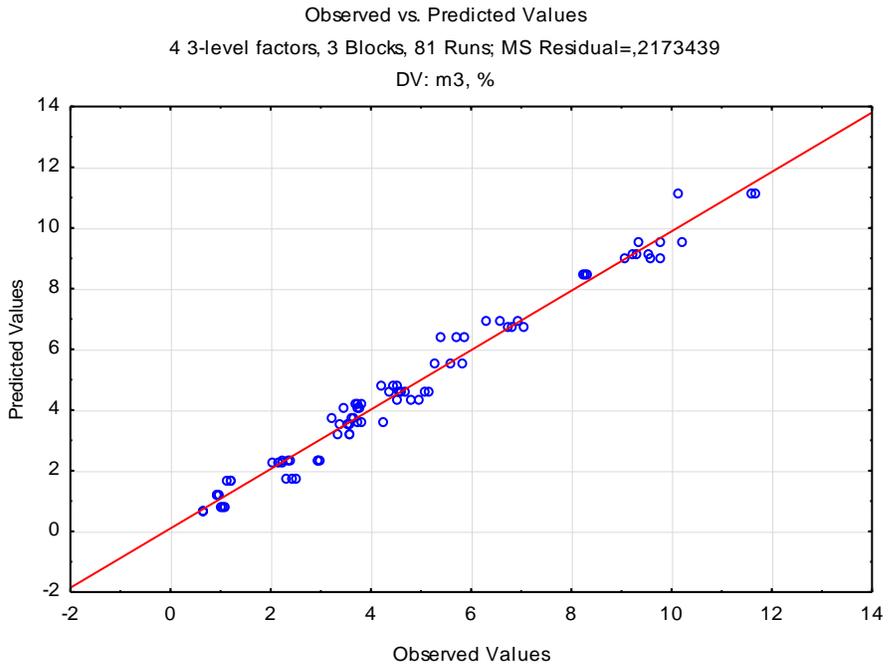
	Regressn (Coeff.)	Std.Err.	t(64)	p	-95,% (Cnf.Limt)	+95,% (Cnf.Limt)
Mean/Interc.	226,86407	25,17968	9,009808	0	176,5619	277,1663
Block(1)	0,051235	0,073257	0,699386	0,486845	-0,095112	0,197581
Block(2)	0,237494	0,073257	3,241948	0,001887	0,091147	0,38384
(1)Продольный размер "живого" сечения, мм(L)	1,133806	0,805179	1,408142	0,163928	-0,474723	2,742336
Продольный размер "живого" сечения, мм(Q)	-0,028165	0,019597	-1,437227	0,155525	-0,067315	0,010984
(2)Окружная скорость молотков, м/с(L)	-4,911258	0,392482	-12,51334	0	-5,69533	-4,127185
Окружная скорость молотков, м/с(Q)	0,032206	0,002379	13,53982	0	0,027454	0,036957
(3)Частота вращения вентилятора, мин-1(L)	-0,032363	0,009606	-3,36896	0,001282	-0,051553	-0,013172
Частота вращения вентилятора, мин-1(Q)	0,000005	0,000001	3,168613	0,002349	0,000002	0,000007
(4)Подача, кг/с(L)	-11,420029	11,61284	-0,983397	0,329115	-34,61934	11,77928
Подача, кг/с(Q)	11,468735	3,597234	3,188209	0,002216	4,282434	18,65504
1L by 2L	-0,041559	0,00759	-5,475615	0,000001	-0,056721	-0,026396
1L by 3L	0,001273	0,000186	6,850842	0	0,000902	0,001644
1L by 4L	-0,748679	0,295159	-2,536528	0,013646	-1,338326	-0,159031
2L by 3L	0,000089	0,000067	1,326195	0,189489	-0,000045	0,000223
2L by 4L	0,026836	0,10681	0,251248	0,802427	-0,186542	0,240214
3L by 4L	-0,002446	0,002614	-0,935522	0,353036	-0,007668	0,002777

Таблица 7.4 - Результат для определения уравнения регрессии  $\varepsilon_{\text{эф общ}}$ 

	Regressn (Co-eff.)	Std.Err.	t(64)	p	-95,% (Cnf.Limt)	+95,% (Cnf.Limt)
Mean/Interc.	22,308902	6,433651	3,467534	0,000944	9,456206	35,1616
Block(1)	0,066376	0,018718	3,54618	0,000737	0,028984	0,103769
Block(2)	-0,043024	0,018718	-2,298581	0,024805	-0,080417	-0,005631
(1)Продольный размер "живого" сечения, мм(L)	0,675889	0,205731	3,285307	0,001655	0,264895	1,086884
Продольный размер "живого" сечения, мм(Q)	0,000141	0,005007	0,028228	0,977568	-0,009862	0,010144
(2)Окружная скорость молотков, м/с(L)	-0,081745	0,100283	-0,815144	0,418013	-0,282083	0,118593
Окружная скорость молотков, м/с(Q)	0,001184	0,000608	1,947426	0,055874	-0,000031	0,002398
(3)Частота вращения вентилятора, мин-1(L)	-0,013879	0,002454	-5,654541	0	-0,018782	-0,008976
Частота вращения вентилятора, мин-1(Q)	0,000003	0	9,05722	0	0,000003	0,000004
(4)Подача, кг/с(L)	0,954919	2,967192	0,321826	0,748634	-4,972729	6,882567
Подача, кг/с(Q)	9,153922	0,919128	9,959355	0	7,317753	10,99009
1L by 2L	-0,003404	0,001939	-1,755401	0,083976	-0,007278	0,00047
1L by 3L	-0,000015	0,000047	-0,30879	0,758485	-0,000109	0,00008
1L by 4L	-0,354741	0,075416	-4,70379	0,000014	-0,505401	-0,20408
2L by 3L	-0,000013	0,000017	-0,780568	0,437934	-0,000048	0,000021
2L by 4L	-0,055806	0,027291	-2,044848	0,044987	-0,110326	-0,001286
3L by 4L	-0,003801	0,000668	-5,689727	0	-0,005135	-0,002466

## ПРИЛОЖЕНИЕ 8 – ГРАФИКИ СОГЛАСОВАНИЯ НАБЛЮДАЕМЫХ И ПРЕДСКАЗАННЫХ ЗНАЧЕНИЙ





## ПРИЛОЖЕНИЕ 9 - ЛИСТИНГ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ В СРЕДЕ МАТНСАД

k :=

	0	1	2	3	4
0	0	"Regressn (Coeff.)"	"Regressn (Coeff.)"	"Regressn (Coeff.)"	"Regressn (Coeff.)"
1	0	" M "	"m3"	"m0"	"Ээф общ"
2	"Mean/Interc."	6.131	226.864	31.252	22.309
3	"Block(1)"	0.016	0.051	-0.044	0.066
4	"Block(2)"	-7.292·10 <sup>-4</sup>	0.237	-0.09	-0.043
5	"(1)Продольный размер "живого" сечения, мм(L)"	0.489	1.134	-1.947	0.676
6	"Продольный размер "живого" сечения, мм(Q)"	-1.066·10 <sup>-4</sup>	-0.028	0.069	1.413·10 <sup>-4</sup>
7	"(2)Окружная скорость молотков, м/с(L)"	-0.081	-4.911	-0.43	-0.082
8	"Окружная скорость молотков, м/с(Q)"	5.54·10 <sup>-4</sup>	0.032	2.623·10 <sup>-3</sup>	1.184·10 <sup>-3</sup>
9	"(3)Частота вращения вентилятора, мин-1(L)"	-1.745·10 <sup>-3</sup>	-0.032	-2.553·10 <sup>-3</sup>	-0.014
10	"Частота вращения вентилятора, мин-1(Q)"	3.613·10 <sup>-7</sup>	4.515·10 <sup>-6</sup>	-1.401·10 <sup>-6</sup>	3.297·10 <sup>-6</sup>
11	"(4)Подача, кг/с(L)"	-9.559·10 <sup>-3</sup>	-11.42	-16.811	0.955
12	"Подача, кг/с(Q)"	0.738	11.469	5.904	9.154
13	"1L by 2L"	-4.236·10 <sup>-3</sup>	-0.042	-0.014	-3.404·10 <sup>-3</sup>
14	"1L by 3L"	8.868·10 <sup>-7</sup>	1.273·10 <sup>-3</sup>	5.77·10 <sup>-4</sup>	-1.466·10 <sup>-5</sup>
15	"1L by 4L"	-0.07	-0.749	-0.507	-0.355
16	"2L by 3L"	1.287·10 <sup>-6</sup>	8.915·10 <sup>-5</sup>	5.959·10 <sup>-5</sup>	-1.341·10 <sup>-5</sup>
17	"2L by 4L"	-9.565·10 <sup>-3</sup>	0.027	0.156	-0.056
18	"3L by 4L"	-2.611·10 <sup>-4</sup>	-2.446·10 <sup>-3</sup>	1.902·10 <sup>-3</sup>	-3.801·10 <sup>-3</sup>

$$E(l, V, n, Q) := k_{2,4} + k_{5,4} \cdot l + k_{6,4} \cdot l^2 + k_{7,4} \cdot V + k_{8,4} \cdot V^2 + k_{9,4} \cdot n + k_{10,4} \cdot n^2 + k_{11,4} \cdot Q + k_{12,4} \cdot Q^2 \dots$$

$$+ k_{13,4} \cdot l \cdot V + k_{14,4} \cdot l \cdot n + k_{15,4} \cdot l \cdot Q + k_{16,4} \cdot V \cdot n + k_{17,4} \cdot V \cdot Q + k_{18,4} \cdot n \cdot Q$$

$$l := 5V := 7(n := 286(Q := 0.6)$$

Given

$$1.56 = \left( k_{2,1} + k_{5,1} \cdot l + k_{6,1} \cdot l^2 + k_{7,1} \cdot V + k_{8,1} \cdot V^2 + k_{9,1} \cdot n + k_{10,1} \cdot n^2 + k_{11,1} \cdot Q + k_{12,1} \cdot Q^2 \dots \right)$$

$$+ k_{13,1} \cdot l \cdot V + k_{14,1} \cdot l \cdot n + k_{15,1} \cdot l \cdot Q + k_{16,1} \cdot V \cdot n + k_{17,1} \cdot V \cdot Q + k_{18,1} \cdot n \cdot Q$$

$$10 > k_{2,3} + k_{5,3} \cdot l + k_{6,3} \cdot l^2 + k_{7,3} \cdot V + k_{8,3} \cdot V^2 + k_{9,3} \cdot n + k_{10,3} \cdot n^2 + k_{11,3} \cdot Q + k_{12,3} \cdot Q^2 \dots$$

$$+ k_{13,3} \cdot l \cdot V + k_{14,3} \cdot l \cdot n + k_{15,3} \cdot l \cdot Q + k_{16,3} \cdot V \cdot n + k_{17,3} \cdot V \cdot Q + k_{18,3} \cdot n \cdot Q$$

$$3 > k_{2,2} + k_{5,2} \cdot l + k_{6,2} \cdot l^2 + k_{7,2} \cdot V + k_{8,2} \cdot V^2 + k_{9,2} \cdot n + k_{10,2} \cdot n^2 + k_{11,2} \cdot Q + k_{12,2} \cdot Q^2 \dots$$

$$+ k_{13,2} \cdot l \cdot V + k_{14,2} \cdot l \cdot n + k_{15,2} \cdot l \cdot Q + k_{16,2} \cdot V \cdot n + k_{17,2} \cdot V \cdot Q + k_{18,2} \cdot n \cdot Q$$

$$3 \leq l \leq 8 \quad 63 \leq V \leq 71 \quad 2574 \leq n \leq 3146 \quad 0.45 \leq Q \leq 0.81$$

$$\begin{pmatrix} l \\ V \\ n \\ Q \end{pmatrix} := \text{Minimize}(E, l, V, n, Q) = \begin{pmatrix} 6.465 \\ 70.976 \\ 2.703 \times 10^3 \\ 0.81 \end{pmatrix}$$

$$E(l, V, n, Q) = 2.424$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 10 – АКТ О ПРОВЕДЕНИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

УТВЕРЖДАЮ

Глава КХ «Искра»

  
В. В. Черепков  
«5» 09 2015 г.



УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО Орловский ГАУ

  
Н. В. Парахин  
«02» сентября 2015 г.



АКТ

о проведении производственных испытаний

Комиссия в составе главы КХ «Искра» Орловской обл., Дмитровского р-на В. В. Черепкова, зав. кафедрой Механизации технологических процессов в АПК ФГБОУ ВО Орловский ГАУ к. т. н., доцента А. В. Волженцева составила настоящий акт о проведении производственных испытаний молотковой дробилки с регулятором «живого» сечения и раздельным частотно-регулируемым приводом ротора и вентилятора.

В присутствии комиссии на экспериментальной установке было произведено измельчение исходного материала, имеющего следующие параметры: культура - ячмень, зерновая примесь - 1,4 %, влажность - 13,4 %, натуральный вес - 730 г/л. По результатам производственных испытаний производительность экспериментальной установки составила 0,81 кг/с, модуль помола - 1,56 мм, содержание пылевидной фракции 3,00 %, остаток на сите с диаметром отверстий 3 мм - 3,00 %, удельная энергоёмкость с учетом степени измельчения - 2,42 кВт\*ч/т\*ед.ст.изм. Также установлено, что в данной конструкции молотковой дробилки возможно бесступенчато изменять степень помола, не используя при этом сменные решета.

Считаем целесообразным применение регулятора «живого» сечения и раздельного частотно-регулируемого привода ротора дробилки и вентилятора.

Глава КХ «Искра»

  
В. В. Черепков



Заведующий кафедрой Механизации  
технологических процессов в АПК

  
А. В. Волженцева

## ПРИЛОЖЕНИЕ 11 – СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС

«УТВЕРЖДАЮ»  
Проректор по научной работе  
ФГБОУ ВО Орловский ГАУ  
д. т. н., профессор  
Родимцев С. А.

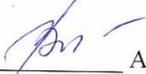


« 15 » 20 15 г.

### СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ

Отдельные результаты кандидатской диссертационной работы Черепкова А. В., на тему «Совершенствование процесса измельчения зерна с обоснованием конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки», внедрены на кафедре Механизации технологических процессов в учебном процессе по направлению 35.03.06 – «Агроинженерия» в дисциплинах: «Машины и технологии в животноводстве», «Ресурсосберегающие технологии и машины в животноводстве», «Технологии, механизация и автоматизация в современных фермерских хозяйствах», а также по направлению 36.03.02 – «Зоотехния» в дисциплине «Механизация, электрификация и автоматизация в животноводстве».

Зав. кафедрой Механизации технологических  
процессов в АПК, к. т. н., доцент

  
А. В. Волженцев

Научный руководитель, декан ф-та Агротехники  
и энергообеспечения, к. т. н., доцент

  
И. В. Коношин