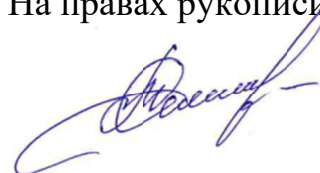


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В.Я. ГОРИНА»

На правах рукописи



Семернина Марина Александровна

**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ДРОБИЛКИ ПРОРОЩЕННОГО ЗЕРНА**

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Саенко Ю.В.

Белгород - 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ ДРОБЛЕНИЯ ПРОРОЩЕННОГО ЗЕРНА.....	11
1.1 Классификация способов и технических средств для измельчения зерна	11
1.2 Анализ технических решений дробилок	13
1.3 Анализ состояния исследований.....	36
1.4 Цель и задачи исследования.....	36
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО- РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ДРОБИЛКИ.....	39
2.1 Общее устройство и принцип работы предложенной дробилки пророщенного высушенного зерна	39
2.2 Построение блок - схемы дробилки пророщенного зерна.....	40
2.3 Анализ работ по измельчению кормов.....	42
2.4 Теоретические исследования процесса измельчения пророщенного зерна.....	47
2.4.1 Общая постановка задач теоретических исследований	47
2.4.2 Анализ механических факторов, определяющих процесс измельчения.....	50
2.5 Обоснование конструктивных параметров дробилки.....	54
2.5.1 Определение размеров молотков.....	55
2.5.2 Определение числа молотков и ножей.....	56
2.6 Теоретическое обоснование угла заточки ножа.....	58
2.7 Результаты расчета.....	62
2.8 Обоснование производительности дробилки.....	68
2.9 Расчет энергетических показателей процесса измельчения.....	71
Выводы.....	75

3	МЕТОДИКА	ПРОВЕДЕНИЯ	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ	
	ИССЛЕДОВАНИЙ ДРОБИЛКИ	ПРОРОЩЕННОГО ЗЕРНА	.....	77
3.1	Общая постановка вопроса	.....		77
3.2	Методика проведения экспериментальных исследований дробилки пророщенного зерна	.....		79
3.3	Методика исследования гранулометрического состава кормов	.....		82
3.4	Методика исследования однородности измельченного пророщенного зерна	.....		86
3.5	Методика исследования плотности пророщенного измельченного зерна	.....		86
3.6	Методика определения влажности пророщенного высушенного измельченного зерна	.....		88
3.7	Методика определения энергетических показателей дробилки при измельчении пророщенного зерна	.....		90
3.8	Методика оценки производительности дробилки пророщенного зерна	.....		92
3.9	Методика оценки структуры пророщенного измельченного зерна	.....		93
3.10	Статистическая оценка результатов эксперимента и определение значимости коэффициентов уравнения регрессии	.....		94
3.11	Общее устройство и принцип работы предложенной дробилки пророщенного высушенного зерна	.....		97
	Выводы	.....		107
4	РЕЗУЛЬТАТЫ	И	АНАЛИЗ	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
	ИССЛЕДОВАНИЙ	.....		108
4.1	Результаты экспериментальных исследований энергоемкости процесса измельчения пророщенного зерна	.....		108
4.2	Результаты определения влажности и плотности пророщенного зерна	.....		110
4.3	Результаты экспериментальных исследований производительности дробилки пророщенного зерна	.....		111

4.4	Результаты оценки структуры пророщенного измельченного зерна.....	112
4.5	Результаты экспериментальных исследований процесса измельчения пророщенного зерна	115
4.6	Результаты экспериментальных исследований оценки размера измельченных частиц	123
4.7	Результаты многофакторного эксперимента по влиянию конструктивных и технологических параметров на энергоемкость процесса измельчения и производительность дробилки	126
	Выводы	129
5	ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	132
5.1	Технико-экономический анализ эффективности применения дробилки пророщенного зерна	132
	Выводы	138
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	139
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	143
	ПРИЛОЖЕНИЯ	163

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Российской Федерации особое внимание уделено развитию сельского хозяйства. Сейчас как растениеводство, так и животноводство нуждаются в новых и в тоже время простых и понятных технологиях и технических решениях.

Для получения мяса выращивают крупный рогатый скот, птицу, а также свиней. На сегодняшний день свиноводство очень развитая отрасль. Это выгодно по ряду показателей. Прежде всего, свиньи очень быстро растут. Низкое отношение потребления корма на килограмм привеса [1, 2]. Отличаются свиньи высокой плодовитостью и коротким временем воспроизводства. Мясо свиней ценится по своим вкусовым качествам и питательным свойствам. Мясо и сало хорошо перевариваются на 95 и 98% соответственно.

При промышленном ведении свиноводства животных содержат в помещениях безвыгульно и кормят только комбикормами.

Правильное, полноценное кормление животных может быть выполнено только при знании их потребности и обеспечения в элементах питания, минеральных веществах, витаминах [3].

В процессе эволюции организм животных приспособился к большому многообразию кормов, одним из которых являются зелёные корма. При выдаче животному кормов питательные вещества воздействуют на организм животного не отдельно друг от друга, а в совокупности [4 - 13]. Одним из дешевых способов обогащения комбикорма естественными витаминами является добавление пророщенного зерна в комбикорм. При выдаче пророщенного зерна отдельно от комбикорма, более сильные животные будут поедать большую часть, а слабые - будут получать меньше рассчитанной нормы. Чтобы все животные, находящиеся в боксе, получали массу пророщенного зерна, прямо пропорционально съеденному корму, необходимо в комбикорм добавить пророщенное зерно и получить, таким образом, кормовую смесь. Пророщенное зерно является

неоднородной структурой, оно состоит из самого зерна и ростка, то есть представляет собой неоднородную массу [2, 14, 15]. Средняя длина ростка составляет 2,5 - 3 см, что превышает размеры частиц комбикорма [15 - 17]. Чтобы получить кормовую смесь на основе пророщенного зерна необходимо его измельчить, затем перемешать пророщенное зерно с комбикормом [16, 17].

Чтобы измельчить неоднородный материал, которым является пророщенное зерно нужно использовать различные виды рабочих органов. Для измельчения зерна применяют молотки, а для измельчения ростков используют ножи.

В вопросах измельчения кормов авторы применяют различные подходы к комплексной оценке технических средств и их функционированию.

Сложность измельчения пророщенного зерна заключается в том, что материал является неоднородной средой и состоит из более плотной зерновки и менее плотного ростка, которые отличаются друг от друга плотностью, твердостью, геометрическими размерами, структурой, скоростью витания, коэффициентом парусности. После измельчения из различных материалов необходимо получить одинаковые по размеру частицы. Разработка технических средств, обеспечивающих получение из пророщенного зерна однородной измельченной массы, является важной задачей.

На основании выполненных исследований в диссертации решена задача, заключающаяся в теоретическом обобщении процесса резания ростков пророщенного зерна, разработки теоретических аспектов дробилки.

Цель работы - повышение эффективности измельчения пророщенного зерна за счет оптимизации конструктивно-технологических параметров дробилки.

Задачи исследований:

1. обосновать конструктивно-технологическую схему дробилки с учетом неоднородной структуры пророщенного зерна;
2. разработать математические модели, учитывающие число молотков и ножей; обосновать углы заточки ножей; влияние конструктивных и конструктивно-режимных параметров дробилки на качественные показатели

процессов; провести расчет производительности дробилки и энергетических показателей процесса измельчения;

3. разработать методики оценки качественных и количественных показателей работы дробилки;

4. провести экспериментальные исследования и определить влияние конструктивно-режимных параметров на качественные и количественные показатели работы дробилки, выполнить оптимизацию конструктивных и режимных параметров дробилки пророщенного зерна;

5. выполнить производственную проверку и оценить технико-экономические показатели дробилки пророщенного зерна.

Объект исследования. Процесс измельчения пророщенного зерна рабочими органами дробилки.

Предмет исследования. Закономерности измельчения ростков пророщенного зерна рабочими органами дробилки.

Научную новизну составляют:

Конструктивная схема дробилки пророщенного зерна с комбинированной дробильной камерой; математические модели, учитывающие влияние конструктивных параметров и режимов работы дробилки пророщенного зерна на процесс измельчения; результаты оптимизации конструктивно-режимных параметров дробильной камеры на основе методов безразмерных критериев оптимизации.

Теоретическую значимость представляют:

– моделирование процесса измельчения пророщенного зерна в дробильной камере, в которой продукт разделяется на потоки с различными физическими свойствам, а измельчение осуществляется двумя типами рабочих органов;

– полученные модели и зависимости, позволяющие оценить эффективность процесса измельчения с учетом геометрии рабочих органов и динамики процесса, включающие математические модели расчета: молотков и ножей, установленных соответственно на молотковом и ножевом барабанах.

Практическую ценность представляют:

– конструктивно-технологическая схема дробилки пророщенного зерна, которая обеспечивает равномерное измельчение зерна и ростков (патент РФ № 2692559, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU № 2019616509, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU № 2021619705).

– оптимизация технологического процесса измельчения пророщенного зерна, выполняемого предлагаемой дробилкой по энергоемкости измельчения пророщенного зерна от угла заточки ножа и модуля помола, частоты вращения ножевого барабана;

– результаты экспериментальных исследований и регрессионные зависимости, учитывающие влияние частоты вращения дробильного и ножевого барабанов, толщины молотка, диаметра дробильного барабана; расстояния между ножами, угла заточки лезвия ножа на модуль помола пророщенного зерна;

– рекомендуемые конструктивно-режимные параметры дробилки, обеспечивающие равномерность измельчения зерна и ростков, согласно зоотехническим требованиям;

– результаты производственной проверки дробилки пророщенного зерна в условиях КФХ Юрьев А.Ю.

Реализация результатов исследований.

Дробилка пророщенного зерна прошла производственную проверку в Крестьянском (фермерском) хозяйстве Юрьев А.Ю. в Валуйском районе Белгородской области и показала высокую эффективность, и надежность работы оборудования.

Материалы исследований по разработке средств механизации проращивания и подготовки зерна к скармливанию используются в качестве методических пособий в учебном процессе ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ.

Степень достоверности. Достоверность результатов и выводов, полученных в диссертации, обеспечивается применением общенаучных методов

и приемов. Экспериментальные исследования выполнены на современном оборудовании по апробированным методикам. Сходимость теоретических и экспериментальных данных позволяет говорить об адекватности предложенных математических моделей и не противоречит фактам, известным из специальной литературы.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы были доложены и одобрены на научной конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и специалистов в Белгородском ГАУ «Инновационные решения в аграрной науке – взгляд в будущее» (28 - 29 мая 2019 года); на национальной международной научно-производственной конференции «Наука аграрному производству: актуальность и современность» (2018 года); на научно-практической конференции «Механизация и автоматизация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве» Воронежский ГАУ, 2020 г.; на расширенном заседании кафедры «Машины и оборудование в агробизнесе» Белгородский ГАУ, 2021 г.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных научных задач использовались фундаментальные физические законы и математические методы исследования. С помощью математического анализа и законов механики производили теоретическое обоснование процесса измельчения, а при помощи методов регрессионного анализа и оценки достоверности результатов определяли оптимальные параметры и режимы работы дробилки пророщенного зерна. Экспериментальные исследования проводились стандартными и частными методами и инструментами. В результате проведённых экспериментов полученные значения обрабатывали с использованием ПЭВМ.

Положения, выносимые на защиту:

– конструктивно-технологическая схема дробилки пророщенного зерна, отличающаяся дробильной камерой, имеющей два типа рабочих органов: для дробления и резания продукта;

– математические модели и результаты теоретических исследований, включающие расчеты производительности с учетом конструктивно-технологических параметров дробильной камеры; расчет числа рабочих органов, установленных в дробильной камере с учетом скорости подачи продукта, частоты вращения ножевого барабана; расчет геометрии ножа с учетом прочностных свойств материала на основе безразмерных критериев; расчет удельных затрат на измельчение с учетом степени измельчения продукта;

– результаты экспериментальных исследований и регрессионные зависимости, включающие: влияние конструктивно-режимных параметров на модуль помола и энергетические показатели процесса измельчения;

– результаты производственных испытаний и технико-экономической оценки дробилки пророщенного зерна.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 14 научных работ, в том числе 5 в рецензируемых изданиях из перечня ВАК, 1 патент на изобретение, 2 свидетельства о государственной регистрации программы на ЭВМ. Общий объем публикаций составляет 4,19 печ. л., из которых 3,2 печ. листа принадлежат лично автору.

Структура и объем работы. Диссертационная работа представлена на 180 страницах машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников литературы из 158 наименований, в том числе 6 - на иностранных языках, содержит 83 рисунка, 12 таблиц и 9 приложений.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ ДРОБЛЕНИЯ ПРОРОЩЕННОГО ЗЕРНА

1.1 Классификация способов и технических средств для измельчения зерна

Основу комбикормов составляет подготовленное соответствующим образом зерновое сырье, а также различные кормовые добавки и премиксы [1, 2, 6 - 9]. Технологический процесс подготовки зерновой части комбикорма состоит из последовательных операций: выделение из зерна примесей, измельчение зерна, дозирование отдельных компонентов в смеситель согласно рецепту, перемешивание, учет полученного комбикорма.

Машины для измельчения кормового сырья различны по принципу действия. Могут быть универсальными, или специализированными [18 - 21]. При работе вальцовых мельниц происходит затягивание материала в зазор между вальцами и происходит его разрушение. Вальцы осуществляют вращение с различными частотами. Конечный размер продукта регулируют путем изменения зазора между вальцами. В жерновых мельницах один валец вращается от привода, а другой за счет сил трения между измельчаемым продуктом и ведущим жерновом. Такой способ измельчения применяют в жерновых мельницах.

В плющилках применяют схожую конструкцию с той разницей, что на выходе получают не измельченный в муку продукт, а сплюснутый в хлопья. Толщина полученных хлопьев зависит от зазора между плющильными вальцами и влажностью продукта.

В процессе измельчения зерна происходит увеличение площади поверхности частиц, поэтому попадая в организм животных, такой продукт большей поверхностью по сравнению с неизмельченным продуктом будет взаимодействовать с желудочным соком животного, в результате чего питательные вещества усвоятся в большей степени [20 - 22]. Скармливание переизмельченного продукта может привести к заболеванию желудочно-кишечного тракта. Конечный размер частиц измельченного продукта зависит от

вида животного, или птицы, возрастной группы. Так для кормления свиней размер частиц комбикорма должен составлять 0,9 - 1,4 мм [23, 24], для птиц 1,8 - 2,5 мм, для добавления в корм крупному рогатому скоту 1,0 - 1,9 мм.

Оценку измельченного продукта необходимо давать не только по удельным затратам энергии на измельчение, по модулю помола, но и по наличию пылевидной фракции (менее 0,25 мм) в измельченном корме. Переизмельчение корма приводит к увеличению энергоемкости процесса.

Для получения установленных конечных размеров зерно измельчают на дробилках различных конструкций. Если материал имеет куски больших размеров, то сначала выполняют предварительное измельчение, а затем основное измельчение [25, 26].

Большое распространение получили молотковые дробилки за свою простоту конструкции, высокую надежность. Молотковые дробилки используют для измельчения: зерна, шрота, жома. Устанавливая решетку с различным диаметром отверстий, регулируем необходимый размер частиц. С учетом влажности массы, прочности, пропускная способность и энергоемкость дробилок колеблется в широких диапазонах [23, 26]. Но у молотковых дробилок есть и некоторые недостатки, одним из которых является неодинаковый размер частиц измельченного продукта.

Работу измельчителей считают удовлетворительной, если обеспечивается установленный конечный размер частиц. Ячмень нужно измельчать таким образом, чтобы остаток на сите с отверстиями от 0 до 0,2 мм был менее 10%.

Чтобы снизить энергоемкость процесса измельчения необходимо разрабатывать камеру измельчения, а также подбирать рабочие органы дробилки с учетом физико-механических свойств измельчаемого продукта. Добиться минимальной длины холостого хода измельчаемых частиц внутри камеры измельчения. Для измельчения продуктов имеющих неоднородную структуру необходимо использовать различные рабочие органы.

1.2 Анализ технических решений дробилок

Работа агрегатов для приготовления корма состоит в том, чтобы воздействовать на кормовое сырьё различными способами, такими как температура, влажность, давление, механические способы - усилие со стороны ножа, молотка и ряд других [27 - 57]. Применение указанных способов приводит к изменению формы, размеров, физико-механических свойств исходного сырья, которое применяют для получения кормов.

Нужно отметить, что механические способы подготовки исходного сырья являются одними из основных. Так как при механической подготовке сырья – измельчении увеличивается общая поверхность частиц корма, то при последующей подготовке, например, температурной, частицы более полно будут взаимодействовать с обрабатываемой средой, это будет способствовать меньшему расходу теплоносителя.

Для подготовки зерна к скармливанию используют такие способы как: плющение, дробление [23]. При плющении зерна получают плоские хлопья толщиной 0,5 - 1 мм. Эти хлопья имеют влажность более 14 %. Необходимо отметить, что для возможности хранения зерна или добавления его в комбикорм и последующего хранения его влажность не должна превышать 14 %. При измельчении зерна дроблением происходит его механическое разрушение молотками. Конечным продуктом после измельчения зерна являются частицы размером от нескольких десятых, до нескольких миллиметров. Особенностью пророщенного зерна является то, что продукт состоит из самого зерна и зелёного ростка. Нужно отметить, что для измельчения зерна влажностью не более 14 % в качестве рабочего органа используют молоток, которым выполняют удар. Сила удара и возникшие в результате этого внутренние напряжения в материале превышает силу молекулярного сцепления зерна, это приводит к разрыву продукта. Для измельчения зелёной массы применяют способ резания и для его осуществления используют ножи.

На рисунке 1.1 представлена классификация дробилок зерна.

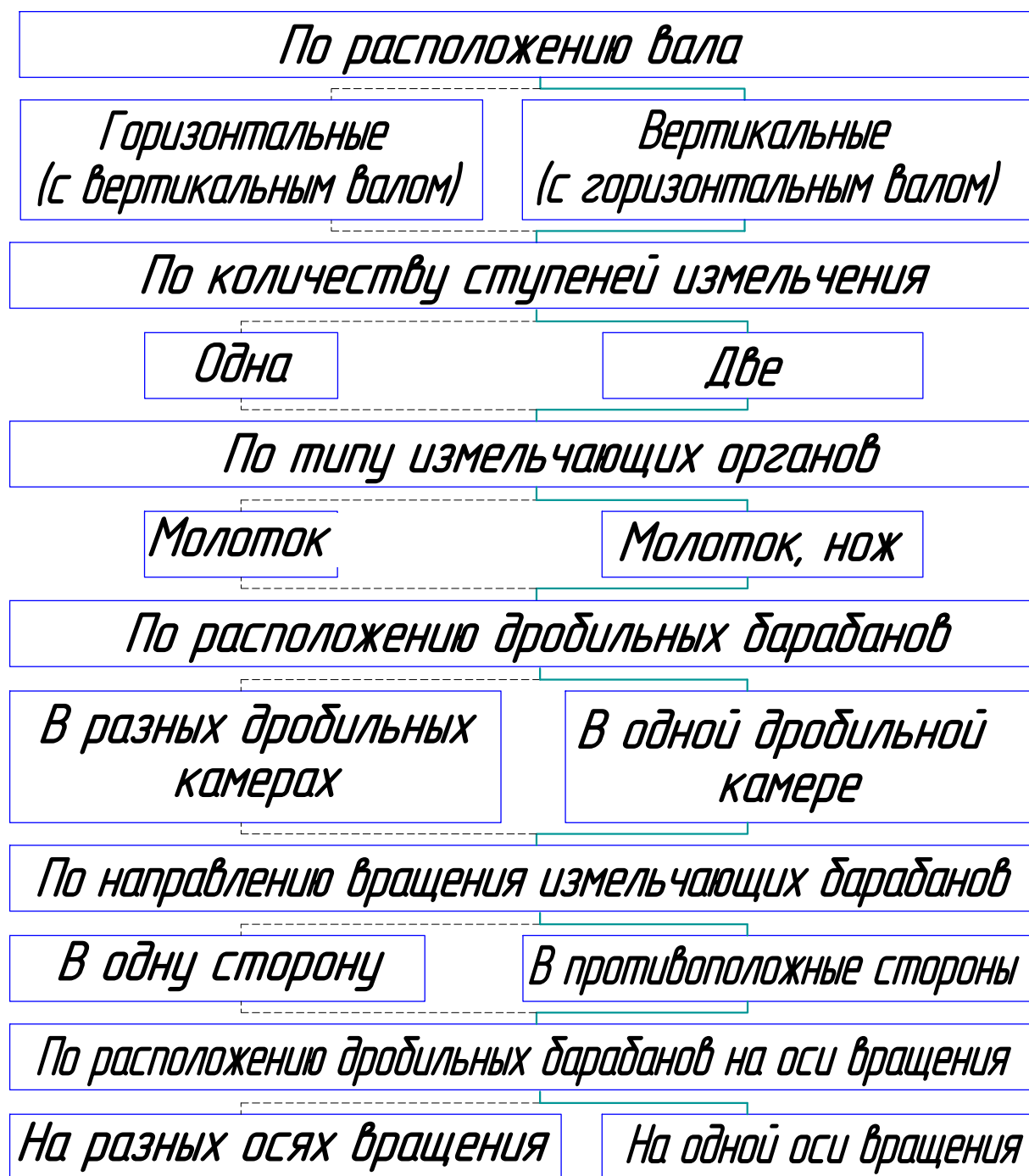
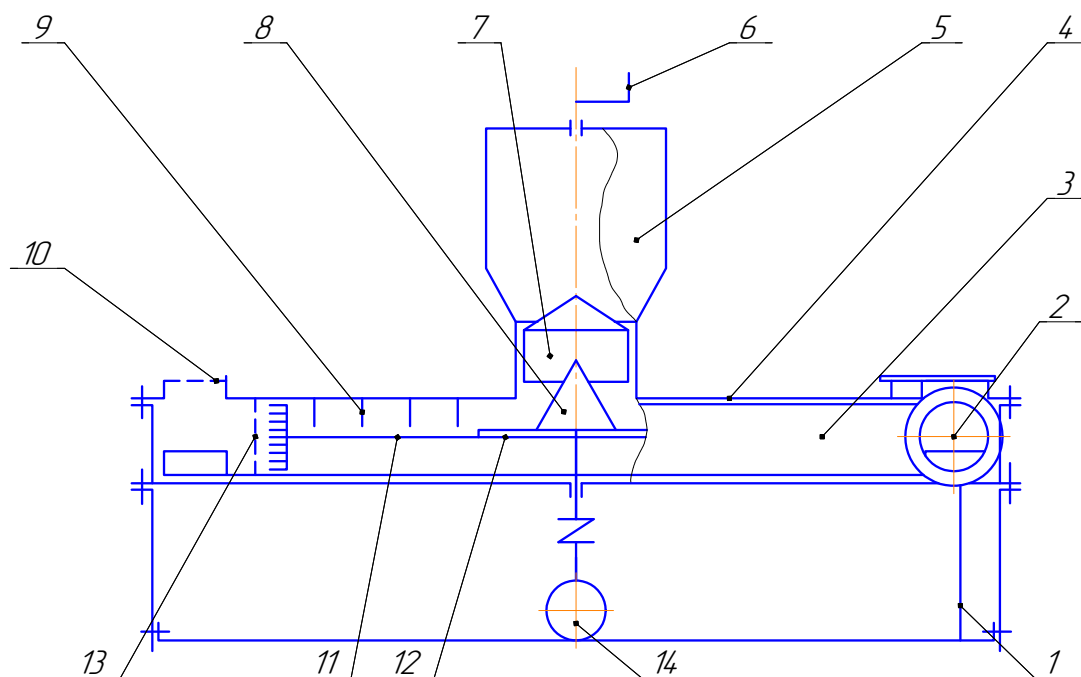


Рисунок 1.1 – Классификация агрегатов для дробления пророщенного зерна

В 2017 году в Курской ГСХА специалистами Коняевым Н.В., Блинковым Б.С., Сараевым И.Ф. [58] была предложена конструкция дробилки зерна, которая предложена на рисунке 1.2.

Приведенный агрегат работает так. В загрузочный бункер подают продукт, который под действием сил тяжести поступает на конус и распределяется по его периферии и попадает на диск, который, приводится в работу электродвигателем.

Находясь на подвижном диске, продукт взаимодействует со штифтами, таким образом, происходит его измельчение. После этого за счет центробежных сил, измельченная масса проходит через отверстие решета.



1 – рама; 2 – патрубок; 3 - камера рабочая; 4 - крышка; 5 – бункер; 6 - привод; 7 – обечайка цилиндрическая; 8 - конус; 9 - штифт; 10 - воздухозаборник; 11 – диск; 12 – кольцо магнитное; 13 – решето; 14 - электродвигатель.

Рисунок 1.2 – Дробилка зерна

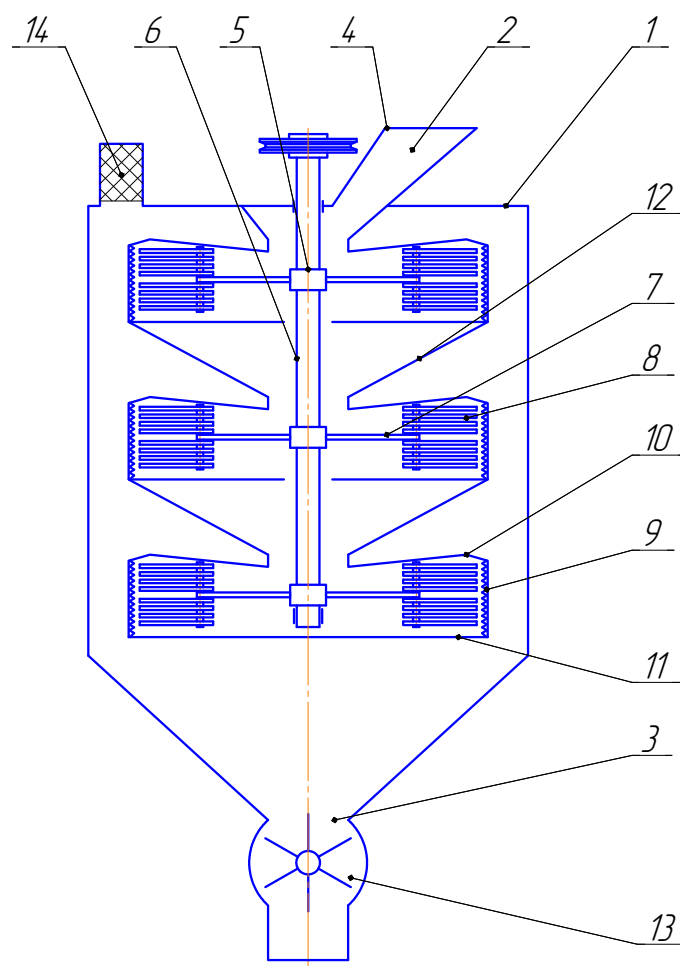
Недостаток конструкции состоит в том, что штифты расположены на большом расстоянии друг от друга, что не позволяет получать мелкую фракцию продукта измельчения.

Сотрудники Вятской ГСХА Алешкин В.Р., Баранов Н.Ф., и другие в 1999 году разработали дробилку (рисунок 1.3) [59].

Работа дробилки зерна протекает так. Электродвигатель при помощи клиноременной передачи приводит в работу ротор 5, на котором размещены рабочие органы. Продукт, который нужно измельчить загружают в бункер 4, после чего он скатывается по наклонной поверхности на центр разгонного диска первой ступени измельчения. Продукт, который находится на разгонном диске, за счет центробежных сил, направляется от центра диска 7 к периферии, затем

происходит взаимодействие массы с молотками 8 и декой 9 в результате разрушается масса. Частицы, отлетевшие от деки 9, также повторно попадают на движущиеся молотки. Измельчение происходит за счет последовательного прохода массы через несколько ступеней рабочих органов.

Промежуточное накопление измельченного, или частично измельченного материала осуществляют в дробильной камере. Разгонными дисками 7 и молотками 8 создается восходящий поток воздуха, который через верхний сепаратор 10 подает измельченный материал из камеры измельчения во внутреннее пространство корпуса 1. В дробильную секцию расположенную посередине попадает более крупная фракция, которая не прошла через сепаратор.



- 1 – стенка корпуса; 2 - патрубок загрузочный; 3 - отверстие для выгрузки; 4 - бункер;
 5 - ротор; 6 - вал приводной; 7 - диски разгонные; 8 - молоток; 9 - дека; 10, 11 - решето;
 12 - поверхность наклонная; 13 - дозатор лопастной; 14 - элемент фильтрующий.

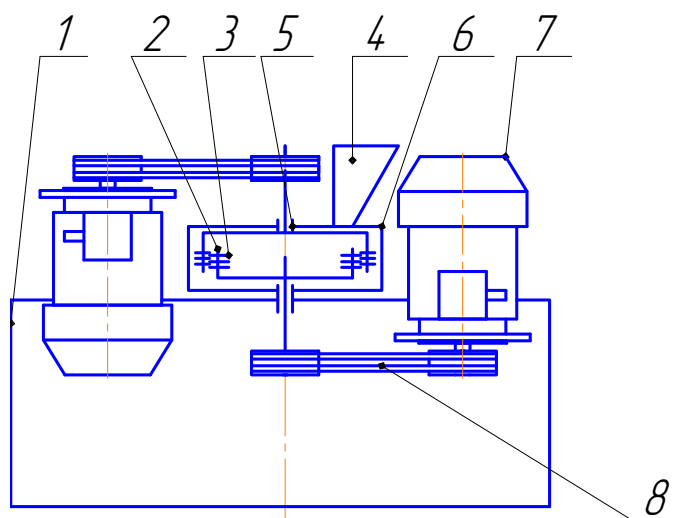
Рисунок 1.3 - Многоступенчатая дробилка

Дробильная секция расположенная посередине работает аналогично верхней после аналогичного прохождения заключения третьей ступени продукт, который подвергается измельчению, остается внутри на наклонной поверхности и постепенно скатывается вниз, затем происходит его накопление перед выгрузным отверстием и при помощи лопастного дозатора выгружается из дробильной установки. Воздух, находящийся внутри дробилки, и содержащий продукты размола, проходит через фильтр, а затем выходит в атмосферу.

При измельчении масса проходит через несколько измельчающих роторов и оказывается переизмельченной. Это является следствием конструктивных недостатков дробилки. При работе молотков возникают осевые нагрузки на молотки, которые приводят к их преждевременному износу. Также три ротора, установленные на одном валу сложнее балансировать. Поэтому дробилка будет подвержена дополнительным вибрациям.

Есть ударно-центробежная дробилка с двумя встречно-вращающимися коаксиально расположенными роторами [26].

Конструкция дробилки включает в себя раму 1 (рисунок 1.4) опорную



1 – рама; 2 – ротор; 3 – элемент измельчающий; 4 – бункер приемный; 5 – опора;
6 – крышка; 7 – электродвигатель; 8 – передача ременная.

Рисунок 1.4 – Дробилка ударно-центробежная

плиту, рабочие органы в виде встречно вращающихся роторов 2 и 3. На роторах в четыре ряда шарнирно закреплены молотки. Роторы установлены в кожухе

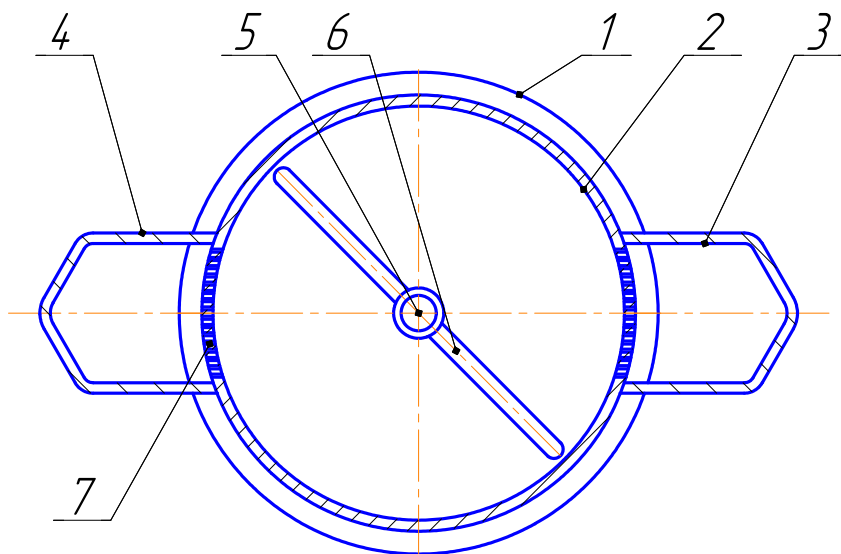
дробильной камеры. Выгрузной патрубок на кожухе дробильной камеры выполнен тангенциально. Загрузочное окно приемного бункера выполнено в виде четырех сегментных пазов.

Роторы установлены таким образом, что молотки, закрепленные во внешнем роторе, входят в зазоры, между молотками, которые расположены на внутреннем роторе. В результате образуются две ступени активного измельчения.

Опора внешнего ротора смонтирована на крышке камеры дробления, опора внутреннего ротора смонтирована на опорной плите рамы 1.

Недостатком предложенной установки является необходимость высокой точности расположения барабанов друг относительно друга. В противном случае молотки столкнутся, что приведет к серьезным поломкам.

В 2001 г в Оренбургском государственном университете Коротков В.Г., Соловых С.Ю., Антимонов С.В., Зайцева Н.В., Ханин В.П. разработали дробилку кормов (рисунок 1.5) [60].



1 - корпус; 2 - обечайки; 3, 4 - выгрузной патрубок; 5 - вал; 6 - рабочий орган;
7 - решетная вставка.

Рисунок 1.5 - Дробилка кормов

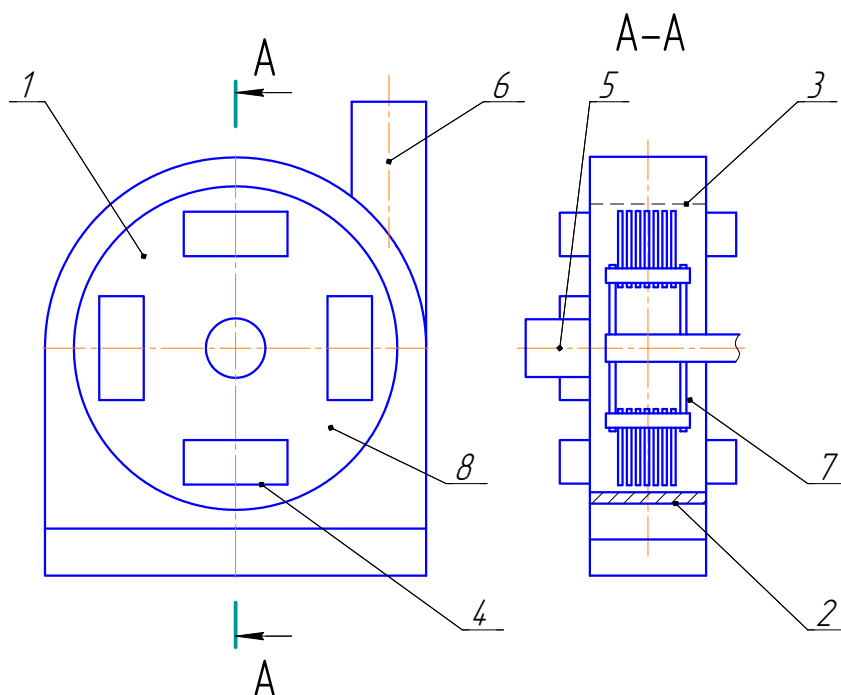
На валу смонтирован ротор. Обечайка установлена неподвижно относительно ротора. Чтобы исключить попадание посторонних предметов, на обечайке установлена крышка. Обечайка представляет собой цилиндр, на

образующей которого выполнены отверстия, которые закрыты съемными решетками. Выгрузные патрубки расположены за решетными вставками. Чтобы исключить переизмельчение материала отверстия решет имеют разные диаметры.

Работа дробилки осуществляется следующим образом. Выключают привод и доводят частоту вращения рабочего органа до номинального значения без нагрузок. После этого внутрь дробильной камеры подают измельчаемый материал. Происходит взаимодействие материала с рабочим органом и обечайкой в результате продукт измельчают.

Недостатками конструкции является высокая неравномерность дробления материала. Рабочий орган выполнен в виде "планки", поэтому агрегат имеет высокие удельные энергозатраты на измельчение.

В 2010 г в Вятской государственной сельскохозяйственной академии Баранов Н.Ф., Сергеев А.Г., Зыкин А.А. разработали молотковую дробилку (рисунок 1.6) [61].



- 1 - камера дробильная; 2 - дека; 3 - решето; 4 - камера вихревая; 5 - горловина загрузочная;
6 - горловина выгрузная; 7 - ротор молотковый; 8 - стенка боковая.

Рисунок 1.6 - Молотковая дробилка RU 2457034

По бокам камеры измельчения выполнены вихревые камеры, которые предназначены для получения потока воздуха. Движение потока воздуха, которые образуют молотки дробилки, отличается от направления потока воздуха, который образуют вихревые камеры.

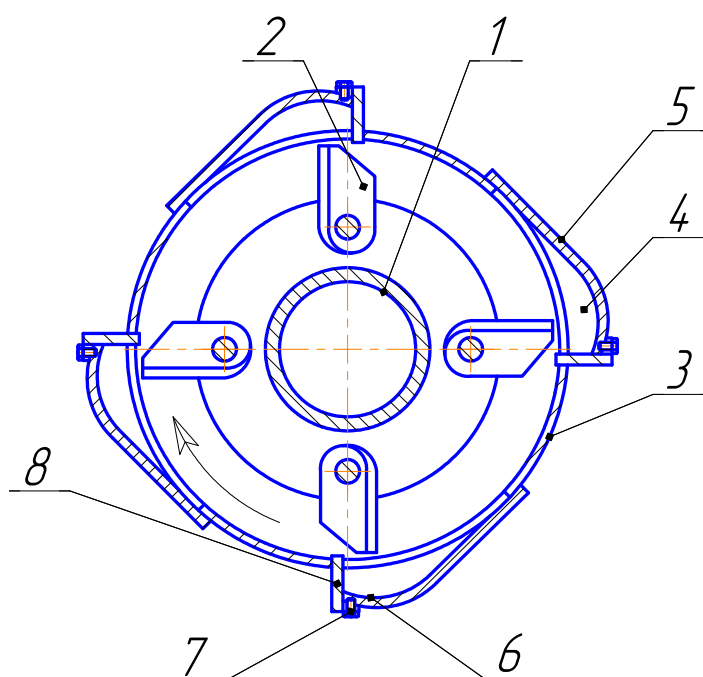
Работа дробильной установки протекает так. Без нагрузки осуществляют включение приводов дробилки. После выхода молоткового ротора на установившуюся номинальную частоту вращения осуществляют загрузку измельчаемых компонентов. Молотковый ротор взаимодействует с измельчаемым продуктом, а также создает поток воздуха. Измельчаемый материал взаимодействует с молотками ротора, решета и деки и попадает в вихревые камеры, в которых происходит изменение направления его движения и последующий выход из них. После выхода продукта из вихревых камер в направлении отличном от направления движения молотка снова происходит многократное взаимодействие с молотками, которые приводит к разрешению продукта. После измельчения до необходимых размеров, продукт через отверстия решета будет удален из дробилки.

Недостатком представленной молотковой дробилки является возможное налипание частиц измельчаемого материала на внутренние поверхности вихревых камер. Это снизит эффективность работы дробилки.

Специалисты Михлин С.Б., Фаянс Ю.А. в 1987 году разработали дробилку (рисунок 1.7) [62].

Технологический процесс дробилки протекает так. Без нагрузки осуществляют включение дробильной установки. Затем удостоверившись, что ротор вышел на рабочие обороты, загружают измельчаемый продукт. При взаимодействии с измельчающими элементами продукт получает кинетическую энергию и под воздействием центробежных сил движется от центра камеры измельчения. Измельчаемый материал движется вдоль стенки, затем попадает на угол в девяносто градусов и резко останавливается. После чего меняет направление движения и падает в направлении ротора, где снова с ним

взаимодействует. Такая процедура с материалом осуществляется несколько раз, до тех пор, пока измельченные частицы не достигнут необходимых размеров.



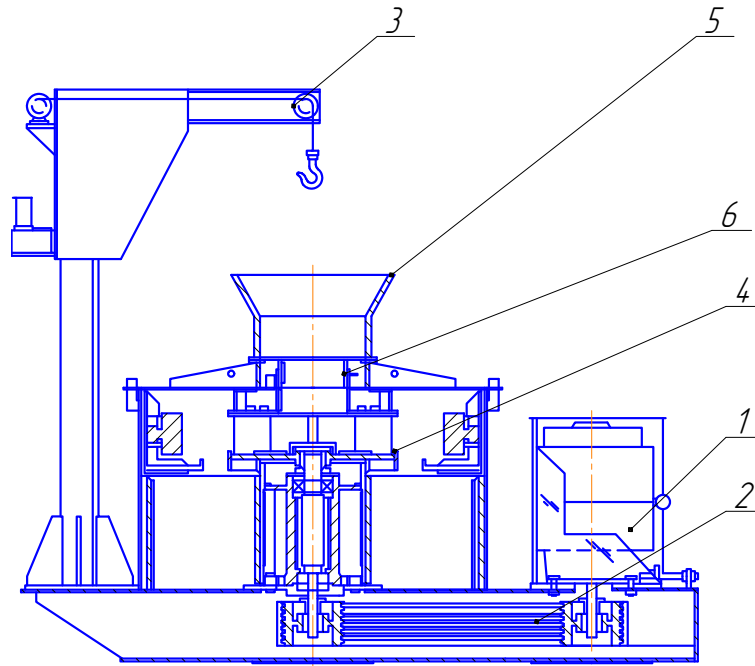
1 - ротор; 2 - рабочий орган; 3 - камера измельчения; 4 - камера вихревая;
5 - стенка; 6 - угловая часть; 7 - винт; 8 - стенка.

Рисунок 1.7 - Дробилка

Недостатком дробилки является то, что при попадании на измельчающие элементы материала последний будет отлетать к периферии под углом отличным от 90^0 . Т.е. не будет дробиться необходимым образом, а будет скользить. Это приведет к повышенному расходу энергии на измельчение продукции. При измельчении в углах вихревых камер будут образовываться застойные зоны, в которых будет скапливаться измельчаемый продукт. Это будет приводить к тому, что измельчаемый материал будет выходить из вихревой камеры не в направлении центра измельчающей камеры, а по касательной. В результате качество измельчения будет ухудшаться.

Bechler David и Butts Stephen в 1988 г предложили вертикальную ударную дробилку со сменными сегментами кольца дробилки EP0261913. (рисунок 1.8) [63]

В состав дробилки входят привод 1, для привода рабочего органа используется клиноременная передача 2, для повышения производительности присутствует механизм загрузки 3, дробильной камеры 4, загрузочного бункера 5, направляющей трубы 6. Дробильная камера выполнена в форме цилиндра. Ротор дробилки с кольцом изображены на рисунке 1.9.

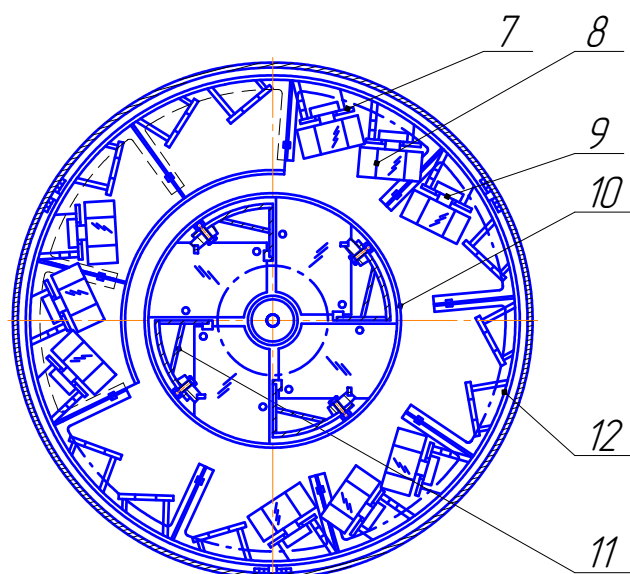


1 - привод; 2 - клиноременная передача; 3 - механизм загрузки;
4 - дробильная камера, 5 - загрузочный бункер, 6 - труба направляющая.

Рисунок 1.8 – Дробилка вертикальная EP0261913

На каждом кронштейне 7 установлен молоток 8. Молоток 8 состоит из восьмиугольной головы, и квадратного крепления 9. Крепление и голова молотка симметричны относительно оси симметрии, образующей угол $\alpha = 5 - 15^{\circ}$ с касательной ротора 10.

Во время работы, материал, подлежащий дроблению, непрерывно подают в загрузочный бункер 5 и далее через направляющую трубку 6 и в центр ротора 10. Ротор 10 вращается со скоростью порядка около 900 - 1800 оборотов в минуту. Материал выбрасывается наружу в радиальном направлении, материал ускоряется ротором и попадает в карманы 11.



7 - кронштейн; 8 - молоток; 9 - крепления; 10 - ротор; 11 - карман; 12 - кольцо.

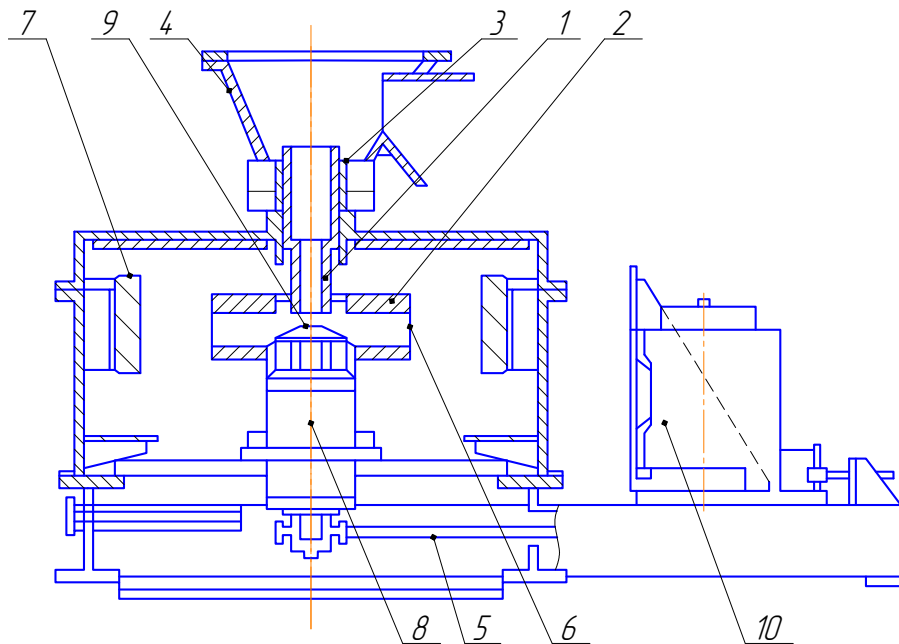
Рисунок 1.9 - Ротор дробилки с кольцом

Материал выбрасывается из карманов 11 наружу к молотку 8. Двигается измельченный материал под углом около $5 - 15^{\circ}$ по касательной к ротору. Отклонение от тангенциальной траектории, вызванные наклоном измельчаемого материала в кармане 11 и коэффициент трения измельчаемого материала. Измельчаемый материал выбрасываются наружу в радиальном направлении. Кронштейны 7 установлены в кольце 12 под таким углом, при ударе о молоток 8 перпендикулярно по измельчаемому материалу траектория полета измельченных частиц, составляет около 10° к касательной к ротору. Таким образом, при ударе о молоток перпендикулярно по измельчаемому материалу, вся кинетическая энергия молотка передается материалу, и лишь малая часть подведенной энергии затрачиваются на рикошет.

Недостатком рассмотренной дробилки является то, что материал неравномерно распределяется по высоте дробильной камеры, поэтому будет неоднородность процесса измельчения и износ рабочих органов.

Okawa Koji в 1992 г разработал дробилку с вертикальным валом, которая может быть использована для измельчения зерна и других сыпучих продуктов (рисунок 1.10) [64].

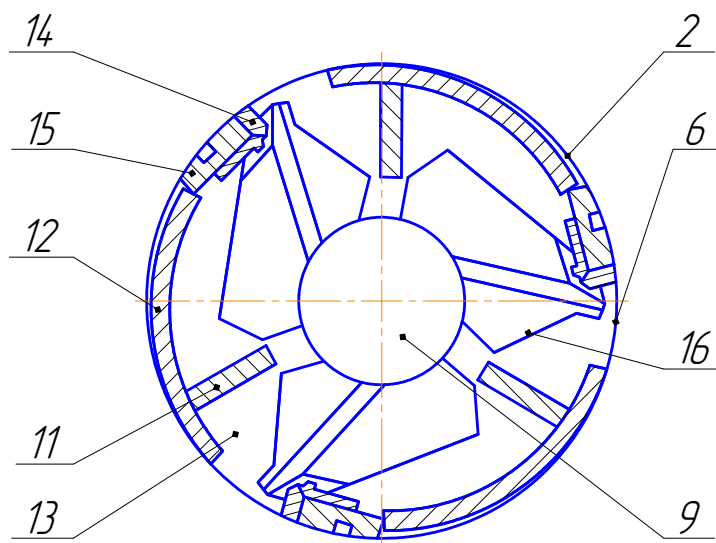
Дробилка включает в себя вертикальный вал 1, установленный в блоке подшипников питателя 3, расположенного в верхней центральной части, и бункера 4.



- 1 - вал вертикальный; 2 - ротор; 3 - питатель; 4 - бункер; 5-передача ременная;
 6 - отверстие разгрузочное; 7 - молоток; 8 - блок подшипников;
 9 - распределитель центральный; 10 - электродвигатель.

Рисунок 1.10 - Дробилка с вертикальным валом JR4110050

На нижнем диске ротора 2, выполнены три лопасти 11 (рисунок 1.11), углы



- 11 - лопасти; 12 - стенка; 13 - диск; 14 - било; 15 - блок поворотный; 16 - направляющие.

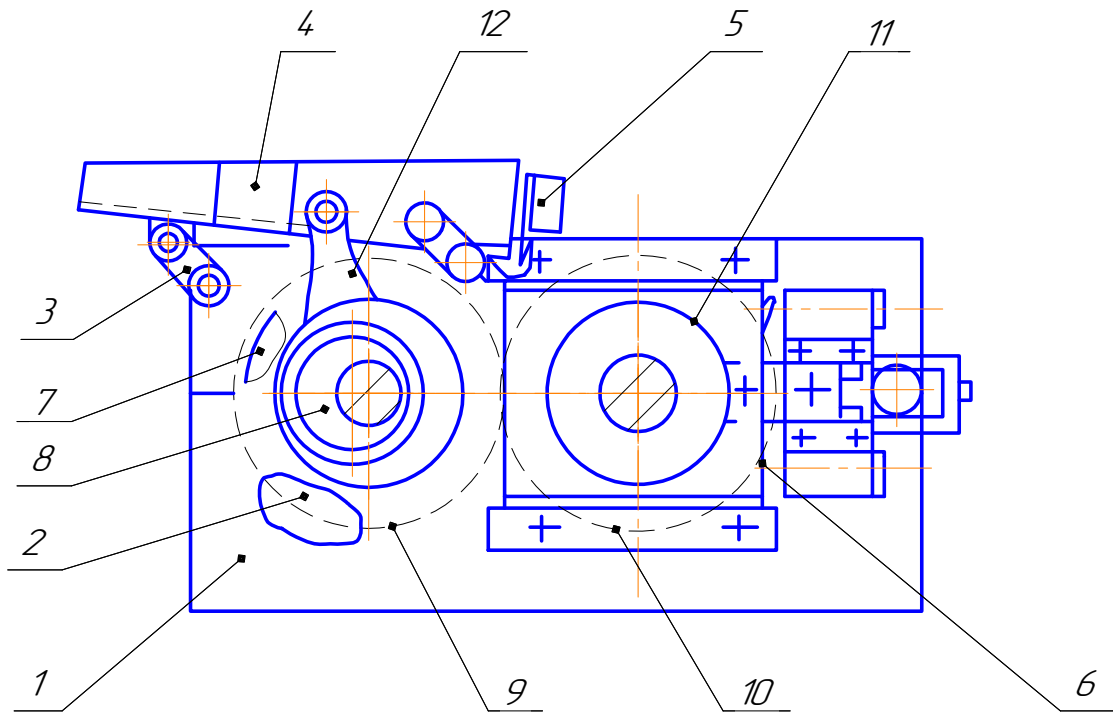
Рисунок 1.11 - Ротор

между которыми, равны. Лопасты 11 установлены на внутренней поверхности стенок 12.

Работает дробилка следующим образом. Ротор 2 вращается с высокой частотой на вертикальном валу, измельчаемый материал подается из бункера 4 через канал питателя 3 на ротор 2, затем, на распределитель центральный 9. За счет центробежных сил материал прижимается к внутренней стенке 12, лопасти 11 устраняют проскальзывание материала, тем самым дополнительно повышают скорость вращения измельчаемого материала и через выгрузные окна материал попадает на молотки 7 (рисунок 1.10). За счет этого, возникают внутренние напряжения и происходит разрушение (дробление) измельчаемого материала.

Недостатком рассмотренной дробилки является возможное забивание внутренней части ротора (между лопастями); необходимость высоких скоростей вращения ротора, чтобы получить гарантированное разрушение материала. Отсюда следует высокая энергоемкость процесса измельчения.

Стрелковым В.А. и другими в 1998 г разработана Валковая дробилка [65] (рисунок 1.12). Указанная дробилка состоит из следующих составных частей. На раме закреплены все рабочие и вспомогательные элементы дробилки. К вспомогательным элементам относят электропривод, элементы передач, рычаги, редуктор, загрузочный лоток, элементы опор. К рабочим элементам относятся два вала: быстродвижущийся и медленно движущийся, между которыми есть зазор для попадания туда продукта. Валки взаимодействуют между собой при помощи зубчатой передачи. Сверху корпуса установлен лоток, который выполнен с возможностью колебания. Для упрощения выгрузки продукта к рабочим органам лоток выполнен под небольшим углом к горизонтали. Корпус выполнен неподвижным. Внутри него происходит процесс измельчения продукта. Для того, чтобы при вибрации лотка не было передачи на фундамент, машина установлена на виброизолирующие опоры.



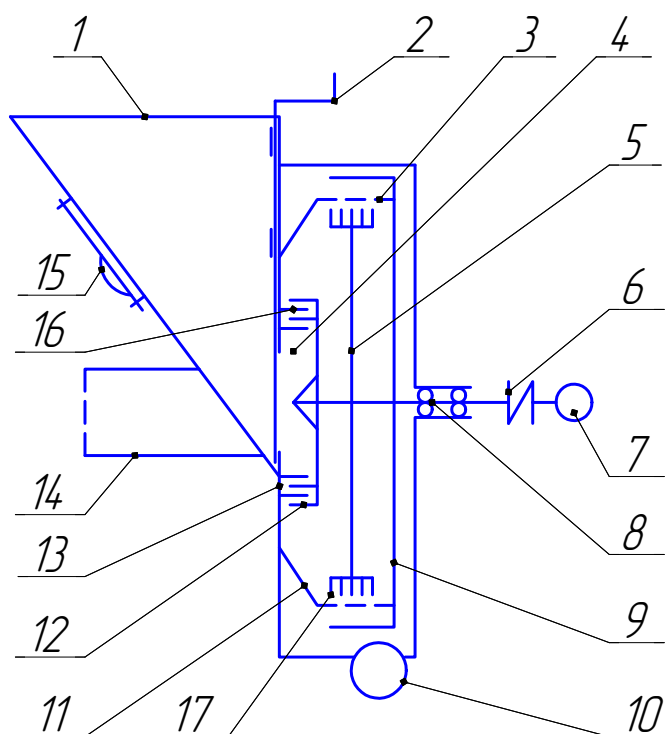
- 1 - корпус неподвижный; 2 - валок быстро движущийся; 3 - рычаг;
 4 - загрузочный лоток; 5 - отражатель; 6 - корпус подвижный; 7 - шкив приводной;
 8 - эксцентрик; 9, 10 - передаточная пара шестерен; 11 - валок вращающийся медленно;
 12 - рычаг.

Рисунок 1.12 - Валковая дробилка

Технологический процесс измельчения протекает следующим образом. Измельчаемый материал помещают на лоток, которому принудительно сообщают колебательное движение, при помощи электродвигателя и системы рычагов. За счет сообщаемой лотку вибрации продукт по лотку перемещается от высшей точки к низшей и, взаимодействуя с отражателем, падает вниз. Продукт попадает в зазор между валками. Электродвигатель посредством редуктора осуществляет вращение валков, которые за счет разницы частоты вращения перетирают, или плющат продукт.

Недостаток рассмотренной валковой дробилки заключается в том, что материал неравномерно распределяется по ширине измельчающего аппарата, поэтому будет неоднородность процесса измельчения материала, а также высокая энергоемкость. Указанная дробилка не может осуществлять дробление продукта, она осуществляет его перетирание, или плющение.

В Курской ГСХА им. И.И. Иванова в 2014 году специалисты Коняев Н.В., Сараев И.Ф., Трубников В.Н. предложили конструкцию дробилки зерна, которая представлена на рисунке 1.13 [66].



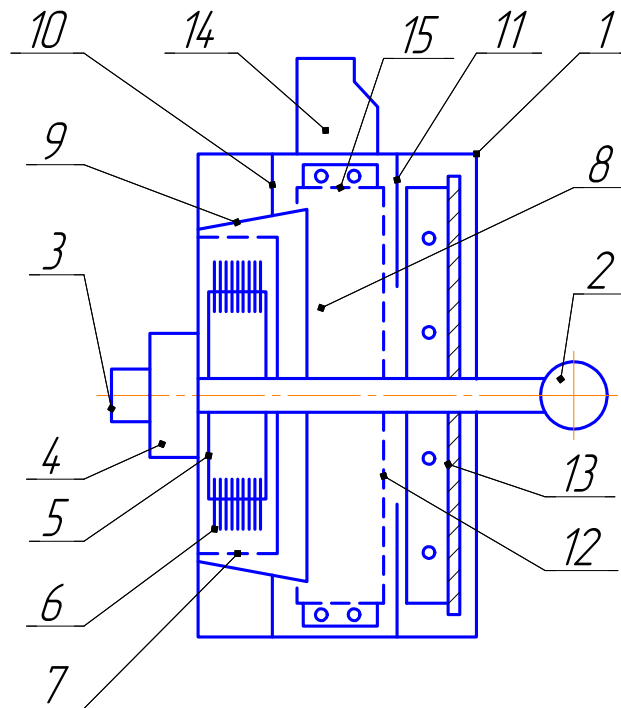
- 1 – бункер; 2 - заслонка; 3 - решето; 4 - рабочая камера; 5 - диск; 6 - муфта; 7 - электродвигатель;
 8 – узел подшипниковый; 9 - вентилятор; 10 - патрубок выходной; 11 - дефлектор;
 12 - диск вращающийся; 13 - диск неподвижный; 14 - воздухозаборник;
 15 – очиститель магнитный; 16 - штифт измельчающий; 17 - молоток.

Рисунок 1.13 – Дробилка зерна

Технологический процесс дробилки осуществляют так. Продукт, который необходимо измельчить, направляют в бункер. Магнитный очиститель улавливает металлические примеси, чтобы исключить поломку рабочих органов. Затем через открытую заслонку зерно направляют в рабочую камеру. При помощи неподвижного и вращающегося дисков со штифтами осуществляют предварительное измельчение продукта. Далее масса поступает в устройство вторичного измельчения и с помощью многочисленных ударов молотков доводится до необходимых размеров. Затем потоком воздуха, создаваемым вентилятором удаляется из рабочей камеры.

К недостатку следует отнести то, что штифты не смогут измельчить ростки пророщенного зерна до установленных размеров и измельчённая масса получится неоднородной.

В Казанском ГАУ инженеры Мусин Р.Р., Сиганшин Б.Г., Хайдаров Р.Р., Хасанова Ф.Ф. в 2015 году предложили дробилку зерна с сепарацией. Дробилка представлена на рисунке 1.14 [67].



- 1 – корпус; 2 – электродвигатель; 3 – патрубок загрузочный; 4 – магнит;
 5 – камера дробильная; 6 – ротор с молотками; 7 – сито; 8 - камера сепарации;
 9 – ребро жесткости; 10, 11 – перегородка; 12 – сито; 13 – вентилятор;
 14 – патрубок выгрузной; 15 - сито.

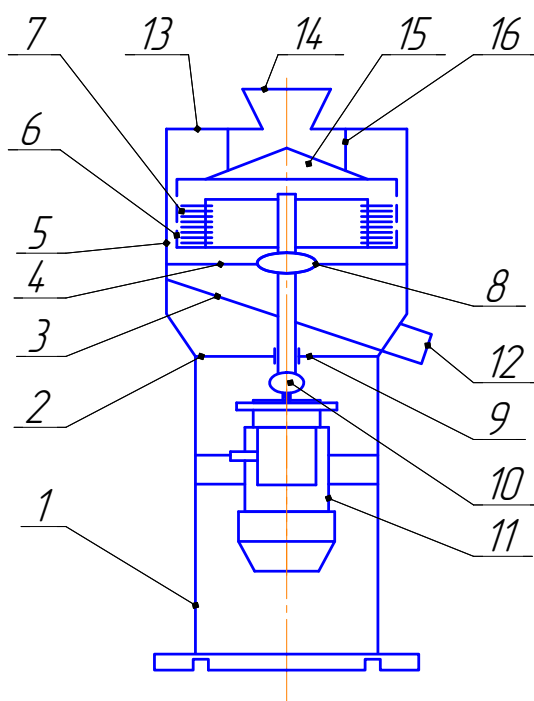
Рисунок 1.14 - Дробилка зерна с сепарацией

Изображённая на рисунке дробилка работает следующим образом. Через загрузочный патрубок 3 зерно поступает в дробильную камеру 5. За счёт взаимодействия зерна с молотками происходит разрушение первого и просыпание через сито 7. Далее масса поступает на рёбра жесткости затем внутрь камеры сепарации 8. С помощью разрежения создаваемого вентилятором легкие примеси проходят через сито 12 затем удаляются, а дроблённая масса, под действием

центробежных сил, проходит через сито 15 и удаляется посредством выгрузного патрубка 14.

К недостатку можно отнести неудобство загрузки сырья в загрузочный патрубок, который расположен горизонтально, а также то, что такая конструкция дробильного барабана не позволяет измельчать стебельные материалы.

В Воронежском ГАУ ученые Сундеев А.А., Воронин В.В., Якименко А.В., Яровой М.Н и другие разработали дробилку для зерна, которая представлена на рисунке 1.15 [68].



- 1 – рама; 2 - основание; 3 - скатная поверхность; 4 - спица; 5 - камера дробильная; 6 - решето;
 7 - ротор с молотками; 8 - подшипниковый узел; 9 - опора; 10 - муфта; 11 - электродвигатель;
 12 - окно выгрузное; 13 - крышка; 14 – горловина загрузочная; 15 - распределитель;
 16 - направляющая.

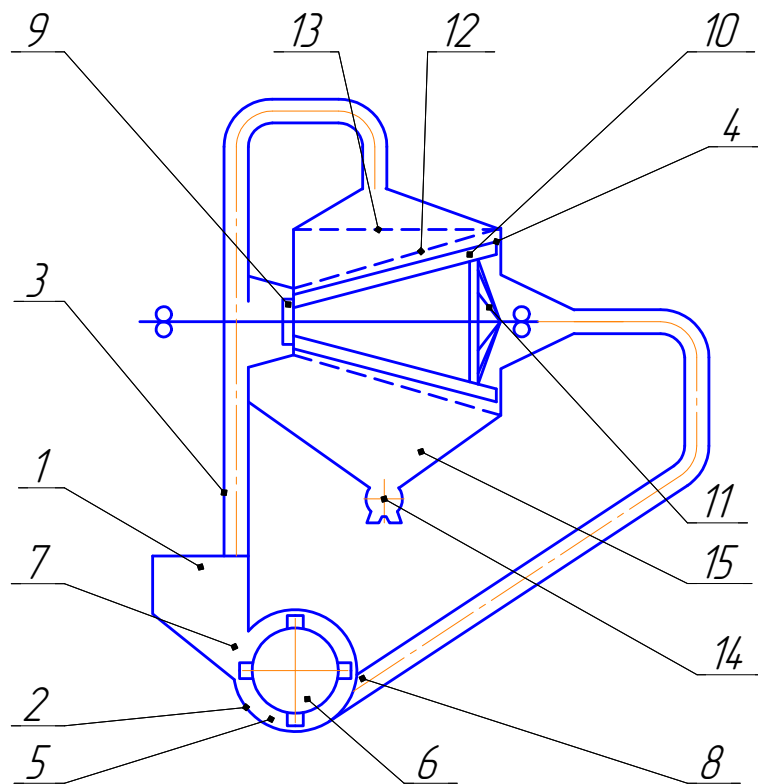
Рисунок 1.15 – Дробилка для зерна

Работа дробилка проходит следующим образом. В загрузочную горловину 14 подают измельчаемый продукт, который попадает на распределитель, затем, под действие центробежных сил, отбрасывается к периферии дробильной камеры 5. Далее зерно молотками измельчается. Измельченное зерно проходит через

отверстия решет 6 и попадает на скатную поверхность 3, затем удаляется через выгрузное окно 12.

К недостатку дробилки отнесем то, что измельчённое зерно на скатной поверхности может скапливаться, а это будет приводить к забиванию выгрузного окна. Верхний край вала, на котором закреплён дробильный барабан, не имеет опоры, поэтому вал будет испытывать дополнительный изгибающий момент. При эксплуатации это приведет к снижению ресурса конструкции.

В Воронежском ГАУ ученые Труфанов В.В., Барбицкий А.П., Яровой М.Н., Алныкина А.В. разработали молотковую дробилку для фуражного зерна с разделительной камерой, которая представлена на рисунке 1.16 [69].



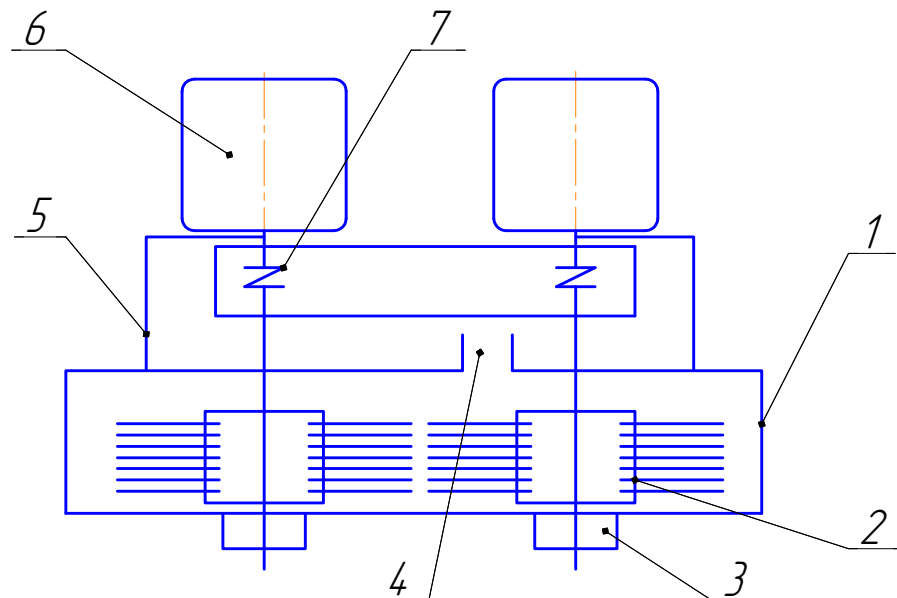
- 1 - бункер; 2 - корпус; 3 - трубопровод; 4 - камера разделительная;
 5 - камера измельчения; 6 - ротор; 7 - окно загрузочное; 8 - окно разгрузочное; 9 - диск;
 10 - барабан бичевой; 11 - конус перфорированный; 12 - решето; 13 - материал фильтрующий;
 14 - затвор шлюзовый; 15 - бункер.

Рисунок 1.16 - Дробилка молотковая

Молотковая дробилка для зерна осуществляет технологический процесс следующим образом. Зерно, предназначенное для измельчения, загружают в

бункер 1. После чего зерно подают через загрузочное окно 7 в камеру измельчения 5. Там за счет ударов молотками по зерну происходит его разрушение. Затем с помощью потока воздуха измельчённая масса по трубопроводу направляется на лопасти разбрасывающего конуса. С помощью лопастей продукт дополнительно вращается и направляется на перфорированную поверхность, выполненную в форме конуса. Дроблённое зерно, которое не прошло через отверстия 12, направляется в трубопровод 3 и на повторное измельчение. Материал, который прошел отверстия решета 12 направляется в бункер 15 и посредством шлюзового затвора 14 удаляется из дробилки.

Инженеры Желтунов М.Г., Стрижов В.М., Демин В.А. предложили дробилку зерна, представленную на рисунке 1.17 [70].



- 1 – корпус; 2 - барабан дробильный; 3 - узел подшипниковый; 4 - окно загрузочное;
5 - кожух защитный; 6 - электродвигатель; 7 - муфта.

Рисунок 1.17 – Дробилка зерна

Работает дробилка зерна так. Включают электродвигатели 6 и посредством муфты 7 вращают дробильные барабаны 2. Затем через загрузочную горловину 4 подают зерно в дробильную камеру. Зерно измельчают с помощью молотков, которые смонтированы на дробильных барабанах 2.

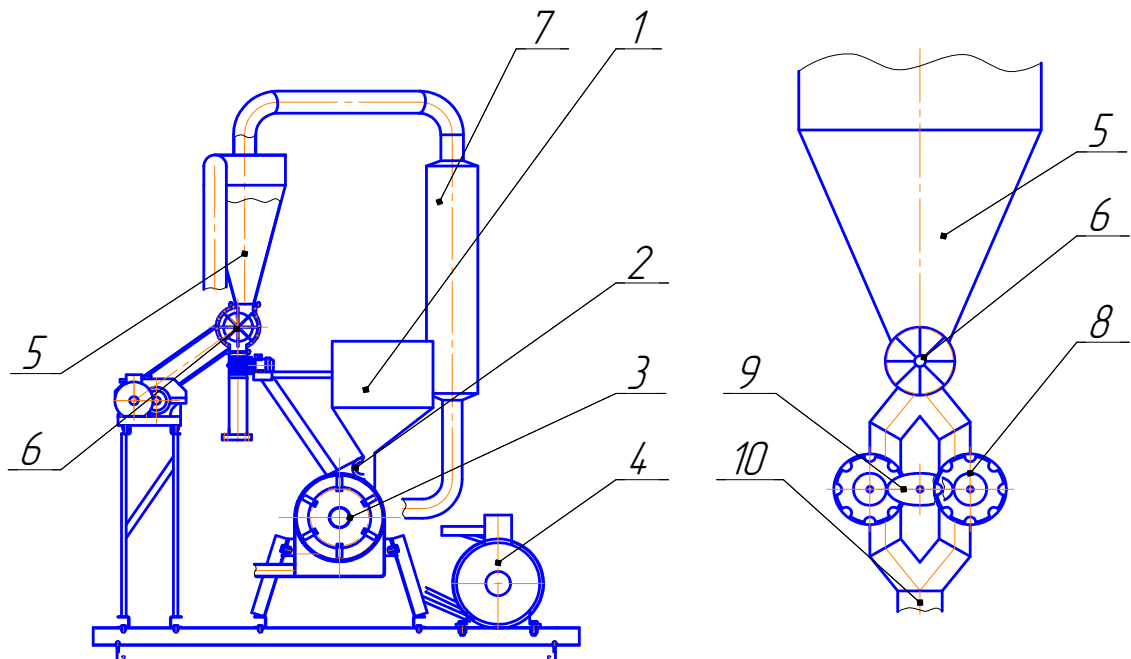
К недостатку указанной дробилки зерна относится то, что измельченное одним дробильным барабаном масса, может попадать на другой дробильный барабан, за счет этого происходит переизмельчение массы, что приводит к увеличению количества пыли, в связи с этим увеличению потерь, повышению энергоемкости измельчения.

Специалисты Белгородского ГАУ Вендин С.В., Саенко Ю.В., Макаренко А.Н., Казаков К.В. и другие предложили конструкцию дробильной установки пророщенного высушенного зерна. Схема дробильной установки представлена на рисунке 1.18 [71].

Работа представленной дробильной установки состоит в следующем. После выхода дробилки на рабочий режим осуществляют загрузку пророщенного зерна. Объем пророщенного зерна дозированно через открытую заслонку подают в дробильную камеру, в которой осуществляют измельчение молотками, которые установлены на дробильном барабане. Продукт взаимодействует с декой и решетом. Затем массу потоком воздуха, который создал вентилятор, направляют в циклон, в котором осуществляют отделение измельченной массы от воздуха. Далее дозируют предварительно измельченную массу в аппарат вторичного измельчения. Ростки пророщенного зерна взаимодействуют с активными ножами и противорежущими ножами, в результате происходит их перерезание. Затем измельченная масса через растроб выходит из дробильной установки. Особенность конструкции заключается в том, что противорежущие ножи выполнены с возможностью поворота. Противорежущие ножи выполнены в виде эллипса. При максимальном перекрытии ножей противорежущими ножами длина резки будет минимальной и наоборот.

К недостаткам следует отнести большие размеры конструкции, аппарат вторичного измельчения вынесен отдельно, для него нужен дополнительный привод. Чтобы измельчаемый продукт переместить от дробильной камеры к режущему аппарату необходимо дополнительно затратить энергию.

Дополнительный расход энергии приведет к повышению эксплуатационных затрат при выполнении технологической операции.



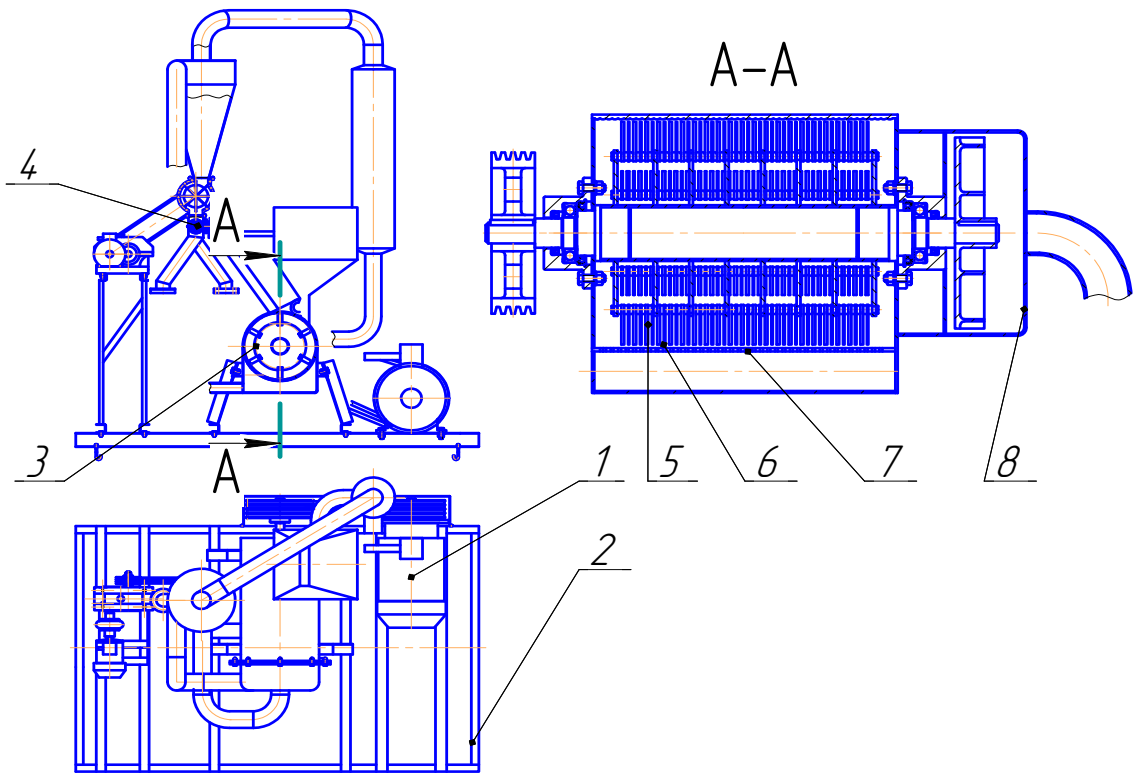
1 – бункер; 2 - сепаратор магнитный; 3 - барабан дробильный; 4 - электродвигатель;
5 - циклон-разделитель; 6 - затвор шлюзовой; 7 - рукав фильтровальный; 8 - ножи активные;
9 - ножи противорезущие; 10 - раструб выгрузной.

Рисунок 1.18 – Дробилка для измельчения пророщенного высушенного зерна

Сотрудники Белгородского ГАУ Булавин С.А., Саенко Ю.В., Носуленко А.Ю. и другие специалисты разработали дробилку для измельчения неоднородных кормов, в том числе пророщенного зерна представленную на рисунке 1.19 [72].

Представленная дробилка оборудована двумя камерами измельчения. В первой дробильной камере шарнирно установлены молотки и ножи, а во второй установлены только ножи. В первой камере производят измельчение пророщенного зерна и частично ростков, а во второй камере выполняют доизмельчение ростков.

Недостаток дробилки состоит в том, что камеры измельчения расположены на некотором расстоянии одна от другой и для перемещения измельчаемого продукта от одной камеры до другой необходимо затратить энергию.



1 – электродвигатель; 2 – рама; 3 – барабан дробильный; 4 – ножевой барабан;
5 – молотки; 6 – ножи; 7 – решето; 8 - вентилятор.

Рисунок 1.19 – Дробилка пророщенного высушенного зерна

Известны другие конструкции дробилок, которые представлены в работах [73 - 76], но все они не позволяют измельчать пророщенное зерно по причине отсутствия ножей.

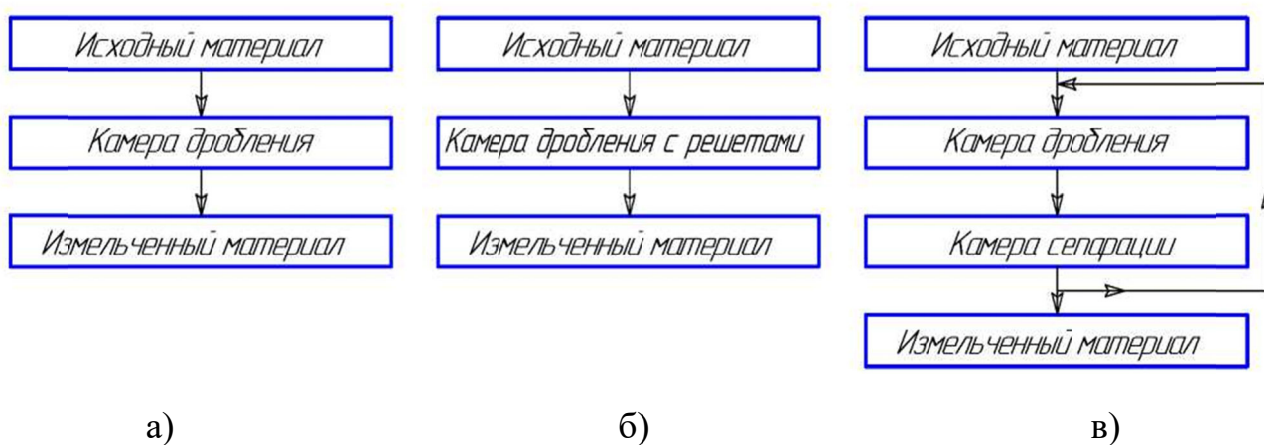
Проведенный анализ по дробильным устройствам позволил установить, что для измельчения пророщенного зерна наиболее подходящими являются такие конструкции, которые имеют несколько видов измельчителей – это молотки и ножи.

Подготовку теоретической базы по вопросам измельчения кормов и дальнейшее решение практических задач осуществили следующие выдающиеся ученые: Горячкин В.П., Коба В.Г., Мельников С.В., Сыроватка В.И., Труфанов В.В., Завражнов А.И., Краснов И.Н., Мухин В.А., Гулевский В.А., Коношин И.В., Сергеев Н.С. и др. [12, 23, 31 - 33, 77 - 93].

Выполнив анализ технических решений, установили, что для измельчения зерновой продукции используют различные измельчители, которые отличаются

друг от друга по типу отдельных узлов, их компоновке, принципу работы, технологическому процессу. Дробилки бывают решетные и безрешетные. Установлено, что, применяя дополнительные узлы, камеры сепарации, последовательно расположенные две камеры измельчения с одной стороны происходит выравнивание средних геометрических размеров измельчаемых частиц, а с другой стороны происходит техническое усложнение конструкции [94, 95].

На рисунке 1.20 представлены схемы технологических процессов молотковых дробилок различных конструкций.



- а) безрешетная дробилка; б) решетная дробилка;
в) безрешетная дробилка с камерой сепарации.

Рисунок 1.20 - Схемы технологических процессов молотковых дробилок различных конструкций

При выборе дробильной установки, необходимо понимать, какой продукт необходимо измельчать большее время, предполагаемую производительность, конечный размер полученного продукта, а также общую мощность электродвигателей и энергоёмкость процесса измельчения. Немаловажным показателем является стоимость оборудования, его техническая сложность и возможность самостоятельного обслуживания силами работников предприятия. Чтобы учесть такое множество отдельных критериев необходимо пользоваться некоторым усредненным критерием оптимизации.

1.3 Анализ состояния исследований

На основе проведенного обзора можно заключить следующее.

- 1 Для эффективного использования пророщенного зерна необходимо проводить подготовительные операции. Подготовительные операции включают: сушку пророщенного зерна, его измельчение и перемешивание с комбикормом;
- 2 К сожалению, дробилок, обеспечивающих необходимую степень измельчения и высокую однородность пророщенного зерна промышленность не выпускает и нет экспериментальных образцов таких дробилок.
- 3 Особенностью пророщенного зерна является неоднородная структура как по физико-механическим свойствам, так и по геометрическим размерам, что предполагает применять различные виды измельчения к различным частям указанного продукта. Дробление зерновки производят молотками, а резание ростков осуществляют ножами.

1.4 Цель и задачи исследований

Проанализировав конструкции молотковых дробилок, можем отметить, что они не могут быть использованы для измельчения неоднородных материалов, имеющих различную плотность, структуру волокон. Таким материалом является пророщенное зерно. Существующие молотковые дробилки после измельчения оставляют материал, имеющий различные геометрические размеры. Если использовать решета с меньшим размером отверстий, то это только увеличит время пребывания массы в дробильной камере и будет способствовать переизмельчению конечного продукта, образованию пыли, которая будет приводить к потерям и повысит энергоёмкость процесса измельчения.

Работы были проведены в последовательности, которая приведена на рисунке 1.21 [83, 94 - 97].

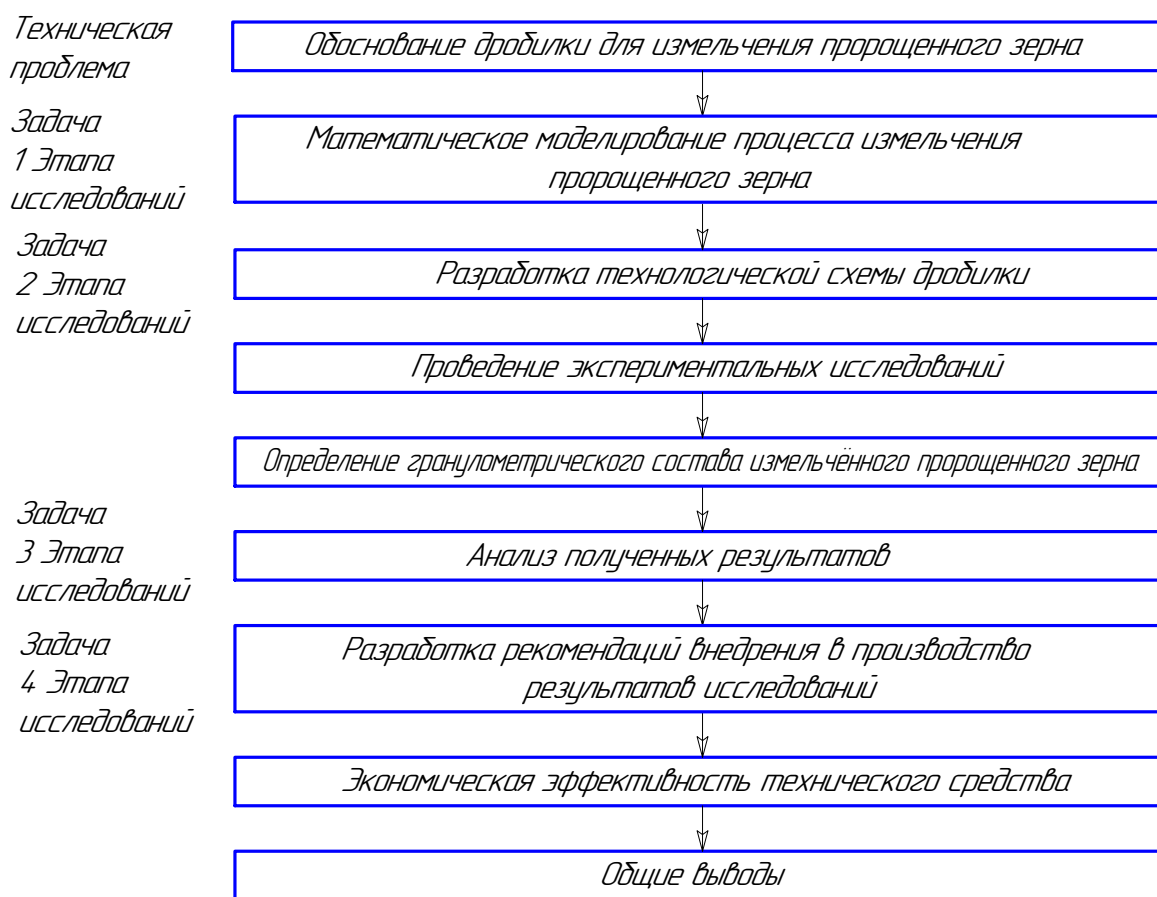


Рисунок 1.21 - Структурная схема программы работ

Цель работы - повышение эффективности измельчения пророщенного зерна за счет оптимизации конструктивно-технологических параметров дробилки.

Задачи исследований:

1. обосновать конструктивно-технологическую схему дробилки, с учетом неоднородной структуры пророщенного зерна;
2. разработать математические модели, учитывающие число молотков и ножей; обосновать углы заточки ножей; влияние конструктивных и конструктивно-режимных параметров дробилки на качественные показатели процессов; провести расчет производительности дробилки и энергетических показателей процесса измельчения;
3. разработать методики оценки качественных и количественных показателей работы дробилки;

4. провести экспериментальные исследования и определить влияние конструктивно-режимных параметров на качественные и количественные показатели работы дробилки, выполнить оптимизацию конструктивных и режимных параметров дробилки пророщенного зерна;

5. выполнить производственную проверку и оценить технико-экономические показатели дробилки пророщенного зерна.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ДРОБИЛКИ

2.1 Общее устройство и принцип работы предложенной дробилки пророщенного высушенного зерна

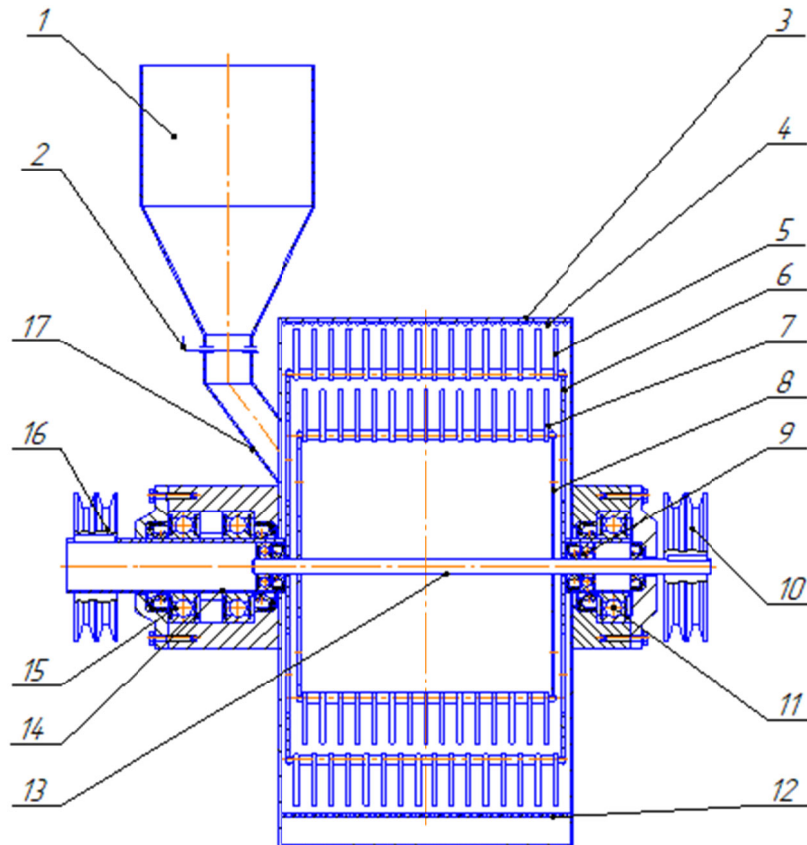
Рассмотрев различные конструкции дробилок можно отметить, что для измельчения неоднородных материалов, одним из которых является пророщенное зерно нужно использовать различные виды рабочих органов, такие как молотки и ножи [15, 16, 17, 23, 71, 72, 98, 99].

Существующие конструкции молотковых дробилок имеют такие недостатки как один тип рабочих органов, две дробильные камеры, расположенные на некотором расстоянии друг от друга. Возникает необходимость транспортировать измельчаемый материал от одной камеры измельчения в другую, а это сопровождается дополнительными затратами энергии. Для привода рабочих органов задействуют два привода, что усложняет конструкцию, делает её более металлоёмкой и повышает стоимость [71, 72].

Задача представленной дробилки состоит в повышении однородности конечных размеров пророщенного зерна после измельчения за счёт использования различных рабочих органов: молотков, расположенных на внешнем барабане и ножей, расположенных на внутреннем барабане. Исключение дополнительного транспортирования измельчаемого материала между измельчаемыми барабанами. Снижение энергоёмкости процесса измельчения за счёт размещения дробильных барабанов в одной камере на одной оси.

Предложена установка для измельчения пророщенного зерна [100, 101], состоящая из рамы, на которой размещена комбинированная дробильная камера, бункера для измельчаемого материала, ниже которого установлена дозирующая заслонка. Бункер, дозирующая заслонка и труба закреплены с торцевой стороны комбинированной дробильной камеры. Внутри комбинированной дробильной камеры (рисунок 2.1) смонтированы два вида рабочих органов: молотки и ножи.

Между молотками на пальцах установлены распорные втулки. Молотки установлены шарнирно на внешнем барабане, а ножи шарнирно установлены на внутреннем барабане. Барабаны выполнены соосными. Измельчающие барабаны имеют два привода. На внутренней части дробильной камеры выполнены дека и решето.



- 1 – бункер загрузочный; 2 – заслонка дозирующая; 3 – камера дробильная комбинированная;
 4 – дека; 5 – молоток; 6 - внешний дробильный барабан; 7 – нож; 8 – ножевой барабан;
 9 – внутренний подшипник; 10 – шкив; 11 – внешний подшипник; 12 – решето;
 13 – вал внутренний; 14 – вал внешний; 15 – подшипник внешний;
 16 – шкив; 17 - труба подающая.

Рисунок 2.1 – Комбинированная дробильная камера

2.2 Построение блок - схемы дробилки пророщенного зерна

Общее устройство дробилки пророщенного высушенного зерна разработаны согласно патенту на изобретение RU 2692559 [100]. С целью совершенствования процесса измельчения пророщенного зерна представленную

дробилку рассматривают как отдельную техническую систему (рисунок 2.2) [94, 95, 97].

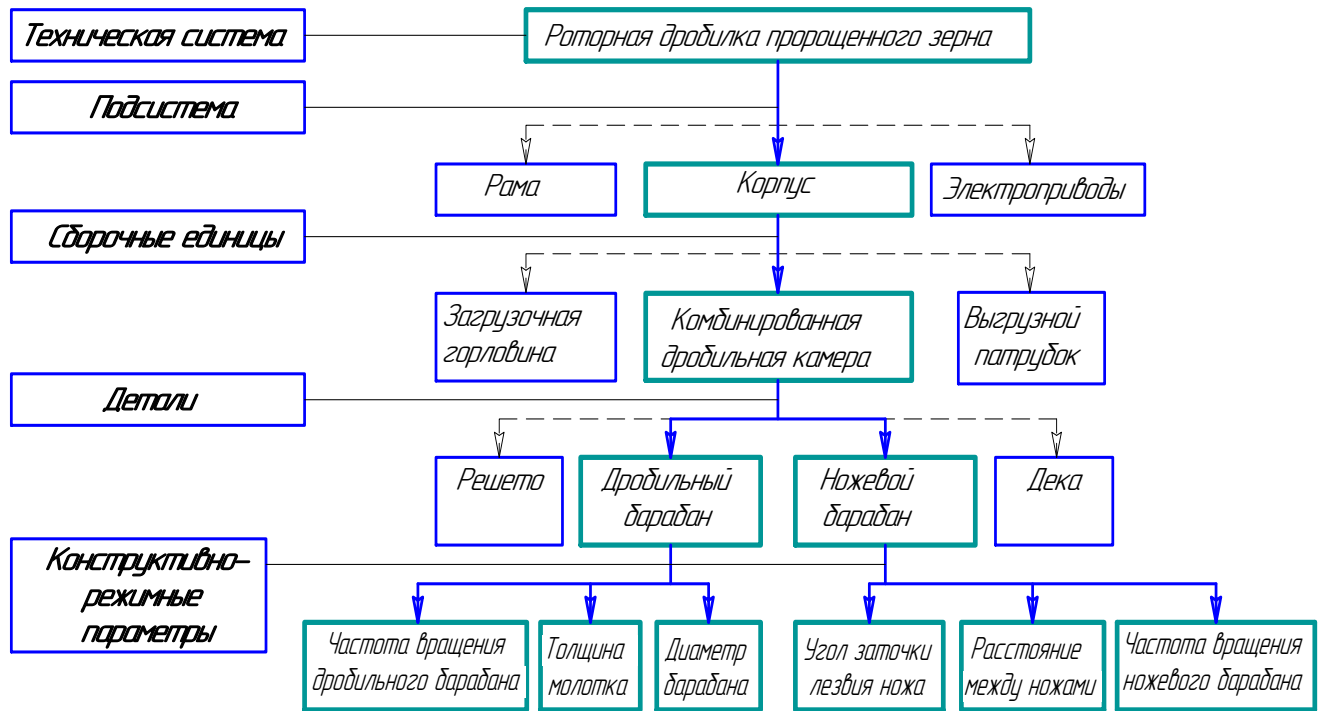


Рисунок 2.2 – Блок - схема основных элементов дробилки

Разработанная схема дробилки с комбинированной дробильной камерой включает в себя элементы подсистем, сборочных единиц. Одно из основных влияний на качество измельчения пророщенного зерна оказывает конструкция и параметры работы дробильного и ножевого барабанов.

Для проведения расчетов с целью изготовления экспериментальной дробилки пророщенного зерна нужно установить теоретические взаимосвязи между рабочими органами дробилки и критерием оптимизации, а именно:

Необходимо получить взаимосвязь между элементами в дробильном барабане: между частотой вращения дробильного барабана, толщиной молотков, диаметром барабана с модулем помола.

Необходимо получить взаимосвязь между элементами в ножевом барабане: между частотой вращения ножевого барабана, углом заточки лезвия ножа, расстоянием между ножами с модулем помола и минимумом затрат на измельчение.

2.3 Анализ работ по измельчению кормов

Чтобы получить однородную смесь из различных видов кормов, необходимо обеспечить одинаковые геометрические размеры отдельных компонентов. Известно, чтобы измельчить зерно используют молотки, которые выполняют удар по измельчаемому продукту. Чтобы измельчить стебельные корма, необходимо применять резание [23].

Первое упоминание о математическом описании разрушения твердых тел с использованием механической энергии принадлежит итальянскому ученому Г. Галилею [94]. Ученый указал, что материал разрушается в том случае, когда нормальное напряжение в материале превышает предел прочности при растяжении, или сжатии. В дальнейшем многие ученые добавляли в теорию прочности материалов результаты своих исследований. Ученые установили, что процесс разрушения материалов зависит от условий окружающей среды, в которой происходит разрушение (температура, внешнее давление, скорость удара и т.д.).

Чтобы определить работу измельчения продукта были предложены две энергетические теории: поверхностная и объемная. Теория измельчения выявляет зависимости между степенью измельчения продукта и затратами энергии, направленной на разрушение тела.

Немецкий ученый П. Ретингер в 1867 году опубликовал поверхностную теорию измельчения [23]. Он пришел к выводу, что работа, затрачиваемая на измельчение материала, зависит от площади вновь образованных поверхностей и может быть рассчитана по формуле:

$$A_R = f(\Delta S), \quad (2.1)$$

где ΔS – площади вновь образованных поверхностей.

Русский ученый-механик В.Л. Кирпичев в 1874 году разработал объемную теорию измельчения. Позже немецкий ученый Ф. Кик в 1885 году использовал эту теорию для создания технических приспособлений для измельчения подземных ископаемых. Согласно теории Кирпичева–Кика при измельчении

продукта затраченная работа прямо пропорциональна объему ΔV продукта, который подвергся деформации.

$$A_K = f(\Delta V), \quad (2.2)$$

где ΔV – объем продукта, который подвергся деформации.

В своих трудах Мельников С.В. отметил, что объемная теория измельчения Кирпичева-Кика дает более точные результаты при выполнении расчетов для грубого измельчения материала. Согласно этой теории в материале, на возникновение упругих деформаций расходуется большая часть энергии, при этом удельная площадь вновь образуемой поверхности возрастает незначительно.

Мельников С.В. в своих трудах указывает, что обе приведенные теории содержат недостатки, потому, что не учитывают влияние условий, в которых происходят процессы измельчения, таких как: размер частиц измельчаемого материала, режим работы измельчителя.

Американский инженер Ф. Бонд в 1952 году представил теорию, в которой он объединил в себе объемную и поверхностную теории измельчения. Бонд указал, чтобы измельчить продукт необходимо приложить к нему работу, которая равна квадратному корню из произведения площади поверхности на объем материала умноженному на коэффициент пропорциональности.

$$A_B = K\sqrt{VS}, \quad (2.3)$$

где V – объем измельчаемой поверхности, m^3 ;

S – площадь измельчаемой поверхности, m^2 .

Большой вклад в изучении процесса измельчения внесли советский ученый А.К. Рундквист в 1956 году и американский ученый Р.Чарльз в 1958 году.

В.И. Куянов [23, 94, 95] указал, что процесс разрушения твердого тела происходит из-за перенапряжения внутри тела, которое случилось от приложенного механического усилия. Площадь поверхности образовавшихся частиц считают пропорциональной работе перенапряжения. Ребиндер П.А. общую работу, затраченную на измельчение, представлял, как сумму полезной работы и работы упругих деформаций.

$$A = A_y + A_S, \quad (2.4)$$

где A_y – работа упругих деформаций,

A_S – работа перенапряжений.

Ребиндер П.А. указал, чтобы повысить КПД процесса измельчения необходимо работу упругих деформаций свести к минимуму.

В своих трудах академик В.П. Горячкин отмечал необходимость исследования процесса измельчения корма, но применительно к конкретным условиям работы. Знание нагрузок, которые могут возникать в процессе работы необходимо для того, чтобы можно было проектировать машины или механизмы под конкретные режимы работы, задавая необходимую производительность.

В процессе механического контакта рабочего органа с измельчаемым продуктом происходит не только воздействие со стороны ножа, но и со стороны материала на нож. Поэтому, выполняя математическое описание измельчения, необходимо учесть много факторов, влияющих на процесс.

В своих работах В.С Мельников установил, что процесс измельчения зерна можно разделить на три этапа. Первый этап характеризуется тем, что в материале происходят начальные упругие деформации. Вторым этапом измельчения отличается тем, что происходят внутренние сдвиги и начинаются пластические деформации. Дальнейшее повышение нагрузки приводит к третьему этапу, при котором усилие, приложенное к материалу, превышает силы молекулярного сцепления, происходит разрушение оболочек, появление открытых трещин, что приводит к разрушению [23].

По мнению Ребиндера П.А. при образовании трещин в материале происходит фаза предразрушения. Прочность зерна оценивают величиной напряжения, при котором происходит разрушение.

В своих работах учёные Горячкин В.П., Мельников С.В., Алёшкин В.Р. отметили, чтобы произвести наиболее полную оценку измельчения компонентов корма необходимо анализировать значения следующих критериев: пропускная способность, степень измельчения материала, затрат энергии на осуществление

процесса измельчения.

По мнению Алёшкина В.Р. процесс измельчения материала может быть представлен как Марковский процесс, когда в результате разрушения продукта происходит создание новых элементов. В своих исследованиях учёный отметил, что при разработке органов измельчения необходимо установить такую скорость вращения рабочего органа, при которой будет обеспечено резание всего объёма материала. В то же время увеличение частоты вращения рабочего органа ведёт к увеличению затрат энергии. Поэтому необходимо оптимизировать конструктивные и режимные параметры рабочих органов и камеры измельчения.

К основным параметрам процесса резания относятся: удельное давление ножа и удельная работа резания.

К технологическим факторам относятся физико-механические свойства материала и его влажность [15, 23].

Известно, что в процессе резания при наличии боковой силы, необходимое давление для осуществления разделения тела на части снижается. С повышением скользящего движения ножа снижается нормальное усилие, которое нужно для возбуждения процесса резания.

К кинематическим факторам, которые влияют на удельное давление резания относят коэффициент скольжения и скорость резания.

Коэффициент скольжения представляет отношение касательной составляющей скорости резания к её нормальной составляющей и характеризует таким образом скорость резания.

По данным Резника Н.Е. известно, что с повышением плотности слоя измельчаемого материала под лезвием необходимое давления для начала процесса резания снижается.

В своих опытах по резанию листостебельной массы кукурузы на копре Резник Н.Е. установил, что с повышением скорости ножа сопротивление резанию и затраченная работа снижаются. Такую закономерность Мельников С.В. объясняет увеличением контактных напряжений непосредственно под лезвием из-

за влияния возрастающей скорости распространения упругих и пластических волн в уплотнённом слое стеблей.

По результатам экспериментов Резник Н.Е. вывел формулу, которая связывает усилие, затраченное на резание при некоторой скорости:

$$P_{рез} = 75 \cdot 10^{-0,00129} \cdot q \cdot v_{рез}^{2,26} + 40, \quad (2.5)$$

где $v_{рез}$ – скорость резания, м/с;

q - удельное давление со стороны ножа на материал, Н/м.

Резник Н.Е. пришел к выводу, что оптимальной скоростью резания является $v_{рез} = 35 - 40$ м/с.

Наряду со свойствами измельчаемых материалов, значений угла скольжения и скорости резания удельное усилие резания зависит от угла установки и угла заточки ножа, толщина режущей кромки ножа, расположения измельчаемого материала по отношению к ножу (резание вдоль, или поперек волокон).

Рассмотрев известные теории измельчения можно отметить, что они объясняют появление новых поверхностей, расчет конечного размера измельченных частиц, учитывая затраченную работу [94, 95, 103 - 105].

На рисунке 2.3 представлены основные направления теоретических исследований процессов измельчения пророщенного зерна.

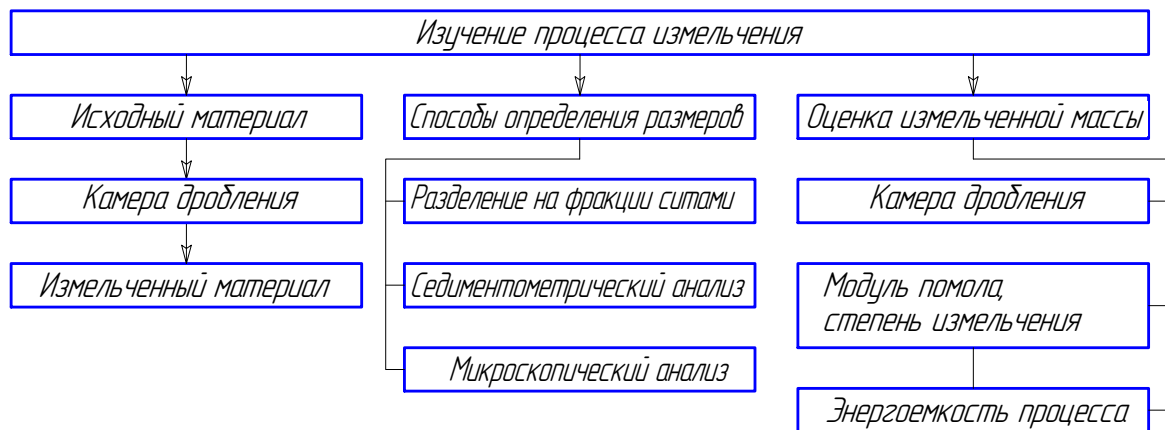


Рисунок 2.3 - Направления теоретических исследований процессов измельчения пророщенного зерна

Методологический подход к оценке процесса измельчения и проведенный теоретический анализ позволили сделать вывод, что на модуль помола

пророщенного зерна влияют: физико-механические свойства измельчаемого продукта, способ измельчения, вид рабочих органов. Указанные факторы оказывают влияние на энергетические затраты и пропускную способность измельчителя, а также качественные показатели продукта (рисунок 2.4).

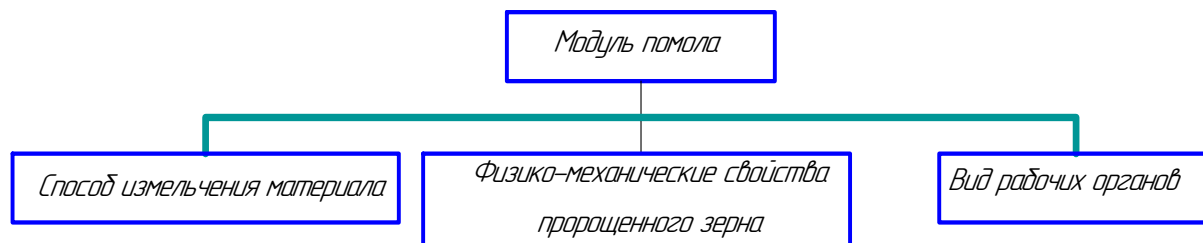


Рисунок 2.4 – Факторы, влияющие на модуль помола пророщенного зерна

2.4 Теоретические исследования процесса измельчения пророщенного зерна

2.4.1 Общая постановка задач теоретических исследований

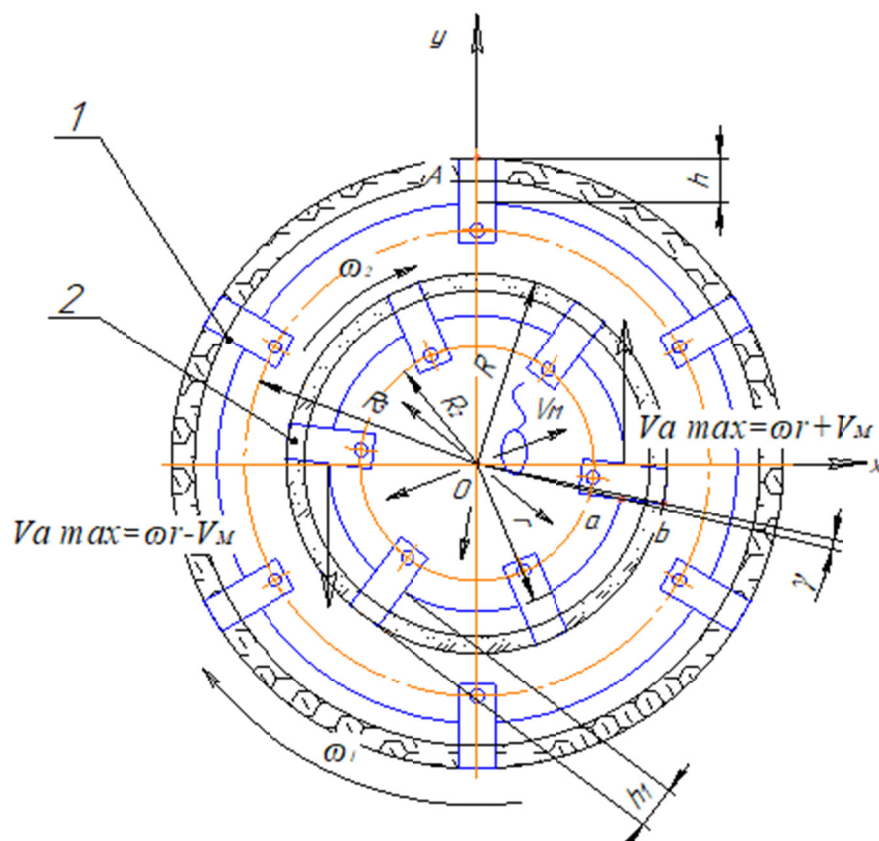
Особенность процесса измельчения пророщенного зерна заключается в том, что измельчаемый продукт представляет собой неоднородную по форме и плотности структуру: короткая по длине зерновка с прикрепленным к ней, отличающимся по длине и плотности, ростком. Поэтому в процессе измельчения энергетические показатели будут зависеть от взаимодействия измельчающего органа с объектом измельчения.

Согласно технологии на измельчение поступает высушенное проросшее зерно, представляющее фактически два слабо скрепленных, отличающихся по своим свойствам объекта – зерновка и росток. При первом взаимодействии с измельчающим органом происходит отделение зерновки от ростка и продукт фактически превращается в трехфазную структуру: воздушная среда, зерновка и росток. Следовательно, при измельчении необходимо учитывать различие свойств зерновки и ростка.

Наиболее оптимальным способом измельчения таких продуктов является использование принципа молотковой дробилки. И если обеспечить разделение продукта на два потока (слоя) с последующим измельчением каждого из

разделенных однородных по структуре продуктов. Такой индивидуальный подход позволит снизить общие затраты энергии на измельчение продукта и повысить производительность устройства.

Разделение процессов измельчения каждой из фаз возможно при использовании конструктивной схемы комбинированной дробильной камеры, кинематическая схема которой показана на рисунке 2.5. Рабочий процесс в данной камере состоит в следующем. Зерно движется по наклонной трубе. После выхода из трубы зерно направляется к центру дробильной камеры. Вращающиеся барабаны с молотками и ножами создают поток воздуха, который подхватывает пророщенное зерно и направляет его от центра к периферии со скоростью V_M .



1 - молоток; 2 - нож; γ - центральный угол между радиусами; $r = Oa$ - радиус внутренней режущей кромки; R - радиус внешней режущей кромки; R_2 - радиус крепления ножей; R_3 - радиус крепления молотков; ω_1 - угловая скорость барабана с молотками; ω_2 - угловая скорость барабана с ножами; a - основание ножа, b - вершина ножа; h - длина рабочей части молотков; h_1 - длина рабочей части ножей.

Рисунок 2.5 - Кинематическая схема комбинированной дробильной камеры

Пророщенное зерно попадает на ножи и разделяется на две части, разные по массе и размерам, но приобретающие одну начальную скорость полета. Следовательно, каждая из этих частиц имеет разную начальную кинетическую энергию, которая должна затратиться на преодоление сил сопротивления воздушного потока.

Кинетическая энергия зерновки может быть определена по выражению:

$$E_1 = \frac{m_1 v^2}{2}, \quad (2.6)$$

где m_1 – масса зерновки, кг;

v – скорость движения зерновки, м/с.

Кинетическая энергия ростка может быть определена по выражению:

$$E_2 = \frac{m_2 v^2}{2}, \quad (2.7)$$

где m_2 – масса ростка, кг;

v – скорость движения ростка, м/с.

Энергия, затрачиваемая на перемещение зерновки при преодолении сил сопротивления воздуха может быть определена по выражению:

$$A_1 = F_1 X_1, \quad (2.8)$$

где F_1 – сила сопротивления воздуха движению зерновки, Н;

X_1 – максимальное расстояние, которое способна преодолеть зерновка, м.

Энергия, затрачиваемая на перемещение ростка при преодолении сил сопротивления воздуха может быть определена по выражению:

$$A_2 = F_2 X_2, \quad (2.9)$$

где F_2 – сила сопротивления воздуха движению ростка, Н;

X_2 – максимальное расстояние, которое способен преодолеть росток, м.

По условию $m_1 > m_2$, $E_1 > E_2$.

Сила сопротивления воздушному потоку пропорциональна проекции сечения частицы, которая перпендикулярна воздушному потоку. Так как площадь фронтальной поверхности зерновки меньше площади поверхности ростка, то $F_1 < F_2$. Тогда $F_1 X_1 > F_2 X_2$. Из этого максимальное расстояние, которое способна преодолеть зерновка определим по выражению:

$$X_1 > \frac{F_2 X_2}{F_1}, \quad (2.10)$$

Как следствие $X_1 > X_2$.

Из этого следует, что более тяжелая частица с меньшей площадью поверхности (зерновка) будет преодолевать большее расстояние, или перемещаться к периферийной части барабана.

Более тяжелые частицы зерновки за счет сообщенной им большей кинетической энергии составляют периферийный слой и взаимодействуют с периферийной системой молотков, а более легкие и длинные ростки, которым передана меньшая кинетическая энергия составляют внутренний слой и взаимодействуют с внутренней системой ножей. Таким образом, происходит измельчение нескольких слоев продукта в одной камере.

2.4.2 Анализ механических факторов, определяющих процесс измельчения

Для расчета конструктивных и технологических параметров комбинированной дробильной камеры применимы теоретические подходы для расчета дробилок [23] и роторных режущих аппаратов [118, 119].

Согласно общепринятым теориям для разрушения продукта ударом или безподпорным резанием рабочему органу необходимо обеспечить критическую скорость удара $V_{кр} = V_{разр}$. Это достигается частотой вращения ротора измельчающего барабана.

Для определения критической скорости разрушения материала в молотковых дробилках учитываются прочностные, геометрические и физические свойства продукта [23, 114].

Для расчета скорости разрушения зерновок в периферийном слое можно использовать зависимость, приведенную в работе [23]:

$$v_{разр} = \sqrt{\frac{K_d \cdot \sigma_{разр} \cdot \ln \frac{a}{x_1}}{\rho}}, \quad (2.11)$$

где K_d – коэффициент динамичности;

$\sigma_{\text{разр}}$ – разрушающее напряжение материала, для зерна, МПа;

a – длина зерновки, м;

x_1 – длина недеформированной части зерна (оставшаяся после удара), м;

ρ – плотность зерновки, кг/м³.

При измельчении зерна, величина принимается равной $\frac{a}{x_1} = 1,7 \dots 1,8$.

Чтобы обеспечить полное разрушение продукта, скорость движения молотка V_1 должна быть выше скорости движения слоя продукта $V_{\text{сл1}}$, который также осуществляет вращение внутри камеры измельчения.

$$V_1 = k_{\Pi}(V_{\text{разр}} + V_{\text{сл1}}), \quad (2.12)$$

где k_{Π} – коэффициент кратности разрушения зерна;

$V_{\text{разр}}$ – скорость, необходимая для разрушения зерна, м/с;

$V_{\text{сл1}}$ – скорость, циркулирующего зерна в дробильной камере, м/с.

Тогда частота вращения ротора с молотками $n_{\text{р1}}$ может быть определена по формуле:

$$n_{\text{р1}} = \frac{60 \cdot V_1}{\pi \cdot D_{\text{р}}}, \quad (2.13)$$

где V_1 – скорость движения молотков, м/с;

$D_{\text{р}}$ – диаметр ротора, м;

С учетом (2.12) и (2.13) формула для расчета частоты вращения ротора с молотками имеет вид:

$$n_{\text{р1}} = \frac{60 \cdot k_{\Pi}(V_{\text{разр}} + V_{\text{сл1}})}{\pi \cdot D_{\text{р}}}, \quad (2.14)$$

Число молотков, проходящих по одному следу может быть определено по формуле [118]:

$$k_{z1} = \frac{2\pi \cdot V_{\text{м}}}{\omega_1 \cdot h}, \quad (2.15)$$

где $V_{\text{м}}$ – скорость подачи материала, м/с;

h – длина молотка, м;

ω_1 – угловая скорость ротора барабана, с⁻¹,

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_{p1}}{30}. \quad (2.16)$$

Для определения частоты вращения ротора с ножами для измельчения ростков высушенного пророщенного зерна можно использовать подход, используемый при безподпорном резании и при проектировании роторных режущих аппаратов [118].

Согласно кинематической схеме, приведенной на рисунке (2.5) для точек a и b , которые расположены у основания и вершины ножа со стороны режущей кромки, уравнения траекторий имеют вид:

$$\begin{cases} x_a = r \cos(\omega_2 t + \gamma) \\ y_a = V_{M2} \cdot t + r \cdot \sin(\omega_2 t + \gamma) \end{cases} \quad (2.17)$$

$$\begin{cases} x_b = R \cos(\omega_2 t) \\ y_b = V_{M2} \cdot t + R \cdot \sin(\omega_2 t) \end{cases} \quad (2.18)$$

где V_{M2} – скорость перемещения измельчаемого продукта, м/с;

ω_2 – угловая скорость ножа, с⁻¹;

$r = oa$ – радиус внутренней точки режущей кромки, м;

$R = ob$ – радиус наружной точки режущей кромки, м;

γ – центральный угол между радиусами R и r , град;

t – время, сек;

$\varphi = \omega_2 t$ – угол поворота барабана измельчителя, рад.

Поскольку угловые скорости для рассматриваемых точек равны, то для ее определения достаточно определить абсолютную скорость любой из точек.

Абсолютная скорость точки a может быть определена из уравнения (2.17):

$$V_a = \sqrt{\left(\frac{dx_a}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy_a}{dt}\right)^2}, \quad (2.19)$$

$$\left(\frac{dx_a}{dt}\right)^2 = [-r \cdot \omega_2 \cdot \sin(\omega_2 t + \gamma)]^2, \quad (2.20)$$

$$\left(\frac{dy_a}{dt}\right)^2 = [V_{M2} + r \cdot \omega_2 \cdot \cos(\omega_2 t + \gamma)]^2, \quad (2.21)$$

$$V_a = \sqrt{r^2 \omega_2^2 + 2V_{M2} \cdot r \omega_2 \cdot \cos(\omega_2 t + \gamma)}, \quad (2.22)$$

Максимальное и минимальное значения абсолютной скорости определяется углом поворота барабана.

Максимальное значение V_a – будет иметь при $\omega_2 t + \gamma = 2\pi \cdot k$, где $k = 0, 1, 2$ и т.д., т.е.

$$V_{a \max} = r\omega_2 + V_{M2}, \quad (2.23)$$

Минимальное значение V_a – будет иметь при $\omega_2 t + \gamma = \pi \cdot k$, где $k = 0, 1, 3$ и т.д., т.е.

$$V_{a \min} = r\omega_2 - V_{M2}, \quad (2.24)$$

Поэтому, для обеспечения бесподпорного резания ростка пророщенного зерна, нужно обеспечить выполнение условия.

$$V_{a \min} = r\omega_2 - V_{M2} > V_{кр}, \quad (2.25)$$

где $V_{кр}$ – скорость ножа, необходима для бесподпорного перерезания ростков пророщенного зерна.

В этом случае угловая частота вращения ножевого ротора выбирается из условия:

$$\omega_2 > \frac{V_{кр} + V_{M2}}{r}, \quad (2.26)$$

Величину скорости резания необходимо принимать из условия:

$$V_{рез} = (3 \dots 5)V_{кр}. \quad (2.27)$$

Окончательно угловая частота вращения ножевого ротора выбирается из условия:

$$\omega_2 = \frac{(3 \dots 5)V_{кр} + V_{M2}}{r}. \quad (2.28)$$

Работа барабана с ножами, т.е. в режиме резания (срез без отгиба ростков пророщенного зерна) будет достигнута в том случае, когда за время поворота t_1 ножа на угол α росток переместится на расстояние равное высоте h_1 режущей кромки ножа.

$$h_1 = V_{M2} \cdot t_1, \quad (2.29)$$

где $t_1 = \frac{\alpha}{\omega_2}$

Тогда необходимое количество ножей расположенных в одной плоскости на барабане может быть определено по выражению.

$$k_{z2} = \frac{2\pi}{\alpha} = \frac{2\pi}{\omega_2 \cdot t_1} = \frac{2\pi \cdot V_{M2}}{\omega_2 \cdot h_1}, \quad (2.30)$$

Высота режущей кромки ножа h_1 выбирается из конструктивных соображений и в зависимости от среднего размера перерезаемых ростков.

Скорость перемещения ростка к режущему аппарату $V_{м2}$ принимается максимально допустимой. Ее можно принять равной скорости вращения ротора барабана молотков R_1 :

$$V_{м2} = \omega_1 R_1 . \quad (2.31)$$

2.5 Обоснование конструктивных параметров дробилки

Основные параметры измельчающего барабана, которые необходимо рассчитать - это геометрические размеры, количество рабочих органов на дробильном и ножевом измельчающем барабанах.

Чтобы выполнить расчет дробилки необходимо знать начальные и конечные размеры измельчаемого материала, его физико-механические характеристики, вид рабочих органов агрегата.

Расчет производительности дробилки начинают с геометрических размеров камеры измельчения и измельчающего барабана. Секундная производительность дробилки связана с удельной нагрузкой на измельчающий барабан по выражению:

$$q' = q_p / (DL), \quad (2.32)$$

Дробильные установки, которые применяются в сельском хозяйстве имеют удельные нагрузки от 2 до 6 кг/(с·м²). Такой разброс значений объясняется скоростями молотков, т.е. частотой вращения дробильных барабанов. Верхний предел удельной нагрузки характерен для молотков, работающих со скоростями 65 - 75 м/с.

Длину дробильного барабана можно определить по выражению $L = D/k$. С учетом представленного выражения диаметр дробильного барабана можно определить по формуле:

$$D = \sqrt{kq/q'} \quad (2.33)$$

Формулу можем записать в виде:

$$D = A\sqrt{q} \quad (2.34)$$

Коэффициент A выбирают в зависимости от типа измельчающего барабана, т.е. отношения большой полуоси эллипсоида к малой.

2.5.1 Определение размеров молотков

При работе молотки взаимодействуют с зерном, т.е. молоток тоже получает сопротивление со стороны измельчаемого продукта [23]. Чтобы в процессе работы молоток не передавал удары на ось крепления и далее на корпуса подшипников дробильной камеры должно соблюдаться соотношение:

$$\rho_0^2 = cl, \quad (2.35)$$

где c – расстояние от оси крепления молотка до центра тяжести;

l – расстояние от оси крепления до края молотка;

ρ_0 – радиус инерции молотка относительно оси крепления.

Если молоток пластинчатый на котором выполнено одно технологическое отверстие, расстояние c можно рассчитать по формуле:

$$c = (a^2 + b^2)/(6a) \quad (2.36)$$

где a – длина молотка, м;

b – ширина молотка, м.

Если работают пластинчатым молотком, но у которого два отверстия, расстояние c можно найти из выражению:

$$c = -\left(\frac{A}{2}\right) + \sqrt{(A^2/4) + B}, \quad (2.37)$$

где $A = [a^2b/(\pi d^2)] - (a/2)$; $B = [ab(a^2 + b^2)]/(6 \pi d) - (d^2/8)$.

Чтобы произвести расчет уравновешенных на удар молотков и дисков придерживаются такой последовательности. Необходимо определить размеры l и R_{Π} . применив выражение:

$$R_{\Pi} = 2,25l, \quad (2.38)$$

С учетом формул (2.33) и (2.34), $R_{\Pi} = (D/2) - l$, тогда

$$l = \frac{4}{9}R_{\Pi} = \frac{4}{9}[(D/2) - l], \quad (2.39)$$

Отсюда $l = 0,154D$ и $R_{II} = 0,346D$

Если расчетный диаметр барабана D меньше сорока сантиметров, то длину барабана нужно принимать больше, чем $l = 0,2D$, или молотки будут короткими и не смогут выполнять полное измельчение продукта. Размеры молотка и ножа, а именно длину a и ширину b молотка уравновешенного на удар, необходимо считать, с учетом $a = 1,5$, $l \approx 0,23D$ и $b = (0,4 - 0,5)$, $a \approx 0,1D$.

Диаметр отверстия в молотке или ноже, для крепления на пальце, устанавливают с учетом прочности материала ножа (молотка). Диаметр пальца составляет 16 - 18 мм.

2.5.2 Определение числа молотков и ножей

Основными требованиями при выборе числа молотков и ножей являются:

1. Чтобы исключить пропуски в работе молотков и ножей необходимо полностью заполнить всю плоскость по ширине измельчающей камеры.
2. При размещении молотков и ножей на пальцах необходимо сохранить статическую и динамическую балансировку измельчающих барабанов.

Для обеспечения заполнения всего поля молотками, или ножами необходимо выполнить условие:

$$z = (L - \Delta L)k_z/a, \quad (2.40)$$

где L – ширина барабана, м;

ΔL – суммарная толщина дисков, не перекрываемая молотками, м;

k_z - число молотков (ножей) идущих по одному следу;

a - толщина молотка (ножа), м.

Учитывая число молотков (ножей) идущих по одному следу (2.15) и (2.30) получим расчетные значения для определения общего числа молотков, установленных на дробильном барабане и общего количества ножей, установленных на ножевом барабане:

- число молотков

$$z_1 = \frac{2\pi V_M}{\omega_1 h} (L - \Delta L_1) / a_1, \quad (2.41)$$

- число ножей

$$z_2 = \frac{2\pi V_{M2}}{\omega_2 h_1} (L - \Delta L_2) / a_2, \quad (2.42)$$

где a_1 - толщина молотка, м;

a_2 - толщина ножа, м;

V_M - скорость подачи материала, м/с;

ΔL - суммарная толщина дисков, не перекрываемая молотками (ножами), м;

С учетом равенства $\omega = \pi n / 30$ число молотков и ножей можно определить через частоту вращения ротора измельчителя:

- число молотков

$$z_1 = \frac{60 V_M}{h n_1} (L - \Delta L_1) / a_1, \quad (2.43)$$

- число ножей

$$z_2 = \frac{60 V_{M2}}{h_1 n_2} (L - \Delta L_2) / a_2, \quad (2.44)$$

где n_1 - частота вращения ротора молотков, мин^{-1} ;

n_2 - частота вращения ротора ножей, мин^{-1} .

На рисунке 2.6 изображены поверхность отклика количества молотков, установленных на дробильном барабане от частоты вращения дробильного барабана и толщины молотков и ее двумерные сечения.

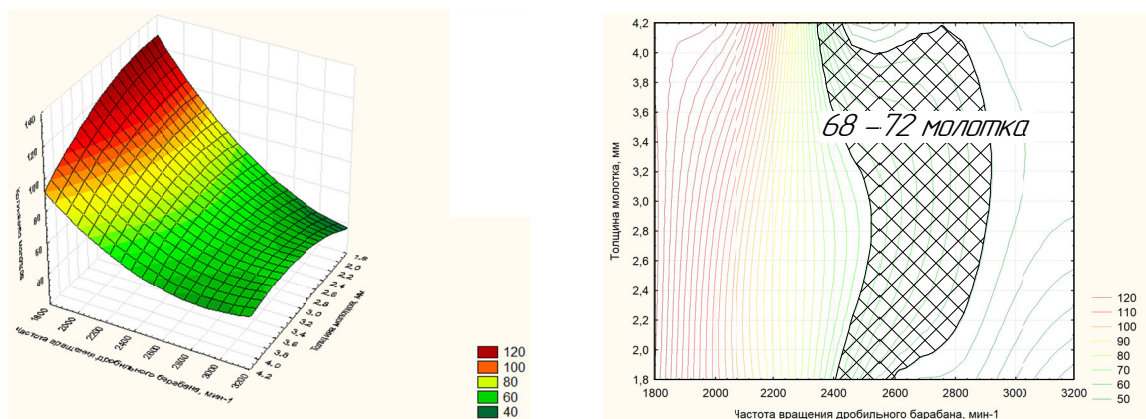


Рисунок 2.6 – Поверхность отклика количества молотков, установленных на дробильном барабане от частоты вращения дробильного барабана и толщины молотков и ее двумерные сечения

Из рисунка можем отметить, что рекомендуемое количество молотков 68 - 72 единицы можно установить на дробильном барабане, если обеспечить его частоту вращения 2400 - 2600 мин⁻¹, при толщине молотков в интервале 2,5 - 3,8 мм.

На рисунке 2.7 изображены поверхность отклика количества ножей, установленных на ножевом барабане от частоты вращения ножевого барабана и толщины ножа, и ее двумерные сечения.

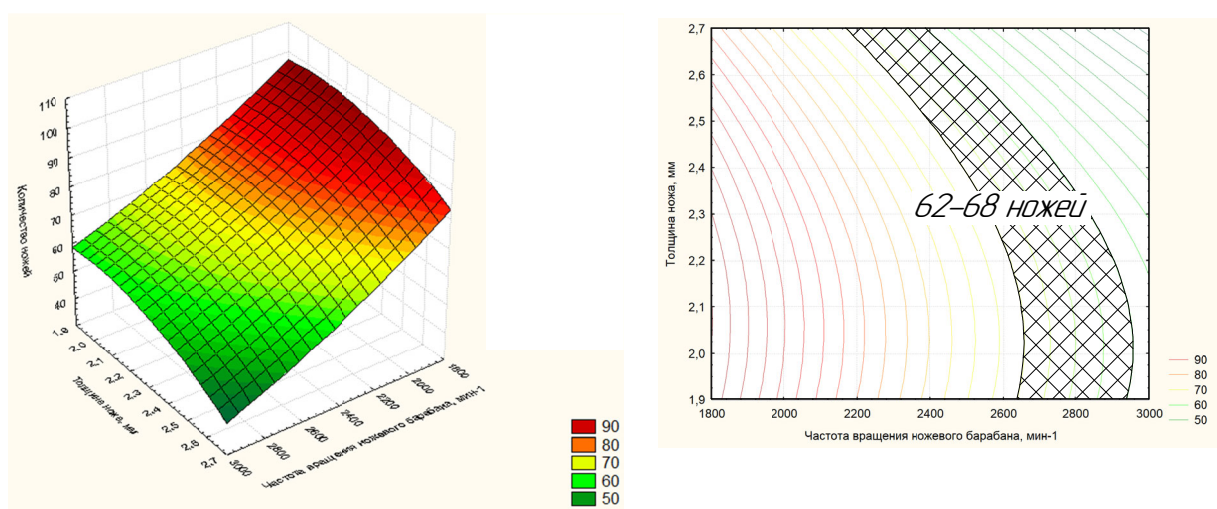


Рисунок 2.7 – Поверхность отклика количества ножей, установленных на ножевом барабане от частоты вращения ножевого барабана и толщины ножа, и ее двумерные сечения

Из рисунка можем отметить, что рекомендуемое количество ножей 62 - 68 единиц можно установить на ножевом барабане, если обеспечить его частоту вращения 2640 - 2950 мин⁻¹, при толщине ножей в интервале 1,9 - 2,7 мм. Указанная толщина ножей обусловлена прочностными характеристиками материала.

2.6 Теоретическое обоснование угла заточки ножа

При реализации различных технологических процессов в промышленности и в сельском хозяйстве, например, при предварительной обработке и подготовке компонентов к смешиванию, необходимо проводить измельчение продуктов [91,

97]. Измельчаемые материалы могут быть органического и неорганического происхождения и существенно иметь отличия по своим физико-механическим и прочностным свойствам. Продукты растительного происхождения характеризуются разбросом физико-механических свойств, которые зависят, в основном, от влажности материала, а также формы поперечного сечения разрушаемого объекта [34, 53 - 57, 72, 103, 104, 105, 107, 108]. Поэтому для обеспечения эффективности технологического процесса и снижения энергозатрат необходимо увязывать конструктивные параметры измельчителя со структурными и физико-механическими свойствами продукта. Однако в первом приближении непосредственно процесс резания можно идеализировать, как процесс резания плоского слоя продукта ножом, направление резания которого перпендикулярно плоскости продукта. Ниже приведены результаты теоретических исследований процесса резания, на основе теории В.П. Горячкина о затратах энергии на резание [23, 108, 109].

Основная часть

Геометрические размеры ножей рассчитаны с учетом наименьших затрат энергии с использованием теории В.П. Горячкина. Физическая модель процесса резания плоского слоя продукта лезвием ножа (расчетная схема) представлена на рисунке 2.8. Предполагается резание слоя материала. Для математической постановки задачи сделаем некоторые допущения и упрощения:

- физико-механические и прочностные свойства материала одинаковы по всему сечению разрезаемого слоя продукта;
- процесс резания происходит перпендикулярно плоскости слоя продукта;
- ширина лезвия ножа больше толщины слоя продукта;
- режущая кромка ножа имеет угол заточки γ относительно линии резания слоя продукта.

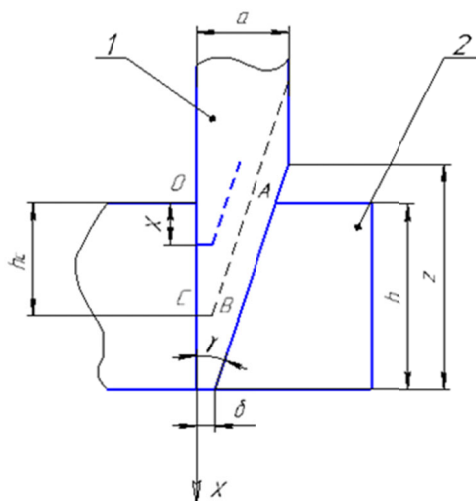
Когда осуществляют разработку технических средств, для измельчения пророщенного зерна, необходимо брать во внимание физические свойства

продукта, в том числе неоднородность его структуры, а также различие в свойствах зерновки и ростков [15, 17, 99].

Довольно подробно и с учетом влияния различных факторов в литературе приведен процесс дробления зерна [110 - 115]. Учитывая это, далее рассмотрен процесс резания ростков.

Рассмотрим процесс резания ростков, так как измельчение стеблевой массы в большинстве случаев производят резанием [23, 116 - 125].

На рисунке 2.8 изображена схема процесса резания.



a – толщина ножа; h – высота слоя разрезаемого материала; z – длина участка заточки ножа;
 γ – угол заточки; δ – толщина режущей кромки; h_c – перемещение ножа до момента
 максимального сжатия материала; x – текущее перемещение ножа
 1 – нож; 2 – материал.

Рисунок 2.8 - Схема резания

Цель исследования: при измельчении заданного по высоте слоя растительного материала определить по минимуму энергозатрат оптимальные параметры режущей части ножа – δ , γ , z [116, 117, 118, 126 - 133].

Согласно теории В.П. Горячкина, полную энергию A , Дж, измельчения можно представить в виде суммы энергии, которая расходуется на процесс сжатия измельчаемого продукта лезвием ножа A_c , Дж, и энергии, затраченной на резание A_p , Дж, [23, 116]:

$$A = A_c + A_p \quad (2.45)$$

где A_c – энергия, которая расходуется на процесс сжатия материала лезвием ножа, Дж;

A_p – энергия, затраченная на резание, Дж.

Математическую модель процесса измельчения сформируем, исходя из условий взаимодействия ножа 1 с материалом 2 (при следующих допущениях):

– при перемещении ножа на расстояние от $x = 0$ до $x = h_c$, м, осуществляется сжатие продукта силой $N_c(x)$, Н;

– при движении ножа от точки С, сила $N_c(x)$ компенсируется силой резания $N_p(x)$, Н, материала на участке $(h - h_c)$, т.е. в точке $x = h_c$ выполняется условие равновесия системы:

$$N_c(x) = N_p(x) \quad (2.46)$$

Сила сжатия определяется согласно выражения:

$$N_c(x) = \sigma L(\delta + x \operatorname{tg} \gamma) \quad (2.47)$$

где σ – допустимое напряжение сжатия, Па;

L – ширина перерезаемого слоя материала, м;

δ – толщина режущей кромки, м.

Сила резания равна:

$$N_p(x) = \tau Lx \quad (2.48)$$

где τ – допустимое напряжение сдвига, Па.

Из равенства (2.46) с учетом выражений (2.47) и (2.48) при $x = h_c$ найдем:

$$h_c = \delta / (k - \operatorname{tg} \gamma), \quad (2.49)$$

где $k = \tau / \sigma$.

С целью определения затрат энергии на процесс измельчения произведем расчет работы сил.

Элементарная работа силы сжатия будет равна:

$$dA_c = N_c(x)dx = \sigma L(\delta + x \operatorname{tg} \gamma)dx, \quad (2.50)$$

откуда

$$A_c = \sigma L \int_0^{h_c} (\delta + x \operatorname{tg} \gamma) dx = \sigma L (\delta h_c + 0,5 h_c^2 \operatorname{tg} \gamma). \quad (2.51)$$

Элементарную работу силы резания найдём по формуле:

$$dA_p = N_p(x)dx, \quad (2.52)$$

откуда

$$A_p = \tau L \int_0^{h-h_c} x dx = 0,5\tau L(h-h_c)^2. \quad (2.53)$$

Общая работа на измельчение согласно (2.45), (2.51) и (2.53) будет равна

$$A = \sigma L(\delta h_c + 0,5h_c^2 \operatorname{tg}\gamma) + 0,5\tau L(h-h_c)^2. \quad (2.54)$$

В качестве физических критериев оптимальности можно принять отношение общей работы на измельчение A к затратам работы на резание A_p

$$A_1 = A/A_p = 1 + 2(\delta h_c + 0,5h_c^2 \operatorname{tg}\gamma) / (k(h-h_c)^2), \quad (2.55)$$

или наименьшее значение суммарной относительной работы, мм² (геометрические параметры – в мм):

$$A_o = A_c/\sigma L + A_p/\sigma L = \delta h_c + 0,5h_c^2 \operatorname{tg}\gamma + 0,5k(h-h_c)^2 \rightarrow \min \quad (2.56)$$

При расчете учитываем ограничение:

$$z = (a - \delta) / \operatorname{tg}\gamma \geq h. \quad (2.57)$$

Рассмотрим пример расчета с использованием следующих исходных данных: $h = 4$ мм; $0,05 \leq \delta \leq 0,09$; $a \geq 2$ мм; $\sigma = 0,08$ МПа; $\tau = 0,32$ МПа (принимаем, что минимальная толщина ножа $a = 2$ мм соответствует минимальному коэффициенту запаса прочности – единице) [117].

Из ограничения (2.55) для обеспечения надежности перерезания продукта с учетом некоторого запаса (например, 20 %) по длине z принимаем $z_{max} = 1,2h$, откуда получим безразмерную функцию, минимум которой стремится к нулю (математический критерий оптимальности):

$$F_1 = |1,2h/z - 1| \rightarrow \min, \quad (2.58)$$

где z – текущее значение длины участка заточки ножа.

2.7 Результаты расчета

Минимум критерия (2.54) определяем минимизацией (2.56) методом дихотомии [133] по переменной γ в интервале $14^\circ \dots 22^\circ$ (размер интервала – произвольный, но задаваемый с учетом возможного максимального значения γ для каждого изменяемого в цикле с шагом 0,01 мм значения δ).

Результаты расчета при $h = 4$ мм и $a = 2$ мм представлены в таблице 2.1. Физический критерий показывает отношение общей работы на измельчение к работе на резание. Из таблицы 2.1 следует, что физический критерий принимает минимальное значение $A_1 = 1,000073$ при толщине режущей кромки $\delta = 0,05$ мм, угле заточки γ угол заточки, 14° при толщине ножа $a = 2$ мм. Ниже, на рисунке 2.9, показана расчетная поверхность для физического критерия A_1 в зависимости от угла заточки ножа γ и толщины режущей кромки ножа δ .

Таблица 2.1 – Влияние толщины режущей кромки на энергозатраты

δ толщина режущей кромки, мм	γ угол заточки, град.	A_1 физический критерий в относительных единицах	A_0 физический критерий оптимальности (минимум суммарной относительной работы), мм ²	математический критерий оптимальности $F_1 \cdot 10$
$h = 4$ мм; $a = 2$ мм; $z = 1,2h$				
0,05	14	1,000073	31,7877	3,863
0,06	16	1,000104	31,7430	2,905
0,07	18	1,00014	31,6974	1,919
0,08	20	1,000182	31,6508	0,901
0,09	22	1,000231	31,6032	0,154

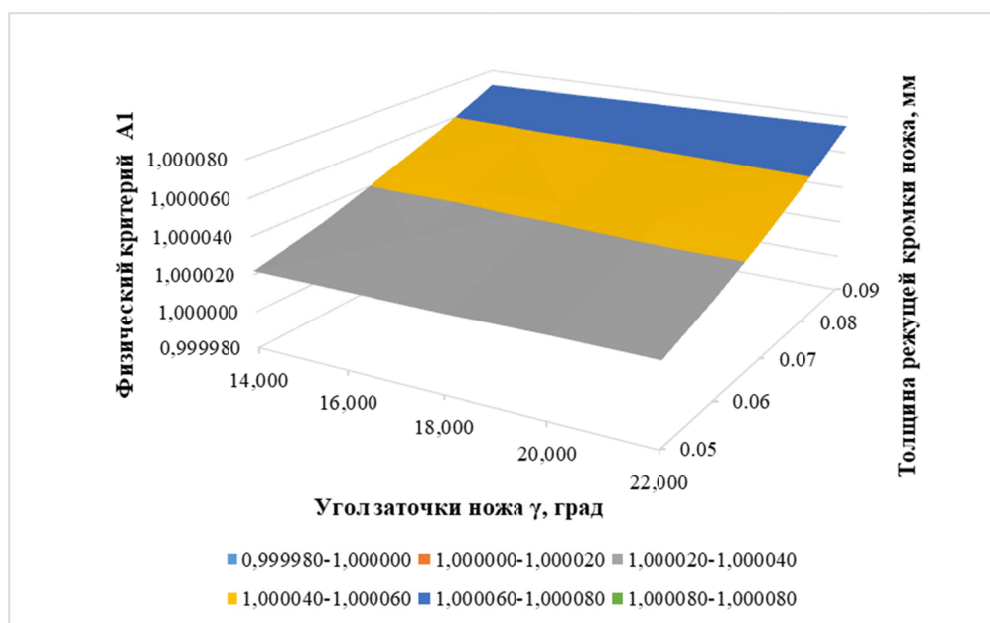


Рисунок 2.9 - Физический критерий A_1 в зависимости от угла заточки ножа γ и толщины режущей кромки ножа δ

Согласно расчетной поверхности, можем заключить, что на физический критерий A_1 показывающий отношение общей работы на измельчение к работе на резание зависит как от угла заточки ножа, так и от толщины режущей кромки. С увеличением, как угла заточки ножа, так и толщины режущей кромки ножа отношение общей работы на измельчение к работе на резание возрастает, так как увеличивается работа на сжатие. Но, более существенным фактором, является толщина режущей кромки ножа.

Для определения влияния толщины ножа a на энергозатраты A_0 и на математический критерий оптимальности F_1 были проведены расчеты при различных значениях a (таблица 2.2). Ниже, на рисунке 2.10, показана расчетная поверхность для математического критерия оптимальности F_1 в зависимости от толщины a ножа и угла заточки ножа γ .

Таблица 2.2 – Влияние толщины ножа на энергозатраты

a толщина ножа, мм	δ толщина режущей кромки, мм	γ угол заточки, град.	A_0 физический критерий оптимальности (минимум суммарной относительной работы), мм ²	математический критерий оптимальности $F_1 \cdot 10$
$h = 4$ мм; $z = 1,2h$				
2	0,05	14	31,7877	3,8627
3	0,05	16	31,7428	5,3343
4	0,05	18	31,6970	6,0516
5	0,05	20	31,6501	6,4706
6	0,05	22	31,6022	6,7406

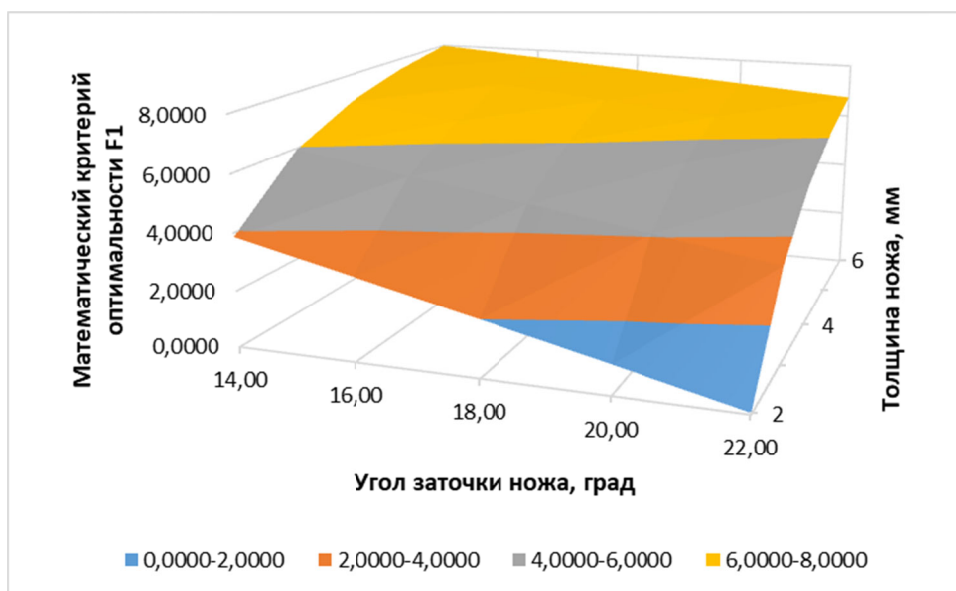


Рисунок 2.10 - Математический критерий оптимальности F_1 в зависимости от толщины a ножа и угла заточки ножа γ

Согласно представленной на рисунке 2.10 поверхности, можем заключить, что на надежность процесса резания продукта по математическому критерию (2.56) влияют и угол заточки ножа, и толщина лезвия ножа. Теоретический минимум наблюдается при толщине ножа 2 мм и угле заточки ножа 22° .

Следовательно, с позиции минимума энергозатрат на резание (рисунок 2.9), можно рекомендовать толщину режущей кромки 0,05 мм, а с позиции надежности процесса резания по математическому критерию (рисунок 2.10) - угол заточки ножа до 22° .

Если, для обеспечения минимума энергозатрат на резание продукта, необходима определенная толщина ножа a , то для этого случая оптимальные значения γ и δ при минимуме энергозатрат A_{omim} можно оценить по минимуму безразмерной функции, стремящейся к нулю:

$$F_2 = | A_{\text{omim}} / A_0 - 1 | \rightarrow \min, \quad (2.59)$$

где A_0 – текущее значение энергозатрат.

Если в качестве обобщенного критерия использовать сумму безразмерных критериев F_1 и F_2 , то можно получить условную теоретическую оценку критерия оптимальности по безразмерным показателям.

$$F = F_1 + F_2, \quad (2.60)$$

Выше были рассмотрены методы оптимизации на основе безразмерных критериев оптимизации, определяемых функциями согласно выражениям (2.56), (2.57) и (2.58).

В тоже время при внедрении нож сжимает материал объемом

$$V = SL, \quad (2.61)$$

где

$$S = \delta h_c + 0,5 h_c^2 \operatorname{tg} \gamma, \quad (2.62)$$

где S - площадь трапеции $OABC$.

Поэтому вторым критерием при оценке процесса резания может служить безразмерная величина равная отношению работы на сжатие к общей работе:

$$A_2 = A_c/A = (A_1 - I)/A_1 \quad (2.63)$$

Показатели δ , γ и z связаны выражением:

$$z = \frac{(a - \delta)}{\operatorname{tg} \gamma} \geq h. \quad (2.64)$$

Ниже приведен пример расчета оптимальных параметров ножа δ , γ и z при следующих исходных данных $0,05 \leq \delta \leq 0,09$; $h = 4$ мм; $a = 2$ мм; $\sigma = 0,08$ МПа; $\tau = 0,32$ МПа.

Поиск минимума выражения (2.54) можно провести методом дихотомии [134] по переменной z в интервале $(h \dots qh)$.

Полученные результаты расчета параметров δ , γ , z , A_2 записаны в таблице 2.3. Расчеты проводились с последовательным увеличением толщины режущей кромки ножа δ .

Таблица 2.3 - Результаты расчета параметров оптимизации

δ , мм	γ , град	z , мм	$A_2 \cdot 10^5$
$a = 2$ мм; $h = 4$ мм; $k = 0,32/0,08 = 4$			
0,05	14	7,821	2,166564
0,06	16	6,766	3,172143
0,07	18	5,940	4,392302
0,08	20	5,275	5,839535
0,09	22	4,727	7,527913

На рисунке 2.11 представлена расчетная поверхность физического критерия на сжатие от толщины режущей кромки ножа и угла заточки ножа.

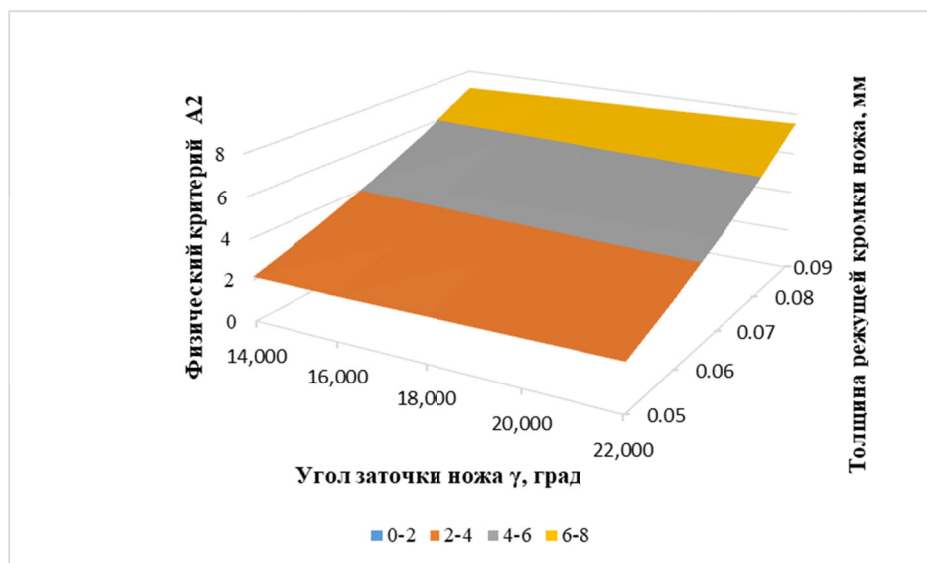


Рисунок 2.11 – Физический критерий на сжатие от толщины режущей кромки ножа и угла заточки ножа

Затраты работы на сжатие возрастают с увеличением толщины режущей кромки и угла заточки ножа. Наибольшее влияние оказывает толщина режущей кромки ножа. Наименьшее значение физического критерия A_2 наблюдается при толщине режущей кромки 0,05 мм и угле заточки ножа 14^0 .

Представленная выше математическая модель процесса резания по теории В.П. Горячкина и последовательность расчета наилучших параметров позволят выполнить расчеты с учетом различных параметров резки слоя материала. В таблице 2.4 записаны результаты проведенных расчетов для слоев продукта различной высоты h , с учетом толщины ножа «а» и относительного коэффициента прочности материала, где $k = \tau/\sigma = 0,32/0,08 = 4$.

Таблица 2.4 – Удельные энергозатраты при различных вариантах резки

N варианта расчета	h , мм	δ , мм	γ град	A_0 , мм ²
1	8	0,05	14	127,574
2	8	0,05	22	127,484
3	6	0,05	14	71,545
4	6	0,05	22	71,474
5	4	0,05	14	31,602
6	4	0,05	22	32,000

Ниже, на рисунке 2.12, показана интерпретация данных таблицы 2.6 для физического критерия оптимальности A_0 в зависимости от высоты слоя разрезаемого материала h и угла заточки ножа, γ .

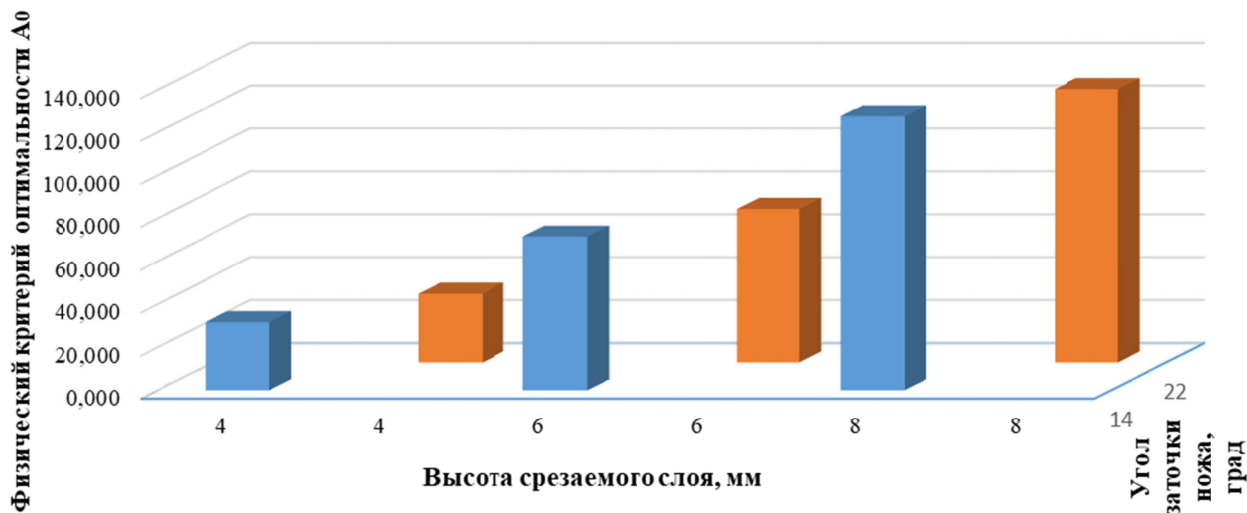


Рисунок 2.12 – Физический критерий оптимальности A_0 в зависимости от высоты слоя разрезаемого материала h и угла заточки ножа γ

Согласно полученным результатам можно отметить, что затраты суммарной относительной работы на резание в основном зависят от высоты срезаемого слоя и возрастают от 31,602 - 32 при толщине перерезаемого слоя 4 мм до 127,484 – 127,574 при толщине перерезаемого слоя 8 мм.

2.8 Обоснование производительности дробилки

Общая производительность измельчителя Q (кг/с) будет определяться производительностью измельчения в каждом слое:

$$Q = q_1 + q_2, \quad (2.65)$$

где q_1 - производительность в слое молотков, кг/с;

q_2 – производительность в слое ножей, кг/с.

Производительность в слое молотков может быть определена по формуле [23]:

$$q_1 = \pi D L h_{\text{сл1}} \rho_1 \mu_{\text{ц1}} / t, \quad (2.66)$$

где D диаметр барабана, м;

L - ширина барабана, м;

$h_{\text{сл1}}$ - толщина слоя дробления молотками ($h_{\text{сл1}} = h$), м;

ρ_1 - плотность зерновок, кг/м³;

$\mu_{\text{ц1}}$ - концентрация зерновок в слое, кг/кг;

t - продолжительность пребывания материала в камере, т.е. время его обработки, с.

Производительность в слое ножей может быть определена по формуле [23]:

$$q_2 = \pi D L h_{\text{сл2}} \rho_2 \mu_{\text{ц2}} / t, \quad (2.67)$$

где D - диаметр барабана, м;

L - ширина барабана, м;

$h_{\text{сл2}}$ - толщина слоя измельчения ножами ($h_{\text{сл2}} = h_1$), м;

ρ_2 - плотность ростков, кг/м³;

$\mu_{\text{ц2}}$ - концентрация ростков в слое, кг/кг;

t - продолжительность пребывания материала в камере, т.е. время его обработки, с.

В тоже время, если выбранное число молотков k_{z1} в каждом из измельчающих барабанов обеспечивают разрушение частиц за 1 оборот ротора, производительность в слое молотков может быть определена интегрированием элементарного сечения измельченного материала по траектории движения молотков и ножей:

$$\Delta q_1 = \Delta S_1 v_1 \rho_1 \mu_{\text{ц1}}, \quad (2.68)$$

$$\Delta q_2 = \Delta S_2 v_2 \rho_2 \mu_{\text{ц2}}, \quad (2.69)$$

где Δq_1 , Δq_2 - соответственно элементарная производительность при измельчении в молотковом и в ножевом слое, кг/с;

ΔS_1 , ΔS_2 - соответственно элементарные сечения молоткового и ножевого слоя, м²;

v_1, v_2 – соответственно линейные скорости движения элементарных сечений молоткового и ножевого слоя, м/с;

ρ_1, ρ_2 – соответственно плотность зерновки и ростка, кг/м³;

$\mu_{ц1}, \mu_{ц2}$ – концентрация частиц в молотковом и ножевом слое, кг/кг

Элементарные сечения ΔS_1 и ΔS_2 в молотковом и в ножевом слое пропорциональны ширине барабана L элементарной высоте слоя по радиусу вращения r :

$$\Delta S_1 = L\Delta r, \quad (2.70)$$

$$\Delta S_2 = L\Delta r. \quad (2.71)$$

Тогда на основании равенства $v = \omega r$ получаем элементарные производительности при измельчении в молотковом и в ножевом слое как функции, зависящие от угловой частоты ω и ω_1, ω_2 соответственно угловые скорости вращения частиц в молотковом и ножевом слое, с⁻¹:

$$\Delta q_1 = Lv\omega_1\rho_1\mu_{ц1}r\Delta r, \quad (2.72)$$

$$\Delta q_2 = Lv\omega_2\rho_2\mu_{ц2}r\Delta r. \quad (2.73)$$

где ω_1, ω_2 соответственно угловые скорости частиц в молотковом и ножевом слое, с⁻¹.

В этом случае расчетная производительность в каждом слое может быть определена интегрированием по высоте слоя:

$$q_1 = \int_{R_1}^{R_1+h_{сл1}} Lv\omega_1\rho_1\mu_{ц1}rdr, \quad (2.74)$$

$$q_2 = \int_{R_2}^{R_2+h_{сл2}} Lv\omega_2\rho_2\mu_{ц2}rdr, \quad (2.75)$$

где R_1, R_2 – соответственно радиусы закрепления молотков и ножей на своих роторах, м;

$h_{сл1}, h_{сл2}$ – соответственно высоты молоткового и ножевого слоя, м.

После интегрирования получаем расчетные значения производительности в каждом слое:

$$q_1 = \omega_1 L h_{сл1} \rho_1 \mu_{ц1} \left(R_1 + \frac{h_{сл1}}{2} \right), \quad (2.76)$$

$$q_2 = \omega_2 L h_{сл2} \rho_2 \mu_{ц2} \left(R_2 + \frac{h_{сл2}}{2} \right), \quad (2.77)$$

Если принять:

$$h_{\text{сл1}} = h, h_{\text{сл2}} = h_1, \quad (2.78)$$

то окончательно получим формулы для определения производительности в каждом слое:

$$q_1 = \omega_1 L h \rho_1 \mu_{\text{ц1}} \left(R_1 + \frac{h}{2} \right), \quad (2.79)$$

$$q_2 = \omega_2 L h_1 \rho_2 \mu_{\text{ц2}} \left(R_2 + \frac{h_1}{2} \right), \quad (2.80)$$

где h - длина рабочей части молотков, м;

h_1 - длина рабочей части ножей, м.

Значения q_1 и q_2 могут быть выражены через частоту вращения ротора:

$$q_1 = \frac{\pi n_1}{30} L h \rho_1 \mu_{\text{ц1}} \left(R_1 + \frac{h}{2} \right), \quad (2.81)$$

где n_1 - частота вращения молоткового ротора, мин^{-1} .

$$q_2 = \frac{\pi n_2}{30} L h_1 \rho_2 \mu_{\text{ц2}} \left(R_2 + \frac{h_1}{2} \right), \quad (2.82)$$

где n_2 - частота вращения ножевого ротора, мин^{-1} .

Таким образом, общая производительность измельчителя Q (кг/с) будет равна:

$$Q = \frac{\pi L}{30} \left[n_1 h \rho_1 \mu_{\text{ц1}} \left(R_1 + \frac{h}{2} \right) + n_2 h_1 \rho_2 \mu_{\text{ц2}} \left(R_2 + \frac{h_1}{2} \right) \right]. \quad (2.83)$$

В результате проведенных расчетов определено, что производительность принимает наибольшее значение 0,52 - 0,56 т/ч, если обеспечить частоту вращения дробильного барабана 2200 - 2600 мин^{-1} , а частоту вращения ножевого барабана 2600 - 2800 мин^{-1} .

2.9 Расчет энергетических показателей процесса измельчения

Удельные затраты энергии на измельчение (Дж/кг) можно определить в виде суммы затрат энергии на измельчение в каждом слое:

$$A_{\text{изм}} = A_{1\text{изм}} + A_{2\text{изм}}, \quad (2.84)$$

где $A_{1\text{изм}}$ - удельные затраты энергии на измельчение в слое молотков, Дж/кг;

$A_{2\text{изм}}$ - удельные затраты энергии на измельчение в слое ножей, Дж/кг.

При этом каждая из составляющих является функцией степени измельчения продукта [23]:

$$A_{1\text{изм}} = C_1 \lg(\lambda_1^3) + C_2(\lambda_1 - 1), \quad (2.85)$$

$$A_{2\text{изм}} = C(\lambda_2 - 1), \quad (2.86)$$

где C_1 , C_2 , C – коэффициенты пропорциональности, определяемые экспериментально;

λ_1 , λ_2 – соответственно степень измельчения зерновок и ростков пророщенного зерна:

$$\lambda = l_{\text{ср}} / l_{\text{изм}}, \quad (2.87)$$

где $l_{\text{ср}}$ – средний размер частиц до измельчения, м;

$l_{\text{изм}}$ – размер частиц после измельчения, м.

На рисунке 2.13 представлены поверхность отклика удельных затрат энергии на измельчение от степени измельчения зерновки и ростка пророщенного зерна, и ее двумерные сечения.

Из рисунка видим, что наименьшие значения удельных затрат с обеспечением необходимых конечных размеров зерновки и ростка пророщенного зерна наблюдаются в диапазоне 47 - 52 кДж/кг при степени измельчения ростков от 20,71 до 24,17 единиц, а измельчении зерновки от 7,86 до 9,17 единиц.

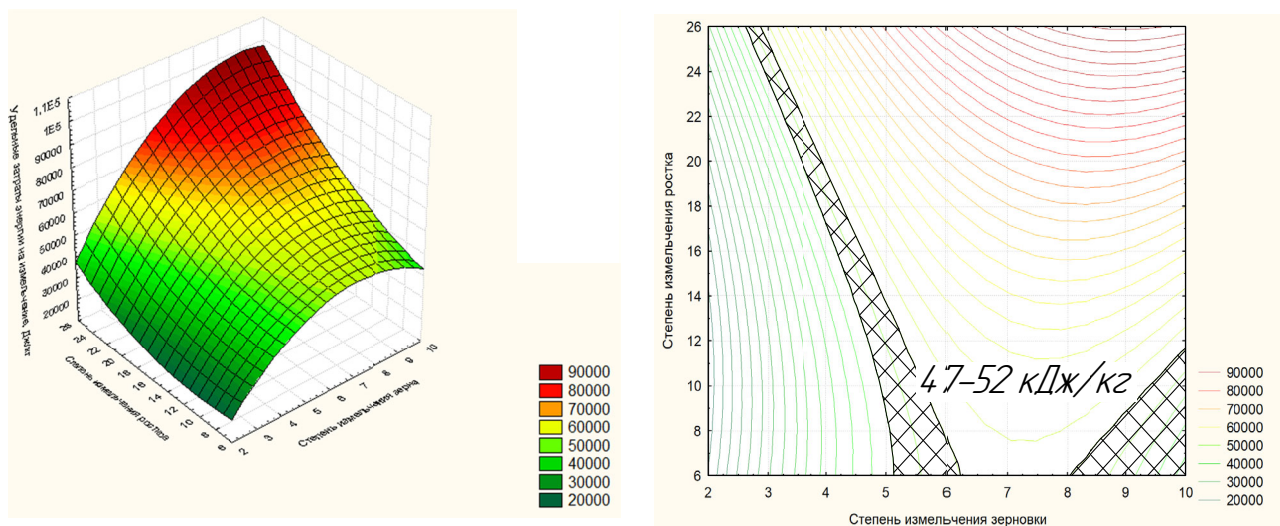


Рисунок 2.13 – Поверхность отклика удельных затрат энергии на измельчение от степени измельчения зерновки и ростка пророщенного зерна, и ее двумерные сечения

Мощность привода на измельчение (Вт) также можно определить в виде суммы мощностей на измельчение в каждом слое:

$$N_{\text{изм}} = N_{1\text{изм}} + N_{2\text{изм}}, \quad (2.88)$$

где $N_{1\text{изм}}$ – мощность привода на измельчение в слое молотков;

$N_{2\text{изм}}$ – мощность привода на измельчение в слое ножей.

Слагаемые мощностей находятся с учетом производительности и затрат энергии на измельчение:

$$N_{1\text{изм}} = q_1 A_{1\text{изм}}, \quad (2.89)$$

$$N_{2\text{изм}} = q_2 A_{2\text{изм}}, \quad (2.90)$$

С учетом потерь мощности полную мощность на привод дробилки можно принимать равной:

$$N = (1,15 \dots 1,20) N_{\text{изм}}. \quad (2.91)$$

Энергоемкость процесса (кВт·ч/т) с учетом степени измельчения оценивается по формуле:

$$\mathcal{E}_H = \mathcal{E}_{H1} + \mathcal{E}_{H2}, \quad (2.92)$$

$$\mathcal{E}_{H1} = N_{\text{изм}1} / (q_1 \lambda_1). \quad (2.93)$$

$$\mathcal{E}_{H2} = N_{\text{изм}2} / (q_2 \lambda_2). \quad (2.94)$$

$$\mathcal{E}_H = \frac{N}{Q} \left(\frac{1}{\mu_1 \lambda_1} + \frac{1}{\mu_2 \lambda_2} \right), \quad (2.95)$$

где $\mu_{ц1}$ - концентрация зерновок в слое, кг/кг;

$\mu_{ц2}$ - концентрация ростков в слое, кг/кг;

Поверхность отклика энергоемкости процесса измельчения от частоты вращения ножевого барабана и степени измельчения пророщенного зерна, и ее двумерные сечения изображена на рисунке 2.14.

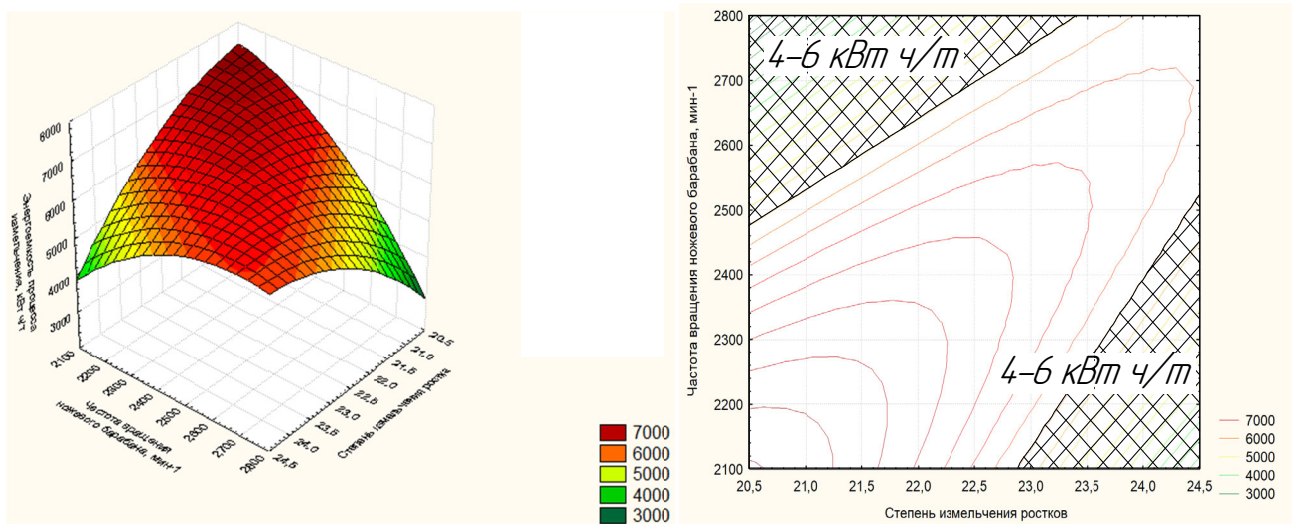


Рисунок 2.14 – Поверхность отклика энергоемкости процесса измельчения от частоты вращения ножевого барабана и степени измельчения пророщенного зерна, и ее двумерные сечения

Из рисунка можем сделать вывод, что для степени измельчения ростков пророщенного зерна 10 - 23 единицы и частоты вращения ножевого барабана 2470 - 2800 мин⁻¹, а также степени измельчения 23 - 24,5 единицы минимальное значение энергоемкости составит 4 - 6 кВт ч/т. Удельный расход энергии (Дж/кг) оценивается по формуле [23]:

$$W = N/Q. \quad (2.96)$$

Общая энергоэффективность (кг/Дж) оценивается по формуле:

$$\mathcal{E} = Q/N. \quad (2.97)$$

Относительная механическая эффективность (т/кВт·ч) оценивается по формуле:

$$\mathcal{E}_M = \mathcal{E}_{M1} + \mathcal{E}_{M2}, \quad (2.98)$$

$$\mathcal{E}_{M1} = q_1 \lambda_1 / N_{\text{изм1}}. \quad (2.99)$$

$$\mathcal{E}_{M2} = q_2 \lambda_2 / N_{\text{изм2}}. \quad (2.100)$$

$$\mathcal{E}_{H2} = N_{\text{изм2}} / \left\{ \lambda_2 \left[\frac{\pi n_2}{30} L h_{\text{сл2}} \rho_2 \mu_{\text{ц2}} \left(R_2 + \frac{h_1}{2} \right) \right] \right\}. \quad (2.101)$$

Для реализации представленного принципа работы комбинированной дробилки определили следующие конструктивные и технологические параметры:

1. частоту вращения периферийных молотков ω_1 ;
2. частоту вращения внутренней системы ножей ω_2 ;
3. число периферийных молотков z_1 ;
4. число внутренних ножей z_2 ;
5. диаметр D и ширина L барабана;
6. общую производительность дробилки Q ;
7. общие энергетические показатели процесса измельчения.

Выводы

1. Предложена методика расчета геометрических параметров ножа по наименьшему значению затрат на резание плоского слоя продукта.

2. Предложены критерии оценки оптимальных параметров при резании, включающие: физический критерий оптимальности на основе суммарной относительной работы при резании; математический критерий оптимальности на основе геометрических параметров ножа и срезаемого слоя продукта; относительный критерий минимума энергозатрат при резании; физический критерий; физический критерий на сжатие.

3. В результате проведенных теоретических исследований по оптимизации конструктивных параметров ножа при резании установлено:

- на физический критерий оказывают влияние, как угол заточки ножа, так и толщина режущей кромки, но более существенным фактором является толщина режущей кромки ножа;

- на надежность процесса резания продукта по математическому критерию влияют и угол заточки ножа, и толщина лезвия ножа. Теоретический минимум наблюдается при толщине ножа 2 мм и угле заточки ножа 22° . С позиции минимума энергозатрат на резание, можно рекомендовать толщину режущей кромки 0.05 мм, а с позиции надежности процесса резания по математическому критерию - угол заточки ножа до 22° ;

- затраты работы на сжатие возрастают с увеличением толщины режущей

кромки и угла заточки ножа. Наибольшее влияние оказывает толщина режущей кромки ножа. Наименьшее значение физического критерия A_2 наблюдается при толщине режущей кромки 0,05 мм и угле заточки ножа 14^0 .

4. В результате теоретических исследований получены расчётные формулы для оценки производительности и энергозатрат предложенной конструкции дробилки с учетом конструктивных особенностей и степени измельчения продукта. В результате проведенного теоретического анализа установлено:

- общая производительность дробилки может быть определена как сумма производительностей отдельными рабочими органами с учетом коэффициента их загрузки и свойств материала;

- удельные затраты энергии на измельчение можно определить в виде суммы затрат энергии на резание и дробление;

- суммарная мощность является суммой мощностей на измельчение в каждом слое материала;

- общая энергоёмкость процесса должна рассчитываться с учетом мощностей на измельчение в каждом слое материала, общей производительности дробилки, а также степени измельчения и концентрации зерновок и ростков в каждом слое.

Расчеты показали рекомендуемое количество ножей 62 - 68 единицы можно установить на ножевом барабане, если обеспечить его частоту вращения 2640 - 2950 мин⁻¹, при толщине ножей в интервале 1,9 - 2,7 мм.

Расчеты показали, что при производительности дробилки 510 - 520 кг/ч для степени измельчения ростков пророщенного зерна 10 - 23 единицы и частоте вращения ножевого барабана 2470 - 2800 мин⁻¹ минимальное значение энергоёмкости составит 4 - 6 кВт ч/т.

3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДРОБИЛКИ ПРОРОЩЕННОГО ЗЕРНА

3.1 Общая постановка вопроса

Проводить экспериментальные исследования нужно с той целью, чтобы подтвердить, или опровергнуть теоретические предположения путём сравнения их с результатами, полученными в ходе проведения экспериментов [135 - 138].

Программа проведения исследований предусматривала:

- подготовку оборудования и приборов для выполнения работ по исследованию дробильной установки пророщенного зерна;
- исследование влияния режимных параметров работы дробилки на размер измельченного материала и однородность измельченного материала;
- определение зависимости качественных показателей процесса измельчения (модуль помола, однородность измельчённого материала) от конструктивных параметров и кинематических режимов работы агрегата [23, 94, 95, 99].

Конструкцией экспериментальной дробилки предусмотрено изменение следующих конструктивно-режимных параметров:

- работа с одним, или двумя дробильным и измельчающим барабанами;
- выполнение измельчения пророщенного зерна только молотками, только ножами, или молотками и ножами;
- смена решет дробильной камеры;
- изменение частоты вращения, дробильного и режущего барабанов.

Для выполнения измерений использовали приборы для измерения и оборудование, указанное в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Измерительные приборы и оборудование

Параметр измерения	Наименование прибора, оборудования	Стандарт на прибор, оборудование	Точность измерений
Линейные размеры	Рулетка металлическая Р5УЗК	ГОСТ 7502-80	$\pm 1,0$ мм
	Линейка измерительная металлическая 300 мм,	ГОСТ 427--75	$\pm 1,0$ мм
Угловые размеры	Уровень строительный. Транспортир	ГОСТ 9416-76	$\pm 2\%$ $\pm 1^{\circ}$
Частота вращения	Тахометр часового типа ТЧ-10-Р	ГОСТ 21339-75	± 1 мин ⁻¹
Время, с	Секундомер СОСпр-2б		± 1 с
Пробы	Пробоотборник механический	ГОСТ 15895	
Проба	Бюксы стеклянные	ГОСТ 25336	
Масса	Весы аналитические АД-200 Масса-К ВК-1500	ТУ 25.06.575-77 ГОСТ 24104-2001	$\pm 0,1\% \pm 5$ г $\pm 0,02$ г
Напряжение Сила тока	Клещи токоизмерительные ИЕК266	ГОСТ Р 51522.2.2 EN 61326-2-2	$\pm 0,5 \%$
Потребление электроэнергии	Счетчик электрической энергии «Меркурий 201.5»	ГОСТ Р 52322-2005	Кл. т. 1
Влажность пророщенного высушенного зерна	Влагомер Wile 65		$\pm 0,5 \%$
Крупность измельченных частиц пророщенного зерна	Рассев У1-ЕРЛ		
Структура пророщенного зерна	Микроскоп Levenhuk 950T DARK Series Microscopes		
Геометрические размеры пророщенного зерна	Микроскоп LEY YF001206		
Плотность пророщенного зерна	Пурка ПХ-1 с равноплечными весами	ГОСТ 10840-64	± 4 г

На рисунке 3.1 представлена схема проведения экспериментальных исследований [94, 97, 111, 124].

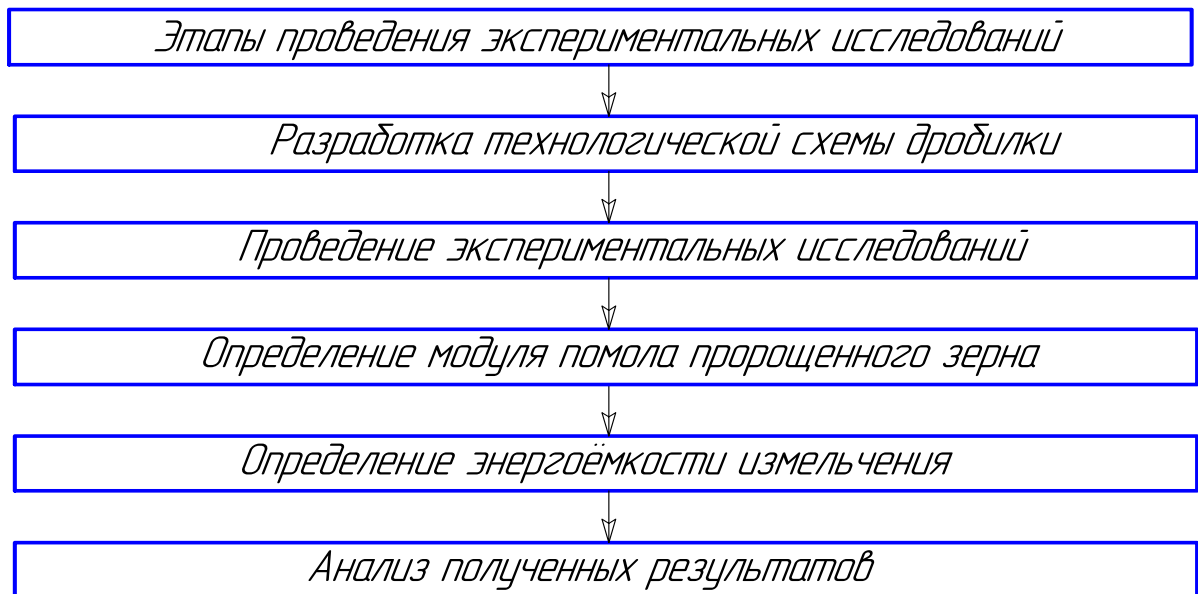


Рисунок 3.1 - Схема проведения экспериментальных исследований

В качестве исходного сырья использовали пророщенное зерно с длиной ростков 2,0...2,7 см, высушенное до влажности 14 %.

Экспериментальные исследования выполняли следующим образом. На дробилке выполняли настройки. Устанавливали режимные и конструктивные параметры согласно матрице планирования эксперимента. После чего запускали один электродвигатель для привода одного измельчающего барабана, через пол минуты включали другой электродвигатель для привода другого измельчающего барабана. Таким образом, затем запускали дробилку. Когда дробилка выходила на установившийся режим работы, открывали дозирующую заслонку и пророщенное высушенное зерно попадало в дробильную камеру, где взаимодействовало с молотками, ножами, решетом и декой [139 - 142].

3.2 Методика проведения экспериментальных исследований дробилки пророщенного зерна

Выполнив анализ теоретических и экспериментальных работ в области измельчения зерна отметим, что важно определить факторы, влияющие на процесс измельчения и учесть их при планировании эксперимента. Рационально

подобранные наиболее значимые факторы и их значения отражают весь технологический процесс при их наименьшем количестве [94 - 137, 138].

Влияние факторов на критерий оптимизации оценивали по следующей методике [135, 136].

С целью выбора области исследования факторов необходимо провести их анализ. У каждого фактора определить нулевое значение, затем путем прибавления и вычитания одного и того же числа (интервал варьирования) от нулевого значения установить уровни соответствующие - 1 и + 1.

Чтобы оценить влияние различных факторов на критерий оптимизации необходимо применить планирование многофакторного эксперимента. При проведении эксперимента необходимо воспользоваться матрицей, в которой в каждой строке, отдельном опыте указать уровень варьирования факторов.

Необходимо определить критерий оптимизации, который должен быть увязан с воздействующими на него факторами. Критерий оптимизации должен иметь возможность физического измерения.

Отдельные независимые факторы будем менять согласно некомпозиционного плана второго порядка Бокса-Бенкина.

При выполнении отсеивающих экспериментов установили факторы, которые в большей степени влияют на измельчение пророщенного зерна. Чтобы провести эксперимент использовали матрицу планирования, которая приведена в таблице 3.2. Факторы установлены на трех уровнях варьирования, поэтому эксперимент имеет вид n^k , где n – число уровней варьирования факторов, k – число факторов.

Кодирование осуществляли по формуле [138]:

$$X_J = \frac{X_J - X_{J0}}{I_J}, \quad (3.1)$$

где X_J – натуральное значение фактора;

X_{J0} – натуральное значение основного уровня;

I_J – интервал варьирования факторов.

Таблица 3.2 – Матрица планирования эксперимента.

Обозначение	X ₁	X ₂	X ₃
1	+1	+1	+1
2	-1	-1	-1
3	0	0	0
4	+1	+1	-1
5	+1	-1	+1
6	-1	+1	+1
7	+1	0	+1
8	+1	0	-1
9	-1	0	+1
10	-1	-1	0
11	0	0	+1
12	0	0	-1
13	0	-1	0
14	0	+1	0
15	-1	+1	-1
16	0	+1	+1
17	0	-1	+1
18	0	-1	-1

При проведении эксперимента модуль помола учитывали, как критерий оптимизации.

Число рабочих органов в дробильной камере принимались равными: число молотков 72 шт; число ножей 66 шт. Плотность, твердость пророщенного зерна, парусность, скорость витания во всех точках эксперимента были постоянными.

На модуль помола пророщенного зерна в дробильном барабане влияют факторы, которые записаны в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Факторы, влияющие на модуль помола пророщенного зерна в дробильном барабане.

Обозначение	Наименование фактора	Уровни варьирования факторов		
		-1	0	+1
X ₁	Частота вращения дробильного барабана, n_D мин ⁻¹	2000	2500	3000
X ₂	Толщина молотка, h_M м;	0,002	0,003	0,004
X ₃	Диаметр барабана, D_6 м;	0,6	0,65	0,7

На модуль помола пророщенного зерна в ножевом барабане влияют факторы, которые записаны в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Факторы, влияющие на модуль помола, в ножевом барабане

Обозначение	Наименование фактора	Уровни варьирования факторов		
		-1	0	+1
X ₁	Угол заточки лезвия ножа, γ_H град	10	20	30
X ₂	Расстояние между ножами, a мм	7	14	21
X ₃	Частота вращения ножевого барабана, n_H мин ⁻¹	2000	2500	3000

Представленные в таблицах факторы соответствуют следующим условиям:

1. все факторы управляемые, поэтому при проведении опытов можно менять их значение;
2. факторы независимые, поэтому с учетом матрицы планирования можно менять значение каждого фактора, не зависимо от остальных;
3. представленные факторы воздействуют на критерий оптимизации.

3.3 Методика исследования гранулометрического состава кормов

Пророщенное измельченное зерно представляет собой сыпучую массу, поэтому принято оценивать классы фракций по их средним геометрическим размерам и процентное содержание каждой фракции средних геометрических размеров от общей массы продукта.

Средние размеры измельченного пророщенного зерна определяли при помощи ситового отсева. [23, 114].

Расчёт средневзвешенного диаметра частиц выполняют по формуле:

$$d = (d_1p_1 + d_2p_2 + \dots + d_np_n)/100, \quad (3.2)$$

где d_l – средний размер отверстий сита, мкм;

p_n – измельчённая масса на сите.

Измельченный корм для разных групп животных и птицы должен иметь различные размеры. Поэтому измельчитель имеет возможность менять модуль помола в установленных пределах. Чтобы получить различный размер частиц в дробилках используют сменные решета с необходимым диаметром отверстий.

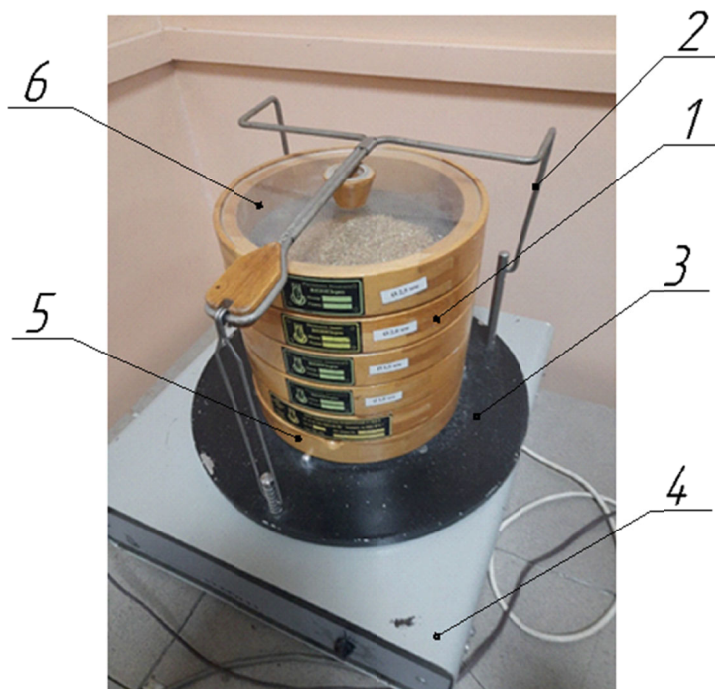
Модуль помола определяет только геометрический размер измельченного зерна и не может дать объективной оценки работы дробилки. Поэтому, чтобы иметь полное представление о работе измельчителя, применяют и другие критерии оптимизации. Изучая на расसेве фракции измельченного зернового корма нужно обратить внимание на содержание наиболее мелких и наиболее крупных фракций. Стремясь наиболее полно измельчить зерно, часто получают переизмельченный продукт. Это происходит оттого, что отвод дробленной массы из камеры измельчения происходит не своевременно. Используя решета с большой наработкой высока вероятность прохода через отверстия недоизмельченного зерна.

Определение крупности измельченных частиц пророщенного зерна

Представленной дробилкой выполняли измельчение пророщенного зерна. После чего выполняли анализ полученной массы. [139 - 142]. Из всей измельченной массы пророщенного зерна брали отдельные навески и помещали их в лабораторный рассев У1-ЕРЛ, который изображен на рисунке 3.2. Рассев представляет собой вибратор, на платформе которого устанавливали закрытое основание, а сверху на нем решета с различными диаметрами отверстий снизу вверх 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 мм. Чтобы исключить при работе потери зерна, верхнее решето накрыли крышкой. С целью исключения падения решет в процессе работы рассева, их фиксировали при помощи замка. Работа рассева заключалась в том, что предварительно взвешенную порцию пророщенного зерна помещали на верхнее решето рассева. Затем закрывали крышку и включали рассев на десять минут. После просеивания полученную измельченную массу снимали с каждого

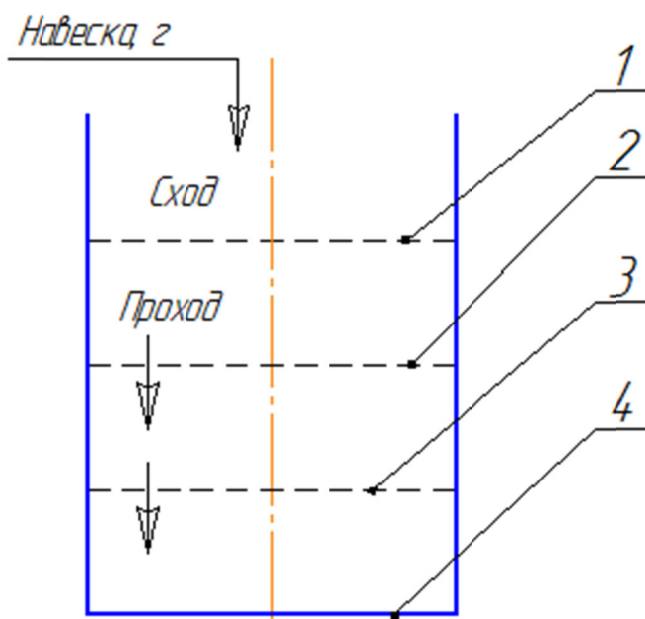
решета, затем определяли её массу с точностью до 0,01 г. После определения массы измельченного зерна каждой фракции и, зная начальную массу навески, определяли процентное содержание каждой отдельной фракции.

Схема работы отсева изображена на рисунке 3.3.



1 - решето; 2 - замок; 3 – платформа подвижная; 4 – корпус отсева;
5 - тарелка; 6 – крышка.

Рисунок 3.2 - Ресев У1-ЕРЛ



1, 2, 3 - решето; 4 - тарелка.

Рисунок 3.3 - Схема работы отсева

На рисунке 3.4 изображены решета, которые используют для работы отсева.



Рисунок 3.4 – Комплект решет отсева

На рисунке 3.5 представлены решета, установленные на отсеивающей машине.

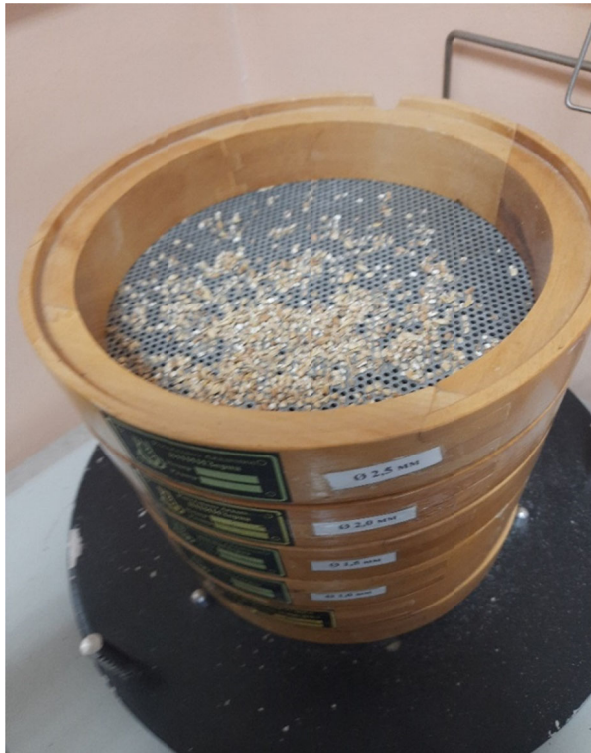


Рисунок 3.5 – Решета, установленные на отсеивающей машине

3.4 Методика исследования однородности измельченного пророщенного зерна

При измельчении кормов имеющих неоднородную структуру, полученный размер частиц отличается от номинального значения, как в большую, так и в меньшую сторону. При переизмельчении продукта получим перерасход энергии и отходы измельчаемого продукта. После выделения на расसेве отдельных фракции продукта и их последующего взвешивания применим формулу (3.3), чтобы определить однородность всей измельченной массы.

Рассчитаем однородность фракционного состава полученной измельченной массы u_{Π} , % с использованием методик [136 - 137].

Рассчитаем по выражению коэффициент вариации:

$$v = \frac{\sigma}{\bar{X}} 100 \% , \quad (3.3)$$

где σ - среднее квадратическое отклонение;

\bar{X} – средняя величина.

Среднее квадратическое отклонение определим по выражению:

$$\sigma_G = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (G_i - G_{CP})^2}{n-1}} , \quad (3.4)$$

где G_i - величина пробы i -го измерения, мм;

G_{CP} - средняя величина пробы, мм;

n - число измерений.

3.5 Методика исследования плотности пророщенного измельченного зерна

Определение плотности измельчённого пророщенного зерна осуществляли с помощью весов, представленных на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Определение насыпной плотности измельчённой массы

Плотность измельчённого пророщенного зерна определяли так. В цилиндр помещали массу, измельченную, предлагаемой дробилкой. Выполняли подпрессовку и затем дополняли ёмкость до полного заполнения. После чего с помощью весов осуществляли взвешивание одного литра измельчённой массы и определяли плотность.

Для расчета плотности пророщенного зерна можем воспользоваться формулой:

$$\rho = m/V, \quad (3.5)$$

где m - масса пророщенного зерна, кг;

V - объем, занимаемый пророщенным зерном, м³.

На рисунке 3.7 представлены весы лабораторные.



Рисунок 3.7 - Весы лабораторные

3.6 Методика определения влажности пророщенного высушенного измельченного зерна

Измерение влажности измельченного зерна осуществляли следующим образом. Брали пробы пророщенного высушенного зерна, затем брали пробы пророщенного высушенного измельченного зерна и помещали его в измерительный цилиндр влагомера. Помещенный объем пророщенного зерна составлял двадцать пять процентов от общего объема измерительного цилиндра влагомера.

Влагомер Wile 65 представлен на рисунке 3.8. Влагомер Wile 65 с чашей наполненной пророщенным измельченным зерном представлен на рисунке 3.9.

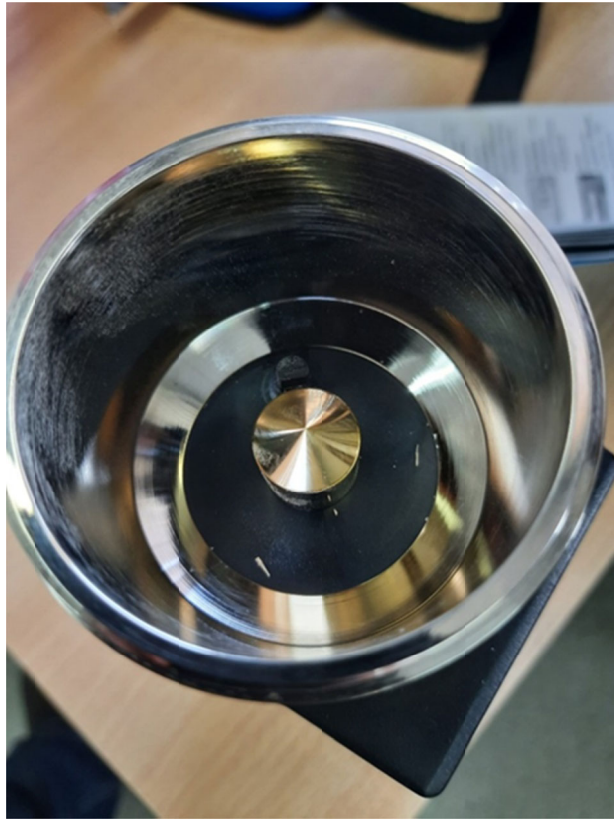


Рисунок 3.8 – Влагомер Wile 65



Рисунок 3.9 - Влагомер

Чтобы зерно плотнее прилегло к центральному электроду несколько раз встряхнули чашу. После чего наполнили чашу зерном до краёв. После этого чашу с зерном накрыли крышкой, которую закрутили по резьбе. Затем, в меню последовательно выбирали значение пшеницы, затем ячменя и включали прибор. Через несколько секунд на экране отображалось значение влажности зерна.

3.7 Методика определения энергетических показателей дробилки при измельчении пророщенного зерна

Энергоёмкость процесса измельчения пророщенного зерна определяли следующим образом. Отключали питание от электродвигателя, снимали крышку. Затем включали магнитный пускатель и запускали электродвигатель. После того как электродвигатель работал несколько минут токоизмерительными клещами измеряли ток в одной фазе и по формуле рассчитывали ток в трёх фазах. Затем с помощью токоизмерительных клещей измеряли напряжение в цепи.

На рисунке 3.10 представлены токоизмерительные клещи, при помощи которых определяли напряжение в сети и силу тока.

Потребляемую из сети активную мощность электродвигателей для привода ножевого и молоткового барабанов определяли по формуле:

$$P_c = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I \cdot \cos\varphi, \quad (3.6)$$

где $U_{л}$ – линейное напряжение, В;

I – сила тока (измеряли амперметром), А;

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности электродвигателя.



Рисунок 3.10 - Токоизмерительные клещи

Чтобы определить энергоёмкость процесса измельчения по Мельникову [23] необходимо брать во внимание степень измельчения материала:

$$\mathcal{E}_H = \frac{N_{\text{ИЗМ}}}{Q\lambda}, \quad (3.7)$$

где $N_{\text{ИЗМ}}$ - суммарная мощность, затрачиваемая на измельчение, кВт;

Q - производительность дробилки пророщенного зерна, т/ч;

λ - степень измельчения пророщенного зерна.

Суммарную мощность, затрачиваемую на измельчение, определим по выражению:

$$N_{\text{ИЗМ}} = P_{\text{С ННН}} + P_{\text{С МНН}}, \quad (3.8)$$

где $P_{\text{С ННН}}$ - потребляемая из сети активная мощность электродвигателя, при рабочей нагрузке ножевого барабана, кВт;

$P_{\text{С МНН}}$ - потребляемая из сети активная мощность электродвигателя, при рабочей нагрузке молоткового барабана, кВт.

Энергоемкость процесс следует оценивать с учетом доли измельчаемого зерна и ростков в исходном продукте, которые составляют 0,1 – для ростков и 0,9 для зерновки.

В этом случае производительность по измельчению ростков будет составлять

$$Q_1 = 0,1 \cdot Q, \quad (3.9)$$

Производительность по измельчению зерновки

$$Q_2 = 0,9 \cdot Q, \quad (3.10)$$

Энергоемкость процесса при максимальной степени измельчения ростков

$$\mathcal{E}_{Н1} = \frac{P_{С ННН} + P_{С МНН}}{Q_1 \cdot \lambda_1}, \quad (3.11)$$

Энергоемкость процесса при максимальной степени измельчения зерна

$$\mathcal{E}_{Н2} = \frac{P_{С ННН} + P_{С МНН}}{Q_2 \cdot \lambda_2}, \quad (3.12)$$

Общая энергоемкость на измельчение единицы массы исходного продукта составит

$$\mathcal{E}_Н = \mathcal{E}_{Н1} + \mathcal{E}_{Н2}, \quad (3.13)$$

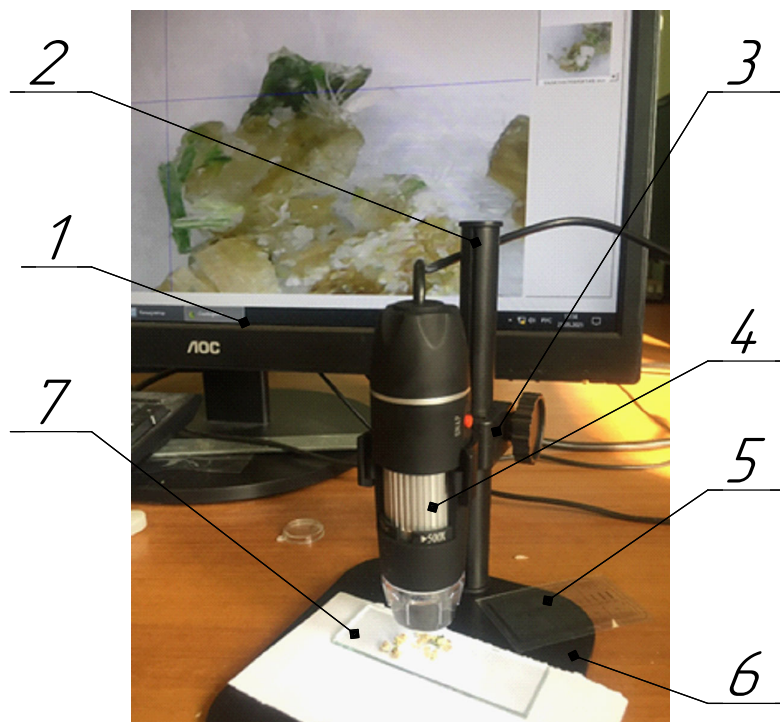
3.8 Методика оценки производительности дробилки пророщенного зерна

Чтобы оценить производительность работы дробилки необходимо выполнить следующие действия. У неработающей дробилки оценить внешнее её состояние, вручную прокрутить дробильный и ножевой барабаны, убедиться в том, что они вращаются равномерно без заедания. Убедиться в натяжении приводных ремней, убедиться, что дозирующая заслонка закрыта. Включить дробильный барабан дробилки, через две-три минуты включить ножевой барабан дробилки. Затем дать возможность дробилке поработать в течение 15 - 20 минут без загруженного в неё материала. После этого в бункер загрузить измельчаемый материал, открывать дозирующую заслонку и таким образом выполнять подачу материала в дробильную камеру. Чтобы не допустить перегрузки

электродвигателей, необходимо следить за силой тока по показаниям амперметра. Измельчение выполнять в течение одного часа. После этого остановить дробилку и взвесить измельченный материал. Данную оценку производительности провести в трехкратной повторности. Значение производительности считать, как среднее арифметическое от трех измеренных повторностей.

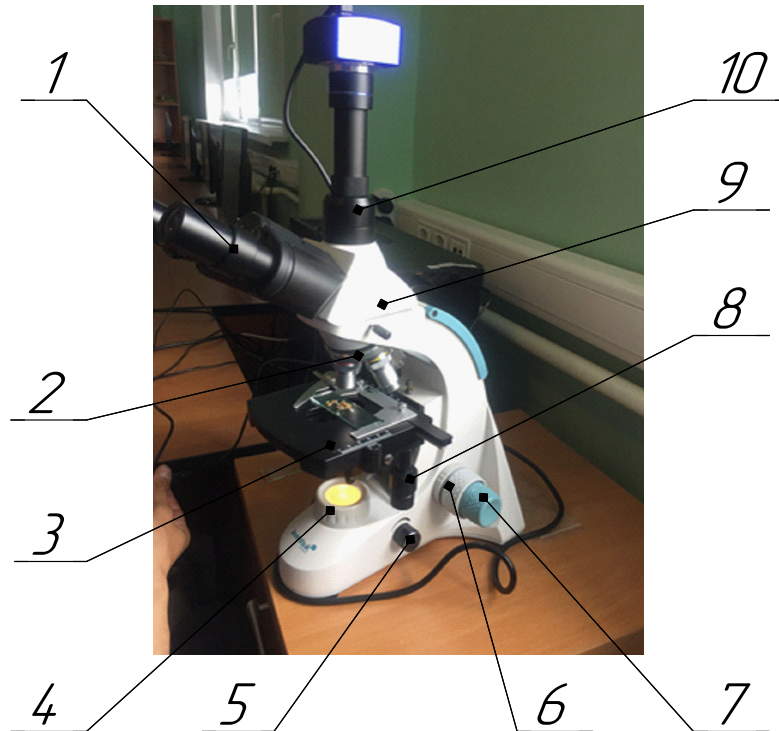
3.9 Методика оценки структуры пророщенного измельченного зерна

После процесса измельчения необходимо оценить состав пророщенного зерна, его размеры, края частиц (зерновок и ростков). Для этого нужно использовать микроскопы. Для определения размеров необходимо использовать микроскоп с сеткой, представленный на рисунке 3.11. Для определения состава пророщенного зерна и качества среза измельченных краев необходимо использовать микроскоп Levenhuk 950T DARK Series Microscopes, представленный на рисунке 3.12.



1 – монитор; 2 – стойка; 3 – регулятор высоты; 4 - ручка тонкой фокусировки;
5 – сетка; 6 – подставка; 7 – стекло предметное.

Рисунок 3.11 – Микроскоп Digital Microscope



1 – окуляр; 2 – устройство револьверное; 3 – столик предметный; 4 – лампа; 5 – регулятор яркости подсветки; 6 – ручка грубой фокусировки; 7 - ручка тонкой фокусировки; 8 – перемещение столика по горизонтали; 9 – насадка окулярная; 10 – третья окулярная трубка.

Рисунок 3.12 - Levenhuk 950T DARK Series Microscopes

Нами были отобраны образцы пророщенного зерна и пророщенного измельченного зерна. Образцы поочередно помещали на предметное стекло под микроскоп, затем делали снимки. После этого анализировали полученные снимки.

3.10 Статистическая оценка результатов эксперимента и определение значимости коэффициентов уравнения регрессии

После проведения каждого эксперимента, согласно матрице, представленной в таблице 3.2, записываем полученные результаты y .

Математическую обработку полученных результатов осуществляем следующим образом [135 - 138].

Среднеарифметическое из m повторностей определяем по выражению

$$Y = \frac{\sum_{n=1}^m Y_n}{m}, \quad (3.14)$$

Квадраты отклонений определяем по формулам: $(Y_1 - Y_{CP})^2$, $(Y_2 - Y_{CP})^2$, $(Y_3 - Y_{CP})^2$.

Сумму квадратов отклонений по каждой строчке плана определяем по выражению:

$$\sum_{l=1}^m (Y_{ln} - Y_{CPn})^2 = \sum_{l=1}^m \Delta Y^2, \quad (3.15)$$

где l – номер повторности опыта,

n – номер строки.

Построчную дисперсию S_n^2 определяем по формуле

$$S_n^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{l=1}^m Y_{l=1} Y_{ln} - Y_{CP.n.}, \quad (3.16)$$

Сумму построчных дисперсий определим по выражению:

$$\sum_{n=1}^N S_n^2, \quad (3.17)$$

Определяется расчетное значение критерия Кохрена

$$G_{max} = \frac{S_{n.max.}^2}{\sum_{n=1}^N S_n^2}, \quad (3.18)$$

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

$$G_{max расч} \leq G_{max табл}, \quad (3.19)$$

Чтобы определить табличные значения критерия Кохрена заранее рассчитаем число степеней свободы $\gamma_1 = m - 1$, а $\gamma_2 = N$.

После того, как определили коэффициенты уравнения регрессии необходимо определить их значимость.

Для этого выполним расчет генеральной дисперсии:

$$S^2 = \frac{\sum_{n=1}^N S_n^2}{N}, \quad (3.20)$$

Дисперсия определения коэффициентов регрессии может быть определена по выражению:

$$S_A^2 = \frac{S^2}{N \cdot m}, \quad (3.21)$$

Коэффициент регрессии A значим в том случае, если

$$A > S_A \cdot t, \quad (3.22)$$

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

Таким образом, значимы только те коэффициенты регрессии, которые по абсолютной величине удовлетворяют условию (3.22).

Дисперсию неадекватности рассчитаем по выражению:

$$\sigma_{\text{неод}}^2 = \frac{m}{N-C} \sum_{n=1}^N (y_{CP} - y_n)^2, \quad (3.23)$$

где C – количество значимых коэффициентов регрессии;

Для построения математических моделей процесса измельчения был использован известный статистический пакет программ Microsoft Excel.

Результаты экспериментов обрабатывали при помощи компьютерных программ Microsoft Excel и Statistica. Графическую интерпретацию поверхностей отклика выполняли при помощи программы Statistica.

Проверим адекватность полученной модели факторов. Остаточная сумма квадратов (SS_R) при проведении повторяющихся опытов может быть разложена на суммы [135 - 138]. Сумму квадратов, определяющую неадекватность (SS_{LF}) результатов эксперимента, и сумму квадратов, связанную с дисперсией, характеризующей ошибку опытов (SS_Y), т. е.

$$SS_R = SS_{LF} + SS_Y. \quad (3.24)$$

Для проверки адекватности вычисляется F-критерий Фишера:

$$F = \frac{S_{LF}^2}{S_Y^2} = \frac{SS_{LF}}{f_{LF}} : \frac{SS_Y}{f_Y} \quad (3.25)$$

где f_{LF} и f_Y – соответственно числа степеней свободы, отвечающие сумме SS_{LF} и SS_Y .

Определяем число степеней свободы числителя:

$$f_1 = N - k_1 - 1, \quad (3.26)$$

где k_1 – число линейных членов уравнения регрессии.

Определяем число степеней свободы знаменателя:

$$f_2 = N(m - 1) \quad (3.27)$$

где m – число повторностей одного опыта.

$$S^2_{LF} = \frac{m \sum_{u=1}^N (\bar{y} - y_u)^2}{N - (k + 1)}, \quad (3.28)$$

$$S^2_y = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^m (y_{iu} - \bar{y})^2}{N(m - 1)}, \quad (3.29)$$

y_{iu} - значения критерия оптимизации в опыте.

По формуле (3.25) проверяем адекватность вычислений.

Выбираем табличное значение критерия F – Фишера согласно числу степеней свободы числителя и знаменателя (3.26) и (3.27) и сравниваем с полученным нами значением [134, 135, 136].

$$F_{\text{табл}} > F_{\text{факт}} \quad (3.30)$$

Значимость различия $b_0 - \bar{y}_0$ проверяем по критерию Стьюдента:

$$t_{\text{расч}} = \frac{(b_0 - \bar{y}_0) \cdot \sqrt{N}}{\sqrt{S^2_y}}, \quad (3.31)$$

где \bar{y}_0 – среднее значение критерия оптимизации по опытам в центре эксперимента.

На основании полученных значений приходим к заключению, что для описания результатов эксперимента модель может быть принята.

3.11 Общее устройство и принцип работы предложенной дробилки пророщенного высушенного зерна

Рассмотрев различные конструкции дробилок можно отметить, что для измельчения неоднородных материалов, одним из которых является пророщенное зерно нужно использовать различные виды рабочих органов, такие как молотки и ножи [15, 16, 17, 23, 71, 72, 99].

Существующие конструкции молотковых дробилок имеют такие недостатки как один тип рабочих органов, две дробильные камеры, расположенные на некотором расстоянии друг от друга. Возникает необходимость транспортировать

измельчаемый материал от одной камеры измельчения к другой, а это сопровождается дополнительными затратами энергии [71, 72].

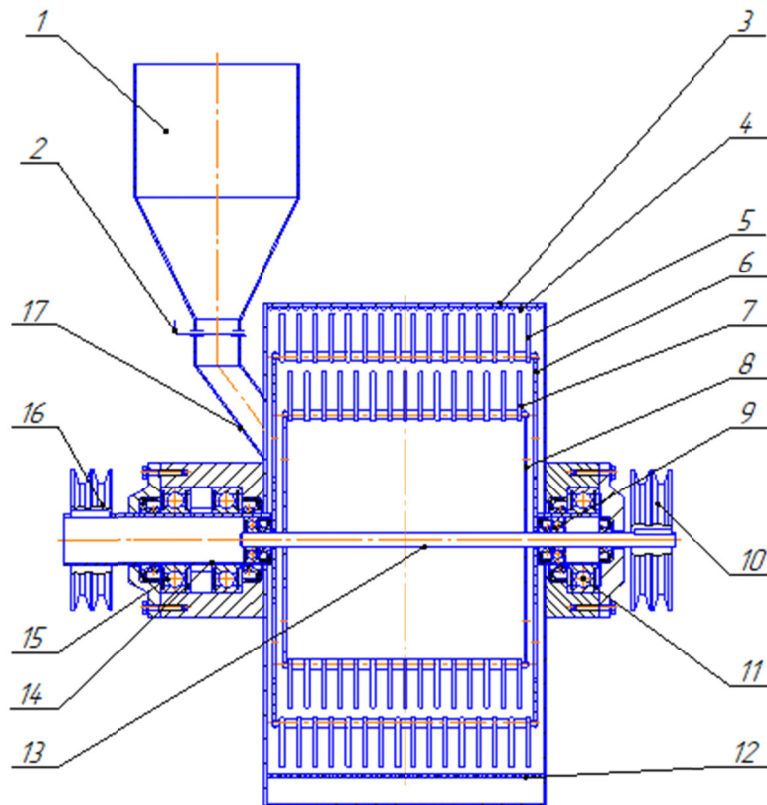
Задача предлагаемой дробилки – повышение однородности измельченной массы пророщенного зерна, в том числе зерновки и ростков за счёт работы молотков, расположенных на внешнем барабане и ножей, расположенных на внутреннем барабане. Исключение дополнительного транспортирования измельчаемого материала между измельчаемыми барабанами. Снижение энергоёмкости процесса измельчения за счёт размещения дробильных барабанов в одной камере на одной оси.

Дробилка состоит из отдельных сборочных единиц: бункер, ниже которого установлена дозирующая заслонка [100, 101]. Бункер соединен с дробильной камерой при помощи подающей трубы, которая установлена с боковой стороны относительно дробильной камеры. Дробильная камера установлена на раме. Внутри дробильной камеры установлены два барабана, причем барабаны имеют одну общую ось вращения. На внешнем барабане шарнирно установлены молотки, а на внутреннем барабане шарнирно установлены ножи. Между молотками на пальцах установлены распорные втулки. Внутри дробильной камеры неподвижно установлены дека и решето.

С боковой стороны на торцах комбинированной дробильной камеры 3 (рисунок 3.13) установлены длинный корпус с внешними подшипниками и короткий корпус с внешним подшипником. От посторонних частиц внешний подшипник закрыт манжетами. Внутри полого вала установлен внутренний подшипник, закрытый манжетой.

В коротком корпусе внутреннее кольцо внешнего подшипника надето на короткий полый вал. Внутри короткого полого вала установлен внутренний подшипник, который защищён от посторонних частиц манжетами.

Внутреннее кольцо внутреннего подшипника надето на вал. На валу закреплён второй ведомый шкив. Короткий полый вал закреплён к барабану с ножами.



- 1 – Бункер загрузочный; 2 – заслонка дозирующая; 3 – камера дробильная комбинированная;
 4 – дека; 5 – молоток; 6 - внешний дробильный барабан; 7 – нож; 8 – ножевой барабан;
 9 – внутренний подшипник; 10 – шкив; 11 – внешний подшипник; 12 – решето;
 13 – вал внутренний; 14 – вал внешний; 15 – подшипник внешний;
 16 – шкив; 17 - труба подающая.

Рисунок 3.13 – Комбинированная дробильная камера

Работа дробилки пророщенного зерна происходит так. При помощи магнитного пускателя включаем один дробильный барабан с молотками. После того как дробильный барабан вышел на рабочую частоту вращения аналогично запускаем второй привод для ножевого барабана. После того как ножевой барабан набрал рабочую частоту вращения в загрузочный бункер загружаем пророщенное зерно. С помощью дозирующей заслонки подаем пророщенное зерно через магнитный сепаратор в дробильную камеру. Подачу пророщенного зерна осуществляем из бункера, с помощью подающей трубы, в центр комбинированной дробильной камеры.

Пророщенное зерно представляет собой соединенные зерновку и росток, которые сразу после взаимодействия с рабочими органами отделяются одно от

другого. Вращающиеся барабаны направляют воздушный поток от центра к периферии комбинированной дробильной камеры. Зерновки и ростки будут двигаться от центра к периферии комбинированной дробильной камеры и, последовательно, взаимодействовать с двумя типами рабочих органов, вначале с ножами, затем с молотками. Пророщенное зерно попадает внутрь, сразу подхватывается рабочими органами и массе сообщается центробежная сила. За счет различных физико-механических свойств более плотные зерновки оказываются дальше от центра, а менее плотные ростки будут находиться ближе к центру. Поэтому зерновки будут взаимодействовать с молотками, установленными на внешнем барабане, а ростки будут взаимодействовать с ножами, установленными на внутреннем барабане. Масса зерновок будет взаимодействовать с молотками до тех пор, пока не станут меньше диаметра отверстий решета. Затем масса будет проходить через отверстия решета и удаляться из дробильной камеры. Затем место зерновок будут занимать измельченные ростки, которые под действием центробежных сил будут проходить через отверстия решета.

Предложенная дробилка позволяет повысить однородность измельчаемой массы пророщенного зерна, а именно зерновок и ростков за счёт использования двух типов рабочих органов: молотков и ножей, предназначенных для измельчения зерновки и ростка. Причем молотки установлены на внешнем барабане, а ножи установлены на внутреннем барабане.

Снижение энергоёмкости процесса измельчения за счёт размещения дробильных барабанов на одной оси.

Чтобы выполнить измельчение пророщенного зерна нами была сконструирована экспериментальная дробилка [100].

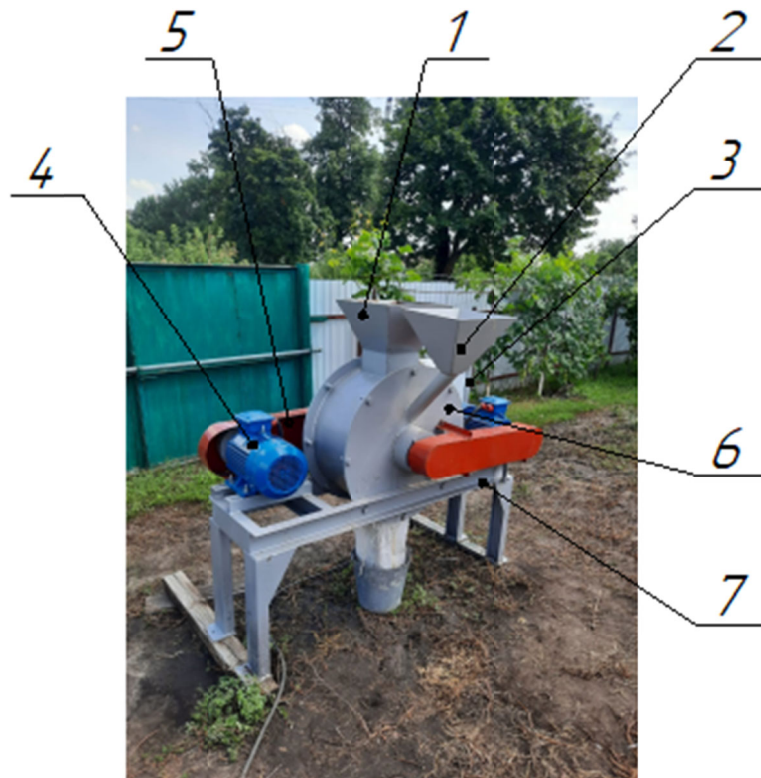
На рисунке 3.15 изображена дробильная камера экспериментальной дробилки пророщенного зерна.



1 – бункер загрузочный центральный; 2 – корпус камеры дробильной; 3 – дека;
4 – окно выгрузное.

Рисунок 3.15 - Дробильная камера экспериментальной дробильной установки для пророщенного зерна

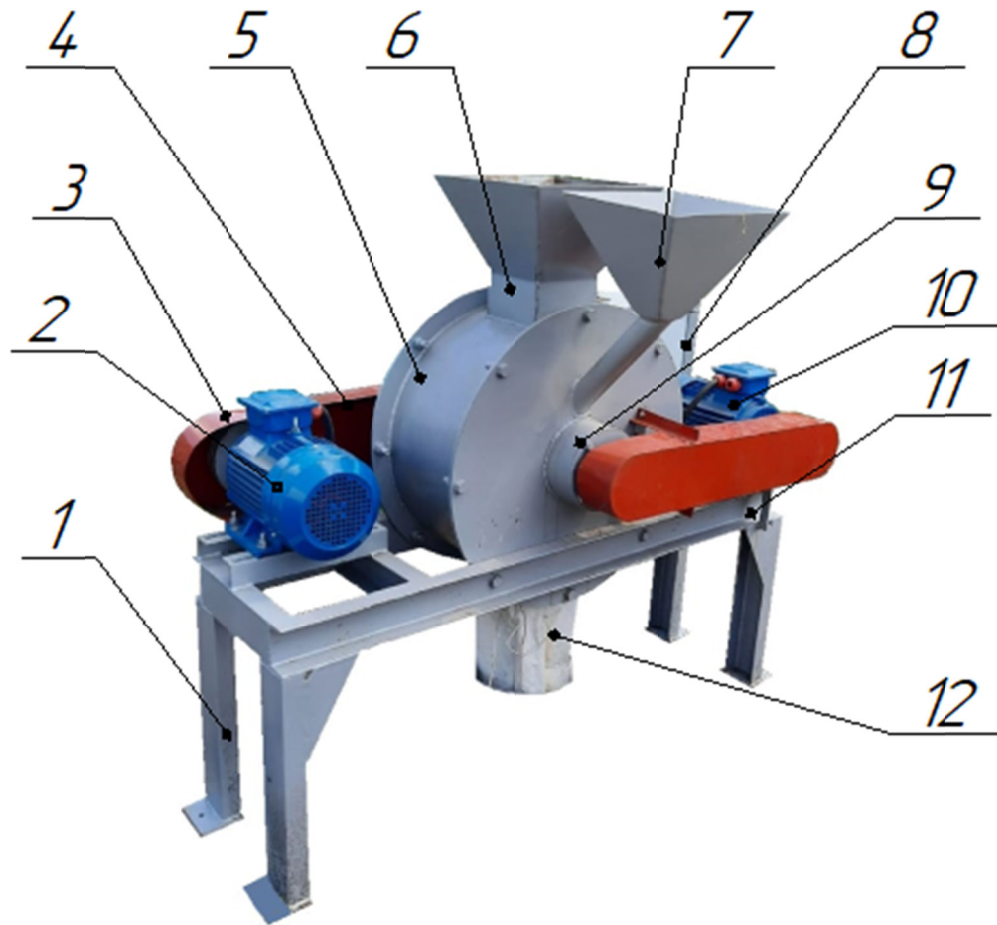
На рисунке 3.16 представлена дробилка пророщенного зерна.



1 – Бункер центральный; 2 – бункер боковой; 3 – шкаф управления; 4 – электродвигатель;
5 – кожух защитный; 6 – камера дробильная; 7 – рама.

Рисунок 3.16 - Дробилка пророщенного зерна

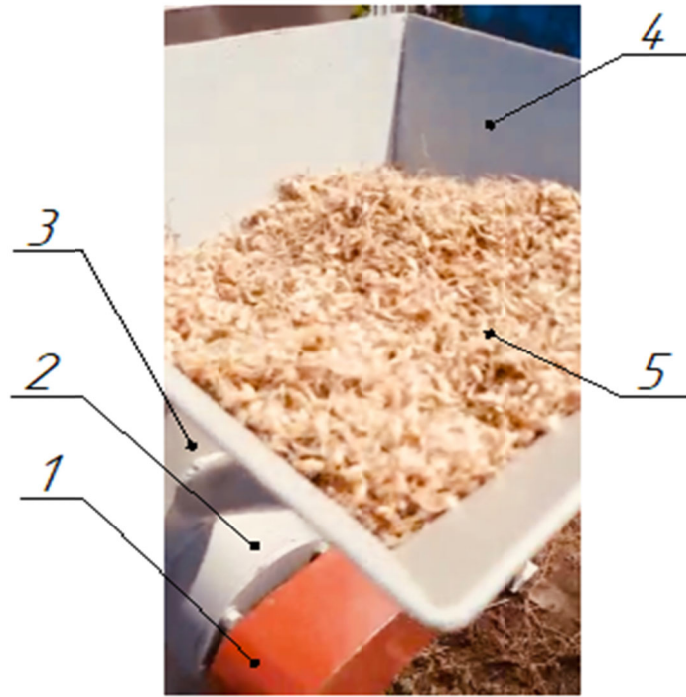
Экспериментальная дробилка пророщенного зерна изображена на рисунке 3.17.



- 1 – опора; 2 – электродвигатель для привода внешнего барабана; 3 – кожух защитный;
 4 – передача ременная; 5 – камера дробильная; 6 – бункер центральный;
 7 – бункер боковой; 8 – шкаф управления; 9 – узел подшипниковый;
 10 – электродвигатель для привода внутреннего барабана; 11 – рама;
 12 – рукав выгрузной.

Рисунок 3.17 - Экспериментальная дробилка пророщенного зерна

На рисунке 3.18 представлена дробилка с загруженным пророщенным зерном.

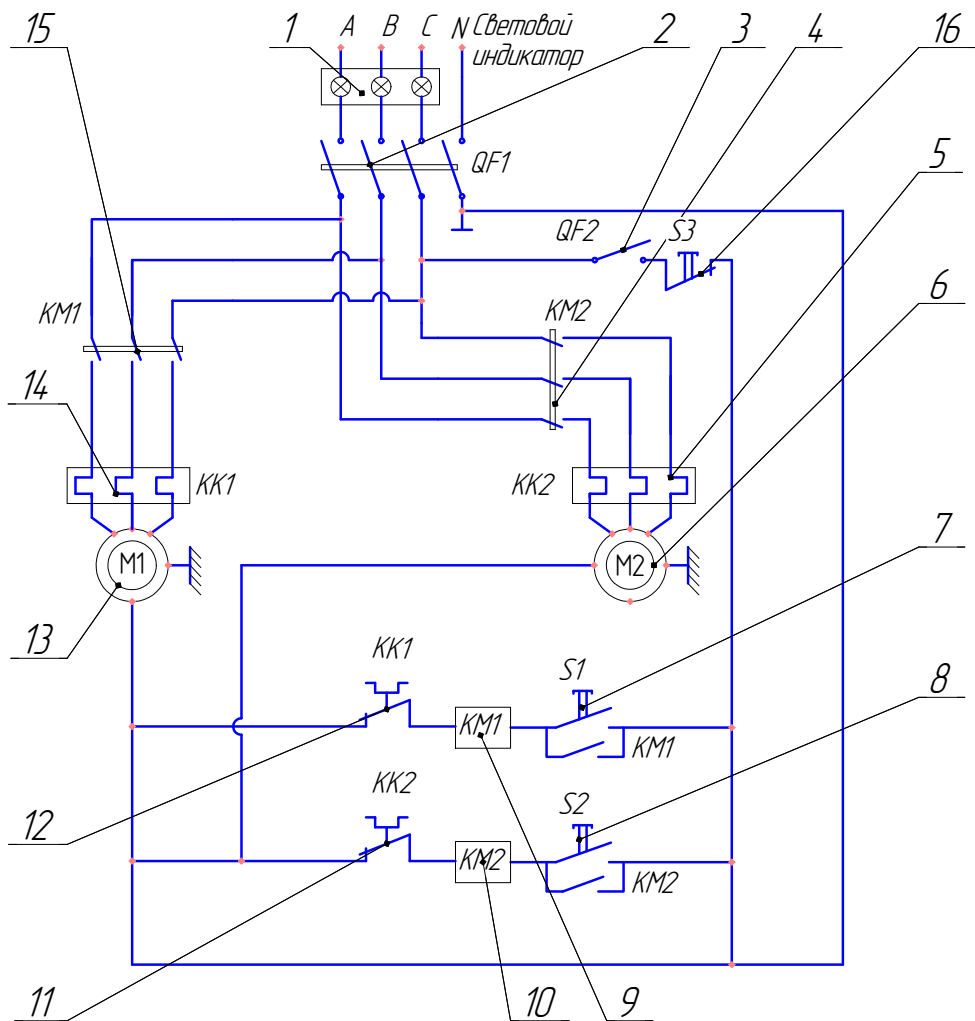


1 – Кожух защитный; 2 – корпус подшипника; 3 – камера дробильная; 4 – бункер боковой; 5 – зерно пророщенное.

Рисунок 3.18 – Дробилка с пророщенным зерном

Чтобы осуществлять управление технологическим процессом дробилки применили электрическую схему, которая представлена на рисунке 3.19.

Работа электрической схемы проходит следующим образом. Питание трехфазной электрической цепи током можем установить визуально с помощью светового индикатора 1. Когда контакты выключателя 2 замыкаются происходит подача электрической энергии на контакторы. Цепь управления включаются при помощи выключателя 3. В результате ток поступает к кнопкам включения 7, 8, для запуска электродвигателей 13 и 6. При включении кнопки 7 электрический ток подают на катушку 9, замыкают контакты контактора 15 и таким образом подают напряжение на электродвигатель 13, который осуществляет вращение барабана с установленными молотками по направлению вращения часовой стрелки.



1 - световой индикатор; 2, 3 - пакетный выключатель; 4, 15 – контактор;
 5, 14 – тепловое реле; 6, 13 – электродвигатель; 7, 8 – контакты; 9, 10 – катушка;
 11, 12 – контакты; 16 - контакты.

Рисунок 3.19 - Схема управления дробилкой пророщенного зерна

С интервалом 2, 3 минуты включают кнопку 8 и таким образом подают ток на катушку 10, осуществляют замыкание контактора 4 и подают напряжение для запуска электродвигателя 6, который приводит во вращение ножевой барабан по направлению вращения часовой стрелки. Чтобы исключить высокое значение пусковых токов в электрической сети электродвигателя необходимо включать последовательно, сначала один, а через 2, 3 минуты другой. Через 2, 3 минуты после включения второго электродвигателя, когда будет обеспечена его устойчивая работа, можно при помощи дозирующей заслонки подавать измельчаемый материал в комбинированную дробильную камеру.

После измельчения массы получили продукт, который можно было исследовать согласно настоящей методике.

На рисунке 3.20 представлено зерно, измельченное с использованием молотков.

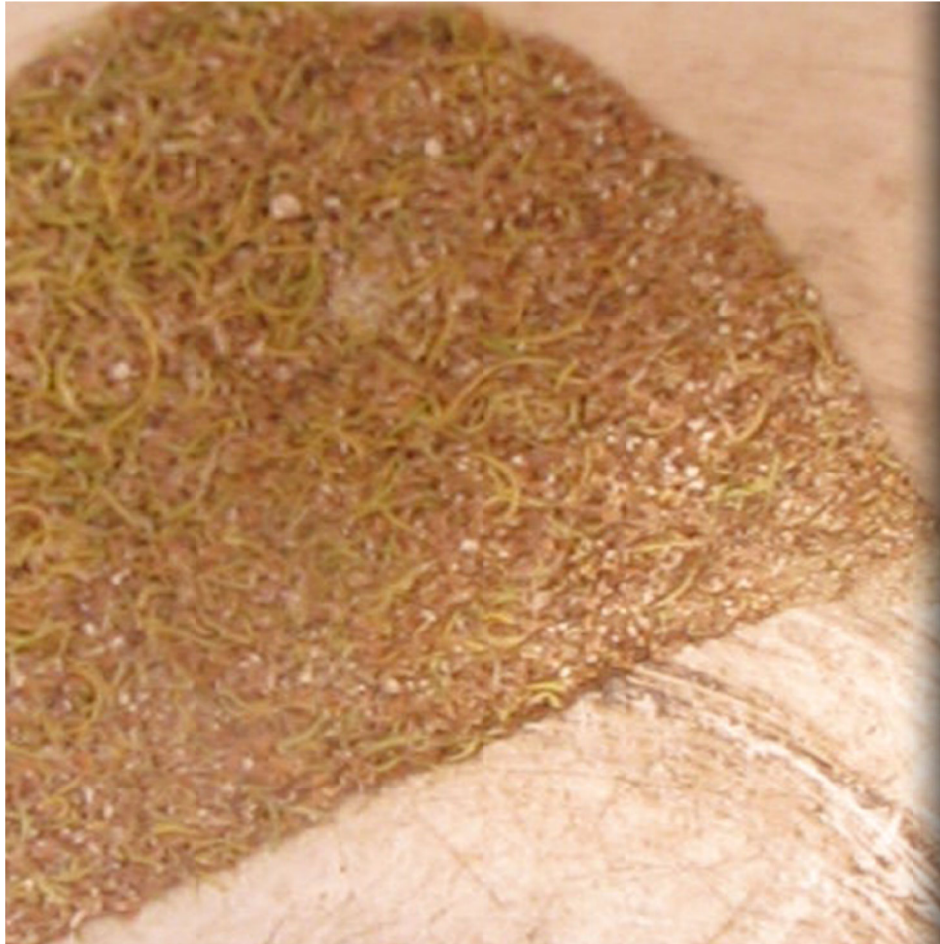


Рисунок 3.20 – Пророщенное зерно, измельченное молотками

Из рисунка можем отметить, что после обработки молотками измельчаются только зерновки, а ростки остаются практически не тронутыми. Поэтому получить хорошо перемешанную кормовую смесь с использованием такого пророщенного зерна не получится.

Представлен процесс движения измельченного пророщенного зерна из дробильной камеры в накопительную емкость (рисунок 3.21). В дробильной камере работают молотки и ножи.



Рисунок 3.21 – Процесс движения измельченного пророщенного зерна из дробильной камеры в накопительную емкость

Пророщенное измельченное зерно, которое получено с применением молотков и ножей приведено на рисунке 3.22.



Рисунок 3.22 – Пророщенное измельченное зерно, которое получено с использованием молотков и ножей

Из рисунка можем отметить, что выполняя измельчение пророщенного зерна в комбинированной дробильной камере двумя типами рабочих органов, а именно молотками и ножами можем измельчать зерновки и ростки, получая близкие конечные размеры 1 - 1,4 мм.

Выводы

В разделе представлено общее устройство и принцип работы дробилки пророщенного зерна, выявлены факторы, которые оказывают влияние на качество измельчения пророщенного зерна. Представлены уровни варьирования влияющих факторов. Приведены методики проведения экспериментов с целью определения качественных и количественных характеристик продукта и дробилки.

Разработаны методики оценки: гранулометрического состава измельченного пророщенного зерна; плотности пророщенного измельченного зерна; влажности пророщенного высушенного измельченного зерна; энергетических показателей дробилки при измельчении пророщенного зерна; методика оценки производительности дробилки пророщенного зерна; методика оценки структуры пророщенного измельченного зерна.

Установлено, что наиболее значимыми факторами, влияющими на модуль помола пророщенного зерна при измельчении молотками в дробильном барабане, являются: n_D – частота вращения дробильного барабана, мин^{-1} ; h_M - толщина молотка, м; D_B - диаметр барабана, м.

Установлено, что наиболее значимыми факторами, влияющими на модуль помола пророщенного зерна при измельчении ножами в ножевом барабане, являются: n_H – частота вращения ножевого барабана, мин^{-1} ; b_H - расстояние между ножами, мм; γ_H - угол заточки лезвия ножа, град.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ИССЛЕДОВАНИЙ

В главе отражены результаты экспериментальных исследований дробилки пророщенного зерна.

4.1 Результаты экспериментальных исследований энергоемкости процесса измельчения пророщенного зерна

Измерение параметров определяющих энергоемкость процесса измельчения проводилось в соответствии с методикой изложенной в п. 3.7.

Измерение силы тока при помощи токоизмерительных клещей представлено на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Измерение силы тока

Величина силы тока в одной фазе, трехфазной сети на электродвигателе, который приводит в работу ножевой барабан без нагрузки по результатам измерений составляла 4,9 А. Линейное напряжения в сети составляло 380 В. Потребляемую из сети активную мощность вычисляли по формуле (3.5). При $\cos\varphi = 0,8$ она составила 2,58 кВт.

Величина силы тока в одной фазе, трехфазной сети на электродвигателе, который приводит в работу молотковый барабан без нагрузки по результатам

измерений составляла 5,1 А. Линейное напряжения в сети составляло 380 В. Расчетная потребляемая из сети активная мощность при $\cos\varphi = 0,8$ составила 2,685 кВт.

Сила тока в одной фазе, трехфазной сети на электродвигателе, который приводит в работу ножевой барабан в режиме рабочей нагрузки составляла 7,3 А, расчетная потребляемая из сети активная мощность при линейном напряжении 380 В составила 3,844 кВт. Сила тока в одной фазе, трехфазной сети на электродвигателе, который приводит в работу молотковый барабан составлял 7,5 А, расчетная потребляемая из сети активная мощность при линейном напряжении 380 В и при $\cos\varphi = 0,8$ составила 3,949 кВт.

Общая энергоемкость процесса измельчения пророщенного зерна, в том числе ростков и зерновки, рассчитанная по выражениям (3.11) - (3.13), составила от 6,7 до 8,3 кВт ч/т.

Энергоемкость предложенного измельчителя оценивают с учетом полученной степени измельчения ростков и зерновки пророщенного зерна и процентного содержания ростков и зерновки в общей массе [23].

На рисунке 4.2 приведена рассчитанная по (3.13) зависимость энергоемкости процесса измельчения от степени измельчения.

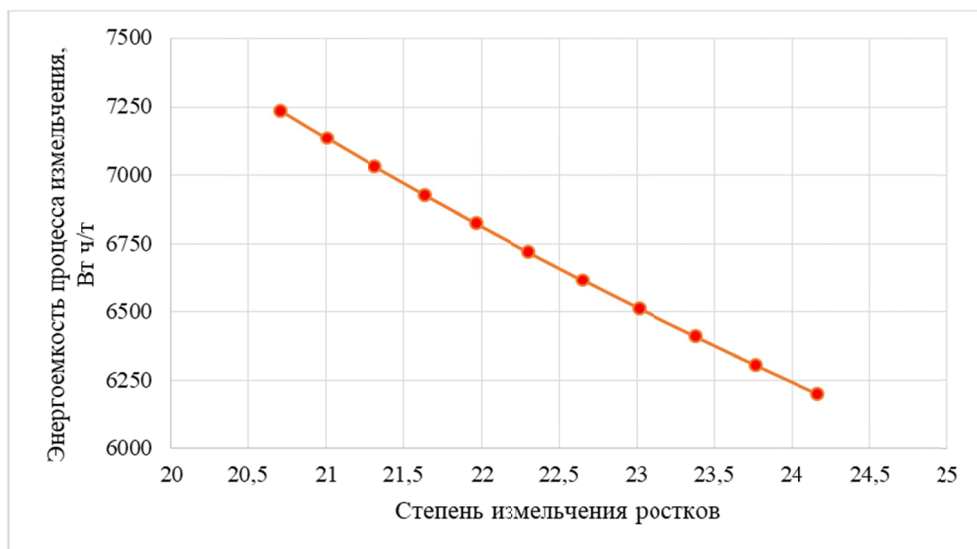


Рисунок 4.2 - Зависимость энергоемкости процесса измельчения от степени измельчения

Согласно приведенной на рисунке 4.2 зависимости энергоемкость процесса измельчения уменьшится с 7,23 до 6,2 кВт ч/т при условии поддержания производительности дробилки 0,52 т/ч и увеличении степени измельчения продукта с 20,71 до 24,17. Это объясняется тем, что процесс измельчения можно представить, как разделение тела на части с получением новых частиц с большей площадью поверхности. Поэтому с увеличением площади образованной поверхности уменьшается энергоемкость процесса измельчения.

4.2 Результаты определения влажности и плотности пророщенного зерна

Измерение влажности пророщенного проводилось в соответствии с методикой изложенной в п. 3.6. До начала процесса измельчения пророщенного зерна, а также в измельченной массе проводили измерение влажности. На рисунке 4.3 представлен влагомер Wile 65 с помещенной массой пророщенного высушенного измельченного зерна.



Рисунок 4.3 - Влагомер Wile 65 с помещенной массой пророщенного высушенного измельченного зерна

Измеренная влажность продукта до и после измельчения составляла 14%. Измельчение пророщенного зерна не влияет на изменение влажности в нем, поэтому массу пророщенного высушенного измельченного зерна можно добавлять в комбикорм и хранить полученную смесь.

Измерение насыпной плотности пророщенного проводилось в соответствии с методикой изложенной в п. 3.5. Полученные результаты измерения плотности пророщенного зерна представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Плотность пророщенного зерна

Наименование продукта	Плотность, кг/м ³
Пророщенный высушенный ячмень	570-590
Пророщенный высушенный, измельченный ячмень	465-485
Пророщенная высушенная пшеница	585-610
Пророщенная высушенная измельченная пшеница	510-535

4.3 Результаты экспериментальных исследований производительности дробилки пророщенного зерна

Экспериментальные исследования по оценке производительности дробилки пророщенного зерна проводилось в соответствии с методикой изложенной в п. 3.8.

Перед включением дробилки, оценили её внешнее состояние, убедились в свободном прокручивании молоткового и ножевого барабанов от усилия руки, закрыли дозирующую заслонку и с интервалом 3 минуты включили электродвигатели для привода молоткового и ножевого барабанов. Без нагрузки дробилка работала 20 минут, после этого загрузили пророщенное зерно в бункер дробилки и открытием дозирующей заслонки подавали в камеру измельчения. Затем после процесса измельчения масса через направляющую попадала в накопительную емкость. Производительность дробилки по результатам эксперимента составила 510 - 525 кг/ч.

4.4 Результаты оценки структуры пророщенного измельченного зерна

Показатели структуры пророщенного зерна проводились по методике изложенной в п. 3.9. На рисунке 4.4 представлена фотография под микроскопом измельченного ростка пророщенного ячменя. На фотографии хорошо заметна целлюлоза.



Рисунок 4.4 – Росток пророщенного ячменя

На следующих фотографиях изображено измельченное пророщенное зерно, которое получено после измельчения в комбинированной дробильной камере.

На рисунке 4.5 представлена фотография под микроскопом измельченного ростка и зерновки ячменя.



Рисунок 4.5 - Измельченный росток и зерновка ячменя

На фотографии виден зародыш зерна, разрезанный ножами, а также края, срезанные ножами, которые расположены на внутреннем валу дробилки. На рисунке 4.6 изображен измельченный росток и зерновка ячменя.



Рисунок 4.6 - Измельченный росток и зерновка ячменя

На рисунке 4.7 представлены частицы пророщенного зерна ячменя, которые измельчены в комбинированной дробильной камере. На рисунке видны оболочки, ростки, зародыш, крахмальные зерна.



Рисунок 4.7 – Измельченные частицы пророщенного зерна ячменя

Размеры частиц пророщенного высушенного измельченного ячменя на измерительной сетке представлены на рисунке 4.8.



Рисунок 4.8 - Пророщенный высушенный измельченный ячмень с сеткой

Отметим, что средние размеры как измельченной зерновки, так и ростка составляют 1,1 - 1,4 мм.

Согласно проведенным исследованиям можно заключить, что пророщенное зерно является неоднородным продуктом, который состоит из зерновки и ростка. Зерновка состоит из следующих составляющих: оболочки, мучнистого тела и зародышевой части.

В состав эндосперма (мучнистого тела) входят клетки крахмала и белка. Крахмал имеет кристаллическое строение. Эндосперм хорошо разрушается при механическом воздействии ударом.

Клетчатки в зародыше немного, а также гемицеллюлоз около 10%. Зародыш обладает высокой эластичностью.

Крахмальные клетки окружают прочные слои. Оболочки выполнены в основном из целлюлозы. Прочность верхних слоев придает ячменю жесткость. Преодолеть сопротивление поверхностных слоев можно, применив механическое воздействие. Росток имеет волокнистое, стеблевидное строение. Известно, что волокнистые стеблевидные материалы измельчаются путем резания [23].

С учетом проведенного структурного анализа пророщенного зерна следует важный технологический вывод: для того, чтобы измельчить такой неоднородный материал как пророщенное зерно необходимо использовать два типа рабочих органов молотки и ножи.

4.5 Результаты экспериментальных исследований процесса измельчения пророщенного зерна

Качественные показатели измельчения пророщенного зерна по крупности частиц проводились в соответствии с методикой, изложенной в п.3.3. При этом продукт измельчался молотками и ножами.

Образцы пророщенного зерна, которые получены с использованием молотков, приведены на рисунках 4.9 и 4.10 [139 - 142].



Рисунок 4.9 - Пророщенное измельченное зерно ячменя



Рисунок 4.10 - Пророщенное измельченное зерно пшеницы

Из представленных выше рисунков укажем, что, осуществляя измельчение пророщенного зерна способом дробления – молотками, в основном, происходит измельчение зерновок, а стебельная часть, т.е. ростки недостаточно

измельчаются. Следует сказать, что при добавлении в комбикорм такой массы длинные ростки размером более 1,5 мм не будут должным образом перераспределяться между частицами корма, размер которых составляет менее полутора миллиметров и не позволят получить однородную массу.

Пророщенное зерно, которое измельчали в предложенной дробилке с помощью молотков и ножей, приведено на рисунке 4.11.



Рисунок 4.11 - Пророщенное измельченное зерно

Применение в одной камере молотков и ножей позволило получить при измельчении материал, который отличается друг от друга физико-механическими свойствами, т.е. зерновку – молотками и стебельную часть – ростки ножами. Средние размеры полученной измельченной массы составляют 1,1 - 1,3 мм при однородности фракции 97,38%. Из этого сделаем вывод, что применение в дробилках для пророщенного зерна два вида рабочих органов (молотки и ножи) позволяет получить высокую степень однородности продукта (до 97,38%) с размерами 1,1 - 1,3 мм [100].

Влияние конструктивных и технологических параметров на модуль помола пророщенного зерна проводилось с применением методики планирования

эксперимента (п. 3.2). Коэффициенты уравнения регрессии рассчитывали при помощи программы «Microsoft Excel» [142, 143].

После проведения экспериментов, согласно плана таблицы 3.3 [144...146], получили ряд результатов, которые обрабатывали на ПЭВМ. Представили уравнение регрессии, в котором учтено влияние действующих факторов на модуль помола. Пророщенное зерно измельчали в молотковом барабане. В натуральных значениях факторов уравнение регрессии может быть записано:

$$M_{П1} = -19,48 + 0,0007n_D + 9,97h_M + 0,57D_{\sigma} + 0,0000002n_D^2 - 0,00028n_Dh_M - 0,000065n_D D_{\sigma} + 4,76h_M^2 - 0,15h_M D_{\sigma} - 0,003D_{\sigma}^2, \quad (4.1)$$

Для приведенного уравнения регрессии коэффициент корреляции имеет значение $R = 87,27 \%$.

Чтобы определить адекватность полученной математической модели применили критерий Фишера. В результате проведенных расчетов получили $F_P = 8,38 > F_{ТАБЛ} = 2,95$ [144...146]. Проведя сравнение рассчитанного значения и табличного критерия Фишера можем отметить адекватность представленной математической модели, значимость их коэффициентов и достоверность проведенных исследований.

На рисунке 4.12 изображена расчетная поверхность отклика модуля помола пророщенного зерна от частоты вращения дробильного барабана и толщины молотков, и ее двумерные сечения при постоянных значениях других параметров.

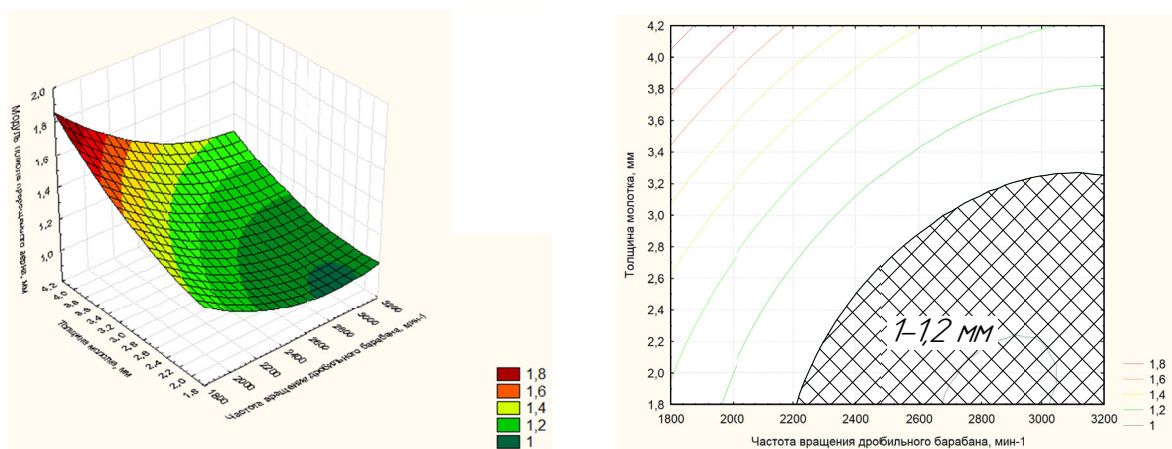


Рисунок 4.12 – Поверхность отклика модуля помола пророщенного зерна от частоты вращения дробильного барабана и толщины молотков, и ее двумерные сечения

Согласно графикам, изображенным на рисунке 4.12 отметим, что после измельчения молотками наименьший модуль помола составил 1 - 1,2 мм, при частоте вращения барабана от 2200 до 2650 мин⁻¹ и толщине молотка 2 - 3 мм.

На рисунке 4.13 представлена поверхность отклика модуля помола пророщенного зерна от частоты вращения дробильного барабана и диаметра дробильного барабана, и ее двумерные сечения

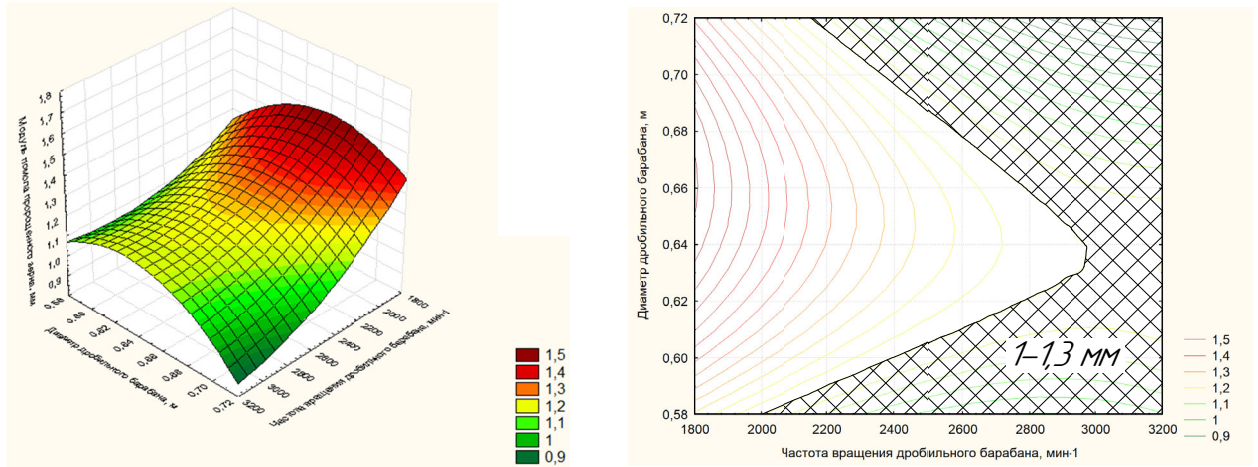


Рисунок 4.13 – Поверхность отклика модуля помола пророщенного зерна от частоты вращения дробильного барабана и диаметра дробильного барабана, и ее двумерные сечения

Согласно графикам, приведенным на рисунке 4.13, отметим, что после измельчения молотками необходимый модуль помола составил 1 - 1,3 мм при частоте вращения барабана от 2600 до 2820 мин⁻¹ и диаметре дробильного барабана 0,6 - 0,61 м. При использовании дробильного барабана диаметром 0,7 м происходит переизмельчение зерновых частиц, а стебельная часть пророщенного зерна измельчается хуже. Поэтому измельченная масса будет неоднородной.

На рисунке 4.14 представлена поверхность отклика модуля помола пророщенного зерна от толщины молотков и диаметра дробильного барабана, и ее двумерные сечения.

Согласно графикам, приведенным на рисунке 4.14, отметим, что после измельчения молотками необходимый модуль помола составил 1 - 1,2 мм при диаметре дробильного барабана от 0,6 - 0,64 м и толщине молотков 2,4 - 2,8 мм.

При использовании дробильного барабана диаметром 0,7 м происходит переизмельчение зерновых частиц, а стебельная часть пророщенного зерна не измельчается. Поэтому измельченная масса будет неоднородной.

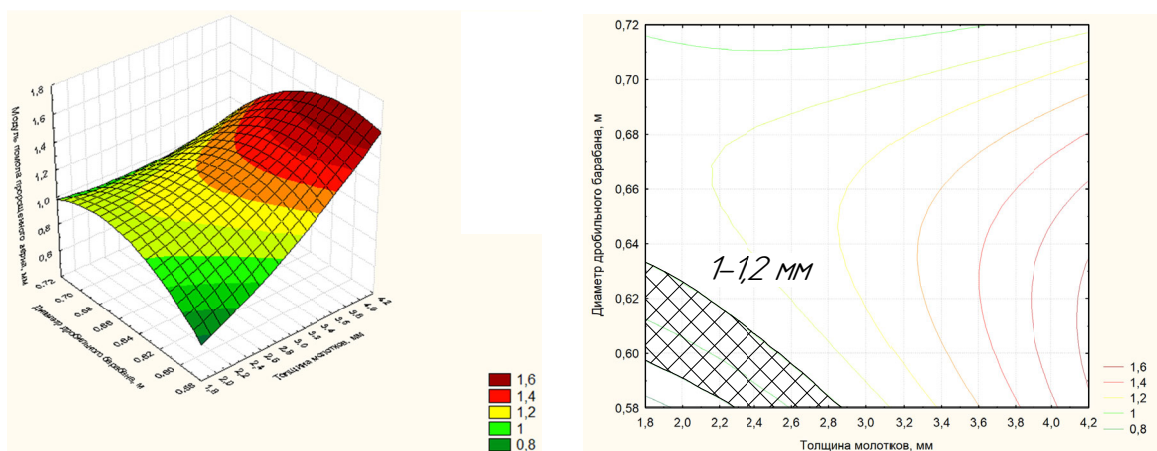


Рисунок 4.14 – Поверхность отклика модуля помола пророщенного зерна от толщины молотков и диаметра дробильного барабана, и ее двумерные сечения

С целью оптимизации параметров дробилки на основе проведенного анализа уравнения регрессии (4.1) установлено, что модуль помола пророщенного зерна после измельчения дробильным барабаном, в области исследуемых факторов, находится в диапазоне 1,2 - 1,3 мм и может быть получен при: n_D – частоте вращения дробильного барабана, 2550 - 2580 мин⁻¹; h_M - толщине молотка, 0,002 - 0,003 м; D_δ – диаметре барабана, 0,6 - 0,62 м.

Результаты расчета представлены в приложении Г.

После проведения экспериментов, согласно плана таблицы 3.4 [144...146], получили ряд результатов, которые обрабатывали на ПЭВМ. Представили уравнение регрессии, в котором учтено влияние действующих факторов на модуль помола. Пророщенное зерно измельчали в ножевом барабане. В натуральных значениях факторов уравнение регрессии может быть записано:

$$M_{П2} = 1,077 - 0,00085n_H + 0,033b_H + 0,1\gamma_H + 0,0000002 n_H^2 - 0,0000038\omega_\delta b_H - 0,000017\omega_\delta \gamma_H + 0,001 b_H^2 - 0,001 b_H \gamma_H - 0,0011 \gamma_H^2, \quad (4.2)$$

Для приведенного уравнения регрессии коэффициент корреляции имеет значение $R = 88,52\%$.

Чтобы определить адекватность полученной математической модели применили критерий Фишера. В результате проведенных расчетов получили $F_p = 9,427 > F_{ТАБЛ} = 2,95$ [144...146]. Проведя сравнение рассчитанного значения и табличного критерия Фишера можем отметить адекватность представленной математической модели, значимость их коэффициентов и достоверность проведенных исследований.

На рисунке 4.15 представлена расчетная поверхность отклика модуля помола помола пророщенного зерна от расстояния между ножами и частоты вращения ножевого барабана, и ее двумерные сечения.

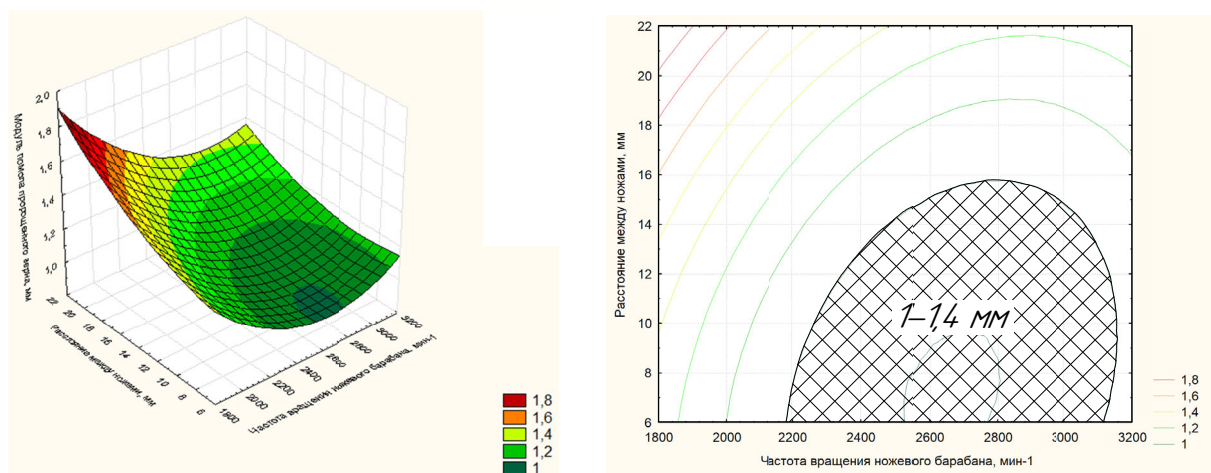


Рисунок 4.15 – Поверхность отклика модуля помола пророщенного зерна от расстояния между ножами и частоты вращения ножевого барабана, и ее двумерные сечения

Анализируя поверхность отклика на рисунке 4.15 отметим, что после измельчения ножами необходимый модуль помола составил 1 - 1,4 мм при частоте вращения ножевого барабана от 2200 - 3000 мин⁻¹ и расстоянии между ножами 7 - 15 мм. Уменьшение частоты вращения ножевого барабана ведет к увеличению модуля помола. При частоте вращения ножевого барабана менее 1800 мин⁻¹ измельчение будет крупное, модуль помола составил 1,6 - 1,7 мм, что больше, чем рекомендованный специалистами модуль помола 0,9 - 1,4 мм [24].

На рисунке 4.16 представлена поверхность отклика модуля помола пророщенного зерна от угла заточки ножа и частоты вращения ножевого барабана, и ее двумерные сечения.

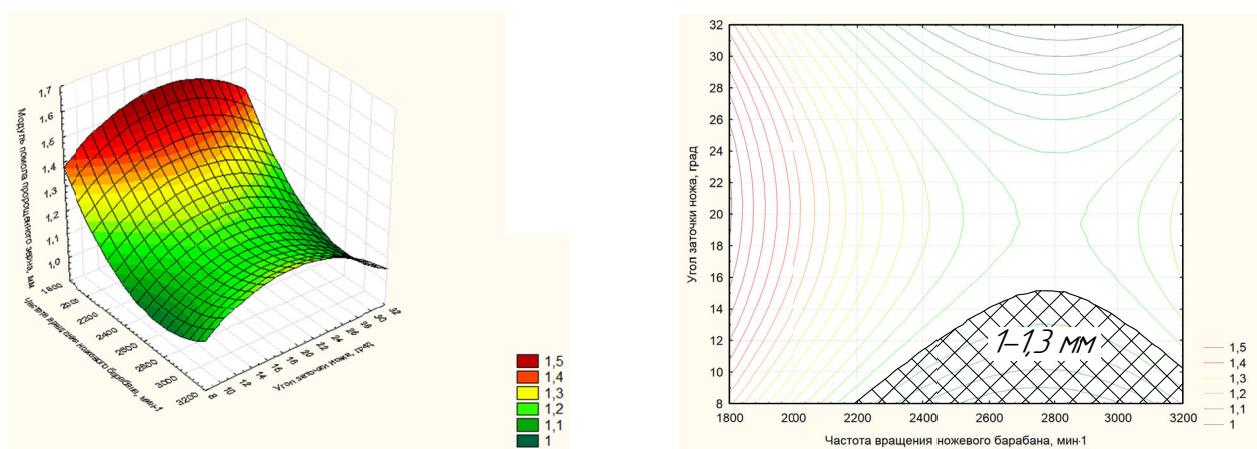


Рисунок 4.16 – Поверхность отклика модуля помола пророщенного зерна от угла заточки ножа и частоты вращения ножевого барабана, и ее двумерные сечения

Выполнив анализ поверхности отклика, отметим, что на рисунке 4.16 прослеживается следующая взаимосвязь, что после измельчения ножами необходимый модуль помола составил 1 - 1,3 мм при частоте вращения ножевого барабана от 2200 - 3000 мин⁻¹ и угле заточки ножей 12 - 16 град. Увеличение угла заточки ножа от 16 до 18 град способствует повышению модуля помола до 1,6 - 1,7 мм, что превышает рекомендованное значение 0,9 - 1,4 мм [24].

На рисунке 4.17 изображена поверхность отклика модуля помола пророщенного зерна от угла заточки ножа и расстояния между ножами, и ее двумерные сечения.

После проведения анализа графика, приведенного на рисунке 4.17, отметим, что необходимый модуль помола 1 - 1,3 мм, будет при расстоянии между ножами 9 - 13 мм и угле заточки ножей 10 - 16 град. Увеличение угла заточки ножа от 17 до 20 град способствует увеличению модуля помола до 1,7 - 1,8 мм, что превышает рекомендованное значение 0,5 - 1,4 мм [24].

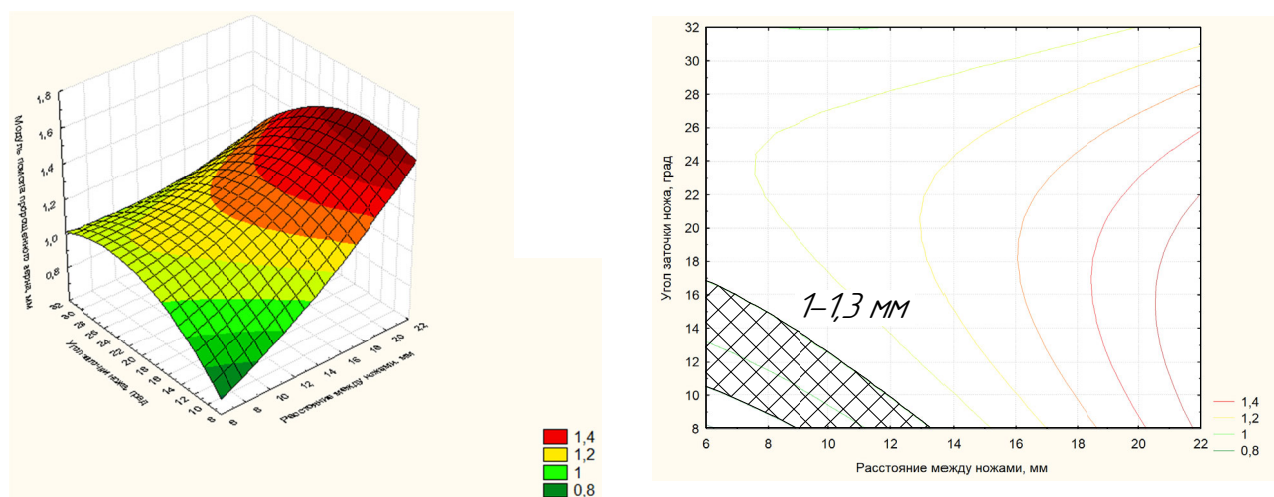


Рисунок 4.17 – Поверхность отклика модуля помола пророщенного зерна от угла заточки ножа и расстояния между ножами, и ее двумерные сечения

С целью оптимизации параметров дробилки на основе проведенного анализа уравнения регрессии (4.2) установлено, что модуль помола пророщенного зерна после измельчения ножевым барабаном, в области исследуемых факторов, находится в диапазоне 1,25 - 1,3 мм и может быть получен при: n_H – частоте вращения ножевого барабана, 2820 - 2840 мин⁻¹; b_H - расстоянии между ножами, 12 - 14 мм; γ_H - угле заточки лезвия ножа, 14 - 15° [147, 148].

Результаты расчета представлены в приложении Д.

4.6 Результаты экспериментальных исследований оценки размера измельченных частиц

Конечный размер пророщенного зерна обусловлен зоотехническими требованиями, предъявляемыми к кормам для определенной группы животных.

Согласно данным литературных источников для кормления свиней, размер частиц измельченного продукта должен быть 0,9 - 1,4 мм [24]. Экспериментальные исследования по определению частиц необходимых размеров, а также недоизмельченных и переизмельченных частиц в

разработанной дробилке с обоснованными конструктивно-режимными параметрами показаны на рисунке 4.18.

Качество измельчения пророщенного зерна на дробилке оценивалось в соответствии с методикой изложенной в п. 3.3. Пророщенную высушенную пшеницу и ячмень измельчали отдельно. Отбор проб частиц пророщенного зерна проводился после прохождения пророщенным зерном последовательно две ступени измельчения – барабан с молотками и ножевой барабан [149 - 155].

На рисунке 4.18 представлен средний размер частиц измельченного пророщенного зерна ячменя и пшеницы.



Рисунок 4.18 – Средний размер частиц измельченного пророщенного зерна

При измельчении пророщенного высушенного ячменя пропускную способность у дробилки зарегистрировали на отметке 515 кг/ ч. Анализируя качественные показатели работы отметим, что недоизмельченная фракция составила 3,3%, переизмельченная фракция 1,8%, требуемая фракция 93,41%, потери получились порядка 1,49%.

При измельчении пророщенной высушенной пшеницы пропускную способность у дробилки зарегистрировали на отметке 522 кг/ ч. Анализируя качественные показатели работы отметим, что неизмельчённая фракция составила

3,35%, переизмельченная фракция 1,4%, требуемая фракция 93,61%, потери получились порядка 1,64%.

Чтобы оценить качество процесса измельчения пророщенного зерна применяли рассев на решетках которого распределились частицы.

Размеры частиц пророщенного измельченного зерна ячменя и пшеницы представлены в таблицах 4.2, 4.3 соответственно.

Таблица 4.2 – Размер частиц пророщенного измельченного зерна ячменя

Диаметр отверстий решета, мм	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Процентное содержание частиц	3,20	47,20	45,00	1,40	1,90

Распределение фракционного состава частиц измельченного пророщенного зерна ячменя по решетам представлено на рисунке 4.19.

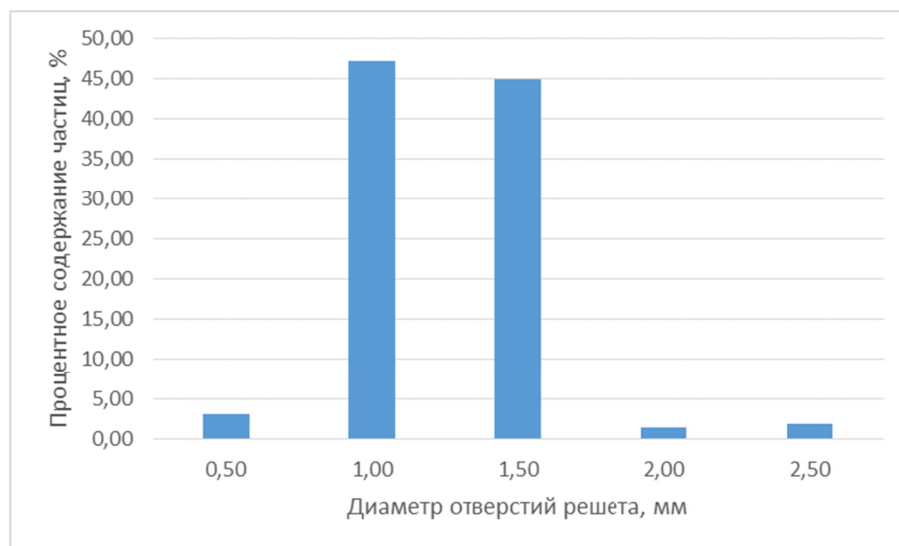


Рисунок 4.19 - Распределение фракционного состава частиц измельченного пророщенного зерна ячменя по решетам

Таблица 4.3 – Размер частиц пророщенного измельченного зерна пшеницы

Диаметр отверстий решета, мм	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Процентное содержание частиц	2,90	44,20	47,40	1,50	1,85

Распределение фракционного состава частиц измельченного пророщенного зерна пшеницы по решетам представлена на рисунке 4.20.

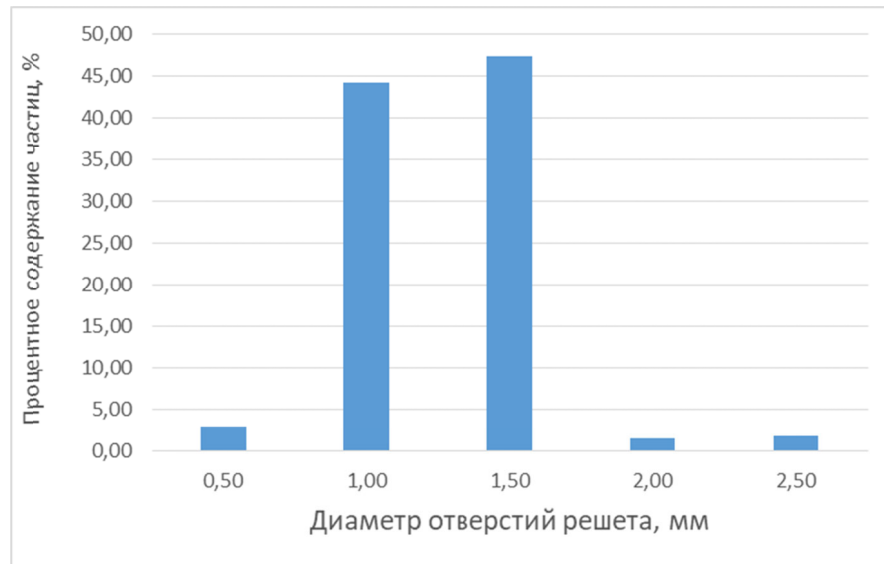


Рисунок 4.20 - Распределение фракционного состава частиц измельченного пророщенного зерна пшеницы по решетам

4.7 Результаты многофакторного эксперимента по влиянию конструктивных и технологических параметров на энергоемкость процесса измельчения и производительность дробилки

Исследования по влиянию конструктивных и технологических параметров на показатели работы дробилки проводились с использованием методов планирования эксперимента и методики изложенной в п. 3.2. Оценивалось влияние конструктивных и технологических параметров на такие показатели, как энергоемкость процесса и производительность дробильной установки.

Поверхность отклика энергоемкости измельчения пророщенного зерна от угла заточки ножа и модуля помола, и ее двумерные сечения изображены на рисунке 4.21.

Анализируя поверхность отклика на рисунке 4.21 отметим, что после измельчения ножами энергоемкость измельчения составила 5 - 6,5 кВт ч/т при модуле помола 1 - 1,25 мм и угле заточки ножа 10 - 24 град. Отметим, что на энергоемкость существенно влияют модуль помола и угол заточки ножа. Этот

результат косвенно согласуется теоретическими результатами, приведенными в главе 2 при расчете физического критерия оптимальности на измельчение.

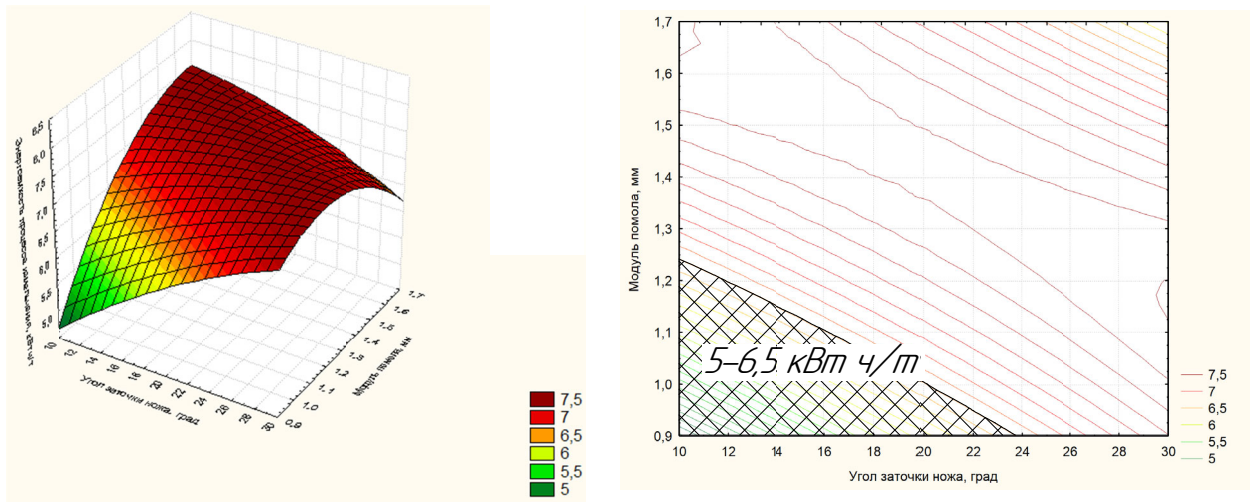


Рисунок 4.21 – Поверхность отклика энергоемкости измельчения пророщенного зерна от угла заточки ножа и модуля помола, и ее двумерные сечения

Поверхность отклика энергоемкости измельчения пророщенного зерна от угла заточки ножа и частоты вращения ножевого барабана, и ее двумерные сечения изображены на рисунке 4.22.

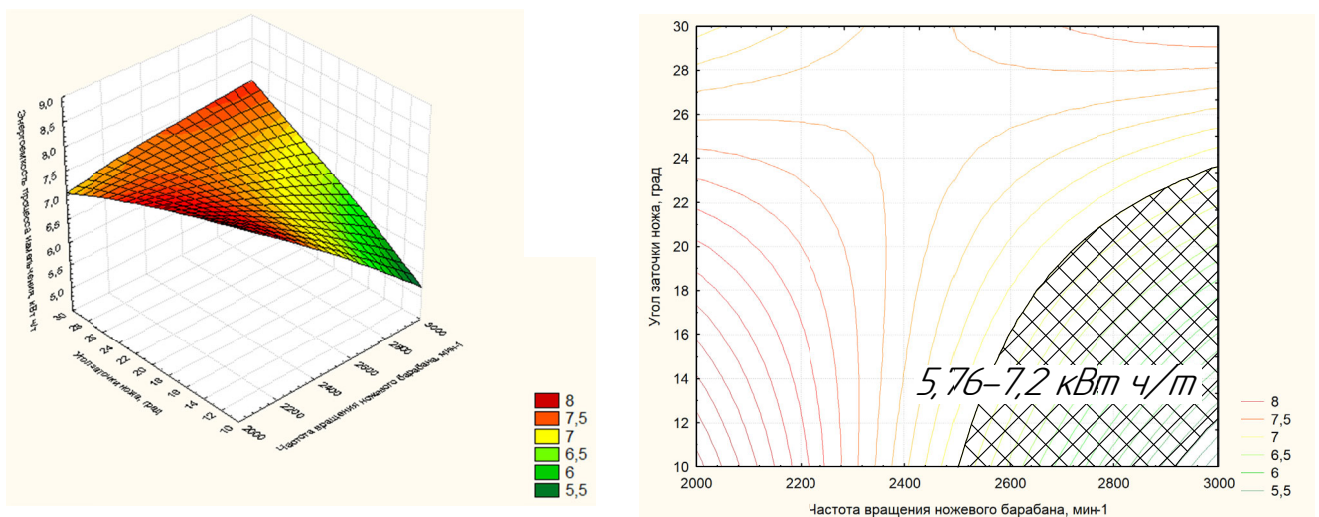


Рисунок 4.22 – Поверхность отклика энергоемкости измельчения пророщенного зерна от угла заточки ножа и частоты вращения ножевого барабана, и ее двумерные сечения

Проанализировав поверхность отклика рисунок 4.22 выявлена такая взаимосвязь, что минимальное значение энергоемкости составляет 5,76 - 7,2 кВт

ч/т при частоте вращения ножевого барабана 2520 - 2960 мин⁻¹ и угле заточки ножа 14 - 22°. При этом область оптимальных значений на двумерном сечении подтверждает взаимное влияние на энергоёмкость процесса обоих факторов. В диапазоне частоты вращения 2200 – 2600 мин⁻¹ влияние угла заточки ножа практически незначимо. Этот результат также косвенно согласуется теоретическими результатами, приведенными в главе 2 при расчете физического критерия оптимальности на измельчение.

На рисунке 4.23 представлена поверхность отклика энергоёмкости измельчения пророщенного зерна от процентного содержания ростков и степени измельчения ростков, и ее двумерные сечения.

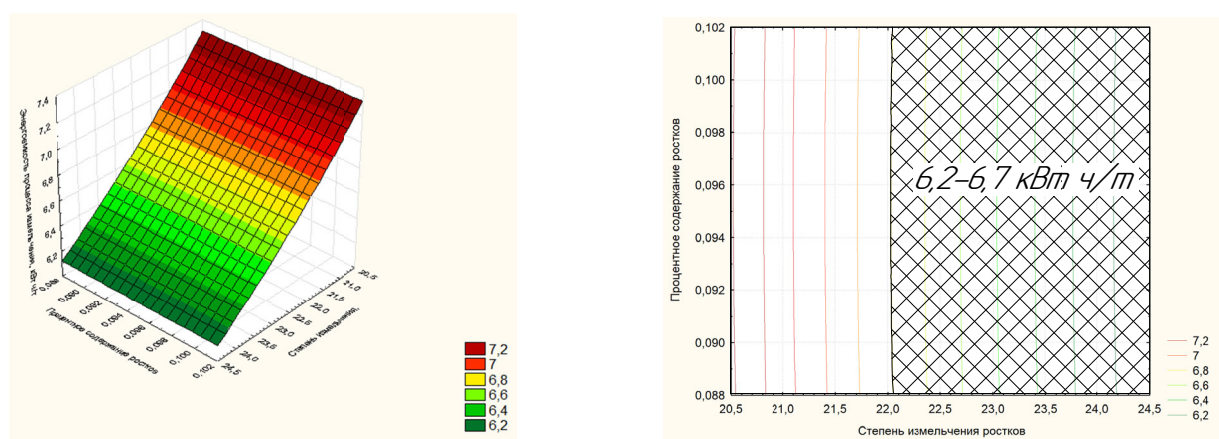


Рисунок 4.23 – Поверхность отклика энергоёмкости измельчения пророщенного зерна от процентного содержания ростков и степени измельчения ростков, и ее двумерные сечения

Проанализировав поверхность отклика рисунок 4.23 выявлена такая взаимосвязь, что при увеличении степени измельчения ростков пророщенного зерна с 22 до 24 единиц энергоёмкость процесса измельчения снижается с 6,8 до 6,2 кВт ч/т. Содержание ростков от всей массы пророщенного зерна в диапазоне 0,088 - 0,1 на энергоёмкость процесса практически не влияет.

На рисунке 4.24 изображена поверхность отклика производительности дробильной установки от частоты вращения дробильного и ножевого барабанов, и ее двумерные сечения.

Из рисунка можем отметить, взаимное влияние частот вращения ножевого и дробильного барабанов на общую производительность дробилки. Наибольшая производительность дробильной установки будет находиться в диапазоне 0,52 - 0,54 т/ч, если обеспечить частоту вращения дробильного барабана 2200 - 2600 мин⁻¹, а частоту вращения ножевого барабана 2600 - 2850 мин⁻¹.

Большую частоту вращения барабанов конструктивно получить сложно. Также необходимо учитывать то, что барабаны имеют общую ось вращения.

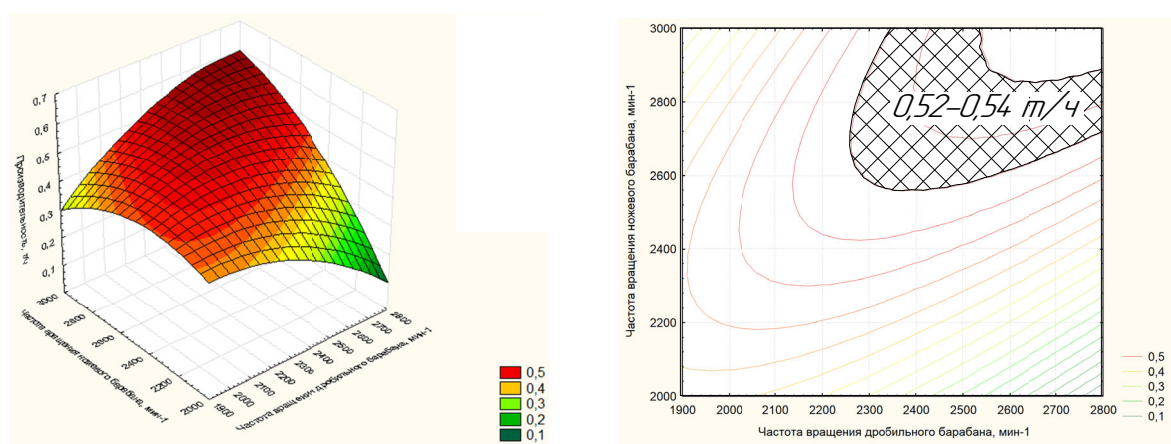


Рисунок 4.24 – Поверхность отклика производительности дробильной установки от частоты вращения дробильного и ножевого барабанов, и ее двумерные сечения

Выводы

1. В результате экспериментальных исследований структуры пророщенного измельченного зерна установлено, что пророщенное зерно является неоднородным продуктом, который состоит из зерновки и ростка. Зерновка состоит из следующих составляющих: оболочки, мучнистого тела и зародышевой части. С учетом проведенного структурного анализа пророщенного зерна следует важный технологический вывод: для того, чтобы измельчить такой неоднородный материал как пророщенное зерно необходимо использовать два типа рабочих органов молотки и ножи.

2. В результате экспериментальных исследований процесса измельчения пророщенного зерна установлено:

- измельчение пророщенного зерна только молотками не обеспечивает измельчение ростков до необходимого размера. При добавлении в комбикорм такой массы длинные ростки размером более 1,5 мм не будут должным образом перераспределяться между частицами корма, размер которых составляет менее полутора миллиметров и не позволят получить однородную массу комбикорма;

- применение в одной камере молотков и ножей позволило получить при измельчении пророщенного зерна материал средние размеры которого составляют 1,1 - 1,3 мм. Следовательно применение в дробилках для пророщенного зерна двух видов рабочих органов (молотков и ножей) позволяет получить высокую степень однородности продукта с необходимой степенью измельчения;

- при измельчении пророщенного высушенного ячменя недоизмельченная фракция составила 3,3%, переизмельченная фракция 1,8%, требуемая фракция 93,41%, потери получились порядка 1,49%;

- при измельчении пророщенной высушенной пшеницы недоизмельченная фракция составила 3,35%, переизмельченная фракция 1,4%, требуемая фракция 93,61%, потери получились порядка 1,64%.

3. Экспериментально установлено, что измельчение не влияет на содержание влаги в продукте. Измеренная влажность продукта до и после измельчения составляла 14%.

4. На основе экспериментальных исследований с применением методов планирования эксперимента получены регрессионные уравнения учитывающие влияние конструктивных и технологических параметров дробилки на модуль помола. В результате анализа уравнений регрессии и поиска оптимальных значений параметров установлено:

- модуль помола пророщенного зерна после измельчения дробильным барабаном, в области исследуемых факторов, находится в диапазоне 1,2 - 1,3 мм и может быть получен при: n_d – частоте вращения дробильного барабана, 2550 -

2580 мин⁻¹; h_M - толщине молотка, 0,002 - 0,003 м; D_6 – диаметре барабана, 0,6 - 0,62 м;

- модуль помола пророщенного зерна после измельчения ножевым барабаном, в области исследуемых факторов, находится в диапазоне 1,25 - 1,3 мм и может быть получен при: n_H – частоте вращения ножевого барабана, 2820 - 2840 мин⁻¹; b_H - расстояний между ножами, 12 - 14 мм; γ_H - угле заточки лезвия ножа, 14 - 15°.

5. В результате экспериментальных исследований по оценке энергоемкости процесса измельчения установлено: при измельчении ножами энергоемкость измельчения составила 5,76 - 7,2 кВт ч/т при модуле помола 1 - 1,25 мм и угле заточки ножа 12 - 22 град. и при частоте вращения ножевого барабана 2520 - 2960 мин⁻¹. На энергоемкость существенно влияют модуль помола и угол заточки ножа. Эти результаты косвенно согласуются с теоретическими результатами при расчете физического критерия.

6. В результате экспериментальных исследований выявлено взаимное влияние частот вращения ножевого и дробильного барабанов на общую производительность дробилки, а также установлено:

- наибольшая производительность дробильной установки будет находиться в диапазоне 0,52 - 0,54 т/ч, если обеспечить частоту вращения дробильного барабана 2200 - 2600 мин⁻¹, а частоту вращения ножевого барабана 2600 - 2850 мин⁻¹. Эти результаты косвенно согласуются с теоретическими результатами при оценке влияния частоты вращения ножевого барабана на энергоемкость процесса измельчения.

7. Экспериментально установлено, что при производительности дробилки 0,52 т/ч и уменьшении степени измельчения ростков с 24,17 до 20,71 единиц энергоемкость измельчения возрастет с 6,2 до 7,23 кВт ч/т. Общая энергоемкость процесса измельчения пророщенного зерна, в том числе ростков и зерновки изменится с 8 до 9,35 кВт ч/т.

Глава 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1 Техничко-экономический анализ эффективности применения дробилки пророщенного зерна

Многие специалисты указывают на полезные свойства пророщенного зерна [1, 2, 3, 12]. Пророщенное зерно можно использовать как ценную кормовую добавку для тех групп животных, которых содержат безвыгульно. Но в работах не обосновывают затраты, связанные с подготовкой пророщенного зерна к скармливанию. Одна из наиболее энергоёмких технологических операций – это измельчение. Нет данных по сравнению технических систем, которые используют для измельчения обычного и пророщенного зерна. Пророщенное зерно как кормовую добавку могут использовать как небольшие сельскохозяйственные производители, которые содержат несколько десятков голов животных, так и крупные производители у которых поголовье насчитывает десятки тысяч голов. В связи с этим количество пророщенного зерна будет разным. Чтобы оптимально загрузить измельчить необходимо знать его пропускную способность, объем работы, необходимо принимать во внимание коэффициент запаса. Чем больше пропускная способность и мощность используемого измельчителя будут отклоняться от расчетных номинальных значений, тем в одном случае можно неоправданно больше потратить капиталовложений на покупку оборудования, а в другом случае маломощный агрегат не способен выполнить заданный объем работ, что тоже плохо.

Производственную проверку дробилки пророщенного зерна (патент на изобретение RU 2692559) проводили в Крестьянском (фермерском) хозяйстве Юрьев А.Ю. Валуйского района Белгородской области.

Эксплуатационные затраты работы дробилки выполняли с использованием литературы [157, 158].

Чтобы произвести экономическое обоснование работы дробилки, в таблице 5.1 записаны марки дробилок с указанием их технических характеристик и ценовых показателей зерновых дробилок и предложенной двухступенчатой дробилки пророщенного зерна. Стоимостные показатели рассчитывались в ценах начала 2021 г.

В расчетах используются начальные условия, которые включают в себя все количество массы, необходимое для добавления в корм для животных. Эту массу пророщенного зерна необходимо измельчить за установленный промежуток времени. В данном случае возможно решение производственных вопросов за счет выбора производительности оборудования.

Таблица 5.1 – Марки дробилок и их ценовые показатели

№	Показатель	Варианты				
		Предлагаемая	КДУ-2	КД-2А	КД-2	КДУ-2
1	Мощность электропривода, кВт	8	12,5	22	30	30
2	Производительность, кг/ч	522	920	1700	2500	3000
3	Стоимость оборудования, руб.	98000	152000	187000	252000	257000
4	Удельная стоимость оборудования в зависимости от мощности электроприводов, руб./ кВт	13066,67	12160	8500	8400	8566,667
5	Удельная мощность оборудования в зависимости от производительности, руб. ч/ кг	0,014	0,014	0,013	0,012	0,010

Чтобы произвести сравнение дробилок проанализировали их удельные показатели.

Удельные показатели стоимости дробилок в зависимости от их производительности изображены на рисунке 5.1.

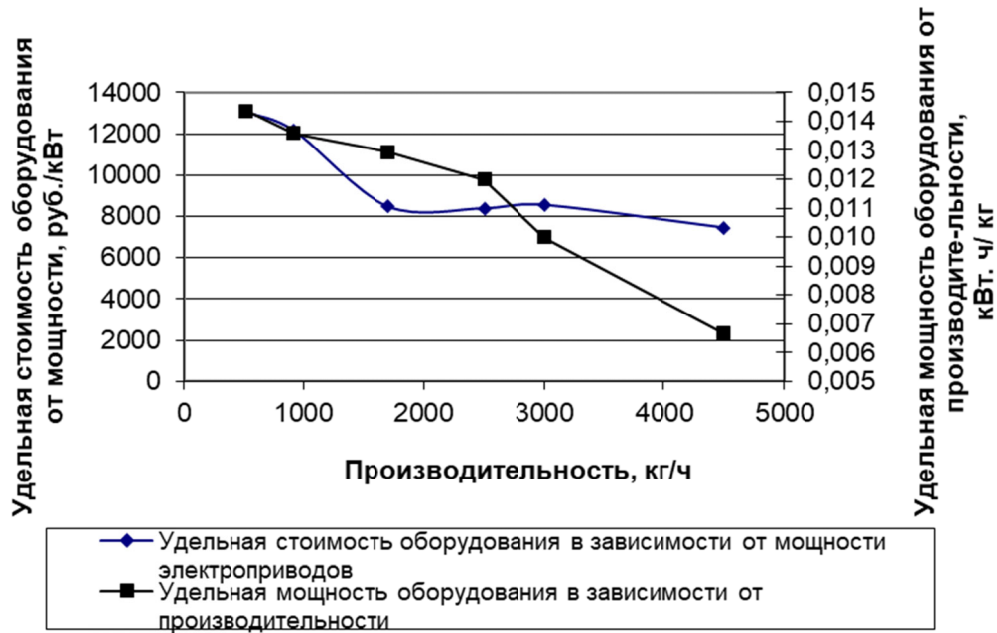


Рисунок 5.1 - Удельные показатели стоимости дробилки в зависимости от производительности

Суточные эксплуатационные затраты, обеспечивающие работу дробилки пророщенного зерна, определи по выражению:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{ТЕХЛ} + A_1 + P_1 + 3П + C_3, \quad (5.1)$$

где $\mathcal{E}_{ТЕХЛ}$ - затраты электроэнергии на дробление пророщенного зерна, руб.;

A – отчисления на амортизацию дробилки пророщенного зерна, руб.;

P – отчисления на ремонт дробилки пророщенного зерна, руб.;

$3П$ – заработная плата рабочим, занятым на работе и обслуживании дробилки пророщенного зерна, руб.;

C_3 – стоимость зерна, руб.

Время работы дробилки рассчитаем по формуле:

$$T_D = \frac{G_2}{W_D}, \quad (5.2)$$

где G_2 - суточная потребность пророщенного зерна, кг;

W_D - производительность дробилки, кг/ч.

Затраты электроэнергии для работы дробилки пророщенного зерна:

$$\mathcal{E}_{ДР} = M_{\partial в} \cdot T_{ДР} \cdot C_{эл}, \quad (5.3)$$

где $M_{об}$ – общая мощность электродвигателей, выполняющих процесс дробления пророщенного зерна, кВт;

$T_{ДР}$ – время работы электродвигателей при выполнении процесса дробления, ч;

$C_{эл}$ – стоимость электроэнергии, руб./кВт-ч.

Затраты на амортизацию дробилки пророщенного зерна определим по выражению:

$$A = \frac{B_c \cdot H_a}{100} \cdot \frac{T_0}{T_r}, \quad (5.4)$$

где H_A – норма отчислений на амортизацию, %;

B_c – балансовая стоимость машины, руб.;

T_0 – время работы машины на операции, ч;

T_r – годовая загрузка агрегата, час.

Рассчитаем затраты на ремонт дробилки пророщенного зерна применив выражение:

$$P = \frac{B_c \cdot H_p}{100 \cdot T_i} \cdot \frac{G_{СУТ ОБ}}{W_c}, \quad (5.5)$$

где B_c – балансовая стоимость машины, руб.;

H_p – норма отчислений на ремонт оборудования, %;

T_i – годовая загрузка агрегата, час;

W_c – производительность агрегата за 1 час сменного времени, кг/ч;

$G_{СУТ ОБ}$ – суточная загрузка оборудования, кг.

Часовую ставку оператора рассчитаем по выражению:

$$\tau = \frac{ЗП_{\min} \cdot k_m \cdot k_0}{H_t}, \quad (5.6)$$

где $ЗП_{\min}$ – минимальный размер оплаты труда, руб.;

k_m – коэффициент по оплате труда;

k_0 – отраслевой повышающий коэффициент;

H_t – месячный часовой фонд рабочего времени.

Фонд оплаты труда определим по выражению:

$$ЗП_{1,2map} = \tau_{1,2mc} \cdot T_0, \quad (5.7)$$

где T_O – время работы на данной операции.

Рассчитаем затраты на оплату труда:

$$ЗП = Ч_i \cdot ЗП_{мар} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4, \quad (5.8)$$

где $Ч_i$ – количество обслуживающего персонала, чел.;

K_1 – коэффициент, учитывающий доплаты за продукцию;

K_2 – коэффициент, учитывающий доплаты за стаж работы;

K_3 – коэффициент, учитывающий оплату отпуска;

K_4 – начисления на заработную плату.

Годовой экономический эффект определим по формуле:

$$\mathcal{E}_{год} = T_{год}(\mathcal{E}_{31} - \mathcal{E}_{32}), \quad (5.9)$$

где $T_{год}$ – годовое время работы дробилки, суток;

\mathcal{E}_{31} – эксплуатационные затраты в применяемой дробилке, руб./т.;

\mathcal{E}_{32} – эксплуатационные затраты в предлагаемой дробилке, руб./т..

Для определения суточных эксплуатационных затрат при работе предложенной дробилки с комбинированной дробильной камерой подставим полученные значения в формулу (5.1).

Срок окупаемости предложенной дробилки пророщенного зерна рассчитаем по выражению:

$$T_{окуп} = \frac{B_A}{\mathcal{E}_{год}} \quad (5.10)$$

Удельные эксплуатационные затраты на измельчение 1 т пророщенного зерна рассчитаем по выражению:

$$\mathcal{E}_y = \frac{\mathcal{E} \cdot 1000}{G_2}, \quad (5.11)$$

где \mathcal{E} – суточные эксплуатационные затраты при работе молотковой дробилки, руб./сут;

G_2 – суточная масса пророщенного зерна, кг/сут.

Зависимость удельных эксплуатационных затрат от производительности молотковой дробилки изображена на рисунке 5.2.

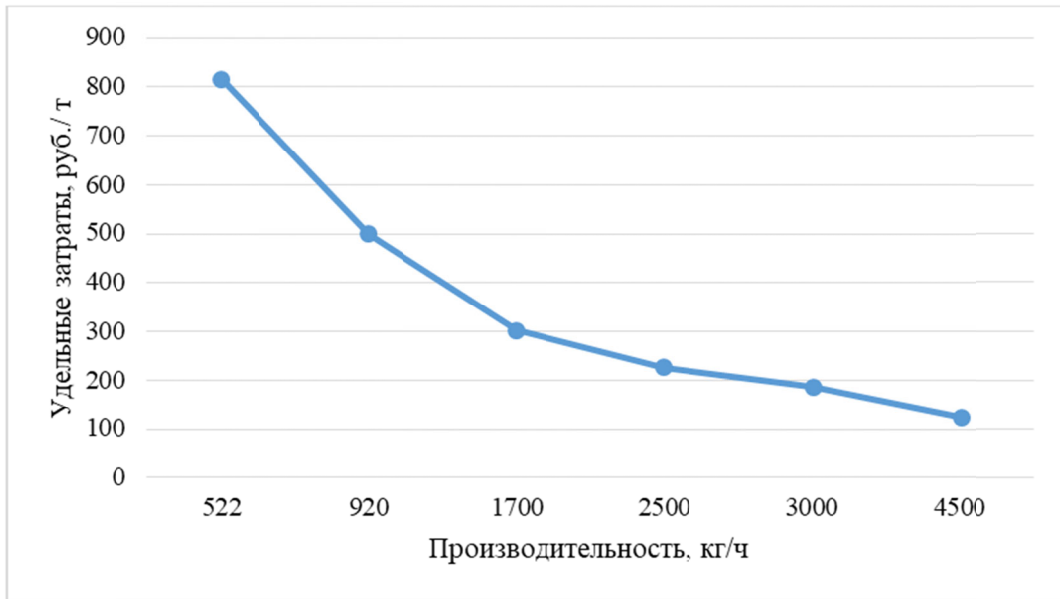


Рисунок 5.2 – Зависимость удельных эксплуатационных затрат от производительности, молотковой дробилки

Зависимость удельных эксплуатационных затрат от производительности молотковой дробилки с учетом стоимости пророщенного зерна представлена на рисунке 5.3.

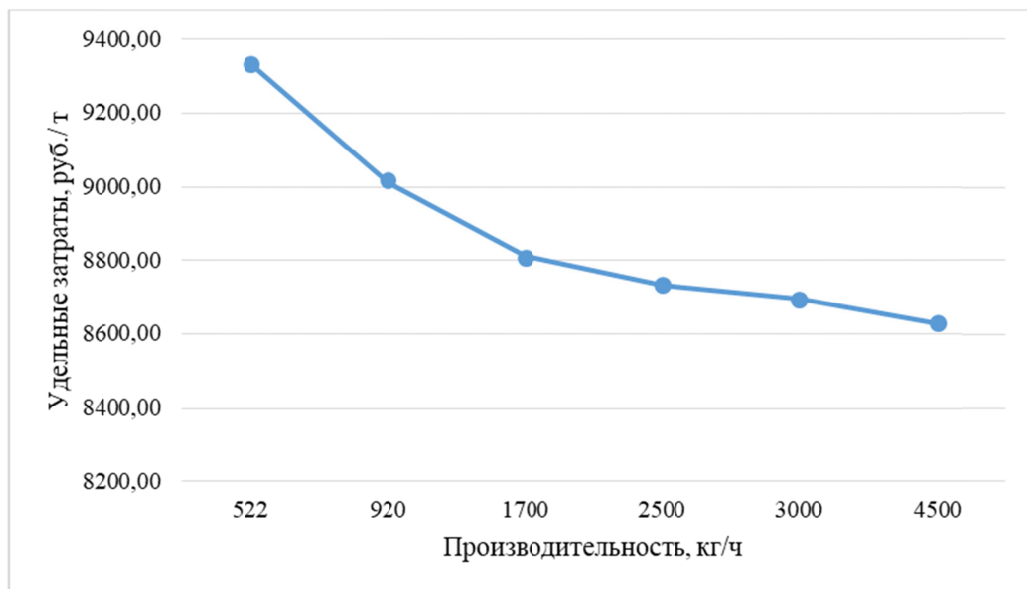


Рисунок 5.3 - Зависимость удельных эксплуатационных затрат от производительности, молотковой дробилки с учетом стоимости пророщенного зерна

Из графика можно сделать вывод, что при производительности, предложенной дробилки с комбинированной дробильной камерой 522 кг/ч, удельные затраты составят 818,52 руб./т. С повышением производительности дробилки до 4500 кг/ч удельные эксплуатационные затраты снизятся до 124,17 руб./т.

Необходимо отметить, что указанные в главе молотковые дробилки в качестве рабочих органов имеют ножи и поэтому не способны измельчать ростки пророщенного зерна до нужных размеров, не переизмельчив зерновую часть (рисунок 4.3). Поэтому сравнение одноступенчатых дробилок с представленной дробилкой, у которой два типа рабочих органов, не совсем корректно. Однако мы сравнивали потому, что указанные дробилки отличаются простотой конструкции, высокой надежностью и поэтому имеют широкое распространение на предприятиях.

На животноводческих комплексах необходимо ежедневно использовать пророщенное зерно как кормовую добавку, поэтому необходимо знать производительность дробилки и затраченное количество электроэнергии. Для удобства понимания и расчета экономические показатели приводятся в удельных единицах на 1 т произведенной продукции.

Расчетами подтверждена экономическая эффективность использования предложенной дробилки с комбинированной дробильной камерой с аналогичной по производительности и по мощности одноступенчатой дробилкой, потому, что годовой экономический эффект составил 29466,7 руб., срок окупаемости дробилки пророщенного зерна составил 3,33 года.

Выводы

В результате проведенных расчетов установлено, что в предложенной дробилке с комбинированной дробильной камерой часовая производительность составляет 522 кг/ч. (сменная производительность 2,088 т/смену) при влажности пророщенного зерна $W_1 = 14 - 16\%$. Затраты на измельчение 1 т зерна составят 818,52 руб./тонну.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 На основании анализа существующих конструкций дробилок указаны их недостатки, которые не позволяют измельчить зерновки и ростки пророщенного зерна, имеющие разные начальные размеры, до величин, соответствующих технологии приготовления комбикормов. Для измельчения пророщенного зерна рекомендуется использовать дробилку с двумя видами рабочих органов, которые будут обеспечивать дробление зерновки и резание ростков. Определено направление разработки дробилки пророщенного зерна, обоснована её конструктивно-технологическая схема.

2 В результате исследований структуры пророщенного измельченного зерна установлено, что пророщенное зерно является неоднородным продуктом, который состоит из зерновки и ростка. Зерновка состоит из следующих составляющих: оболочки, мучнистого тела и зародышевой части. С учетом проведенного структурного анализа пророщенного зерна следует важный технологический вывод: для того, чтобы измельчить такой неоднородный материал как пророщенное зерно необходимо использовать два типа рабочих органов: молотки и ножи.

3 В результате экспериментальных исследований процесса измельчения пророщенного зерна по разработанным методикам установлено, что применение в одной камере молотков и ножей позволяет получить при измельчении пророщенного зерна материал, средние размеры которого составляют 1,1 - 1,3 мм. Следовательно, применение в дробилках для пророщенного зерна двух видов рабочих органов (молотков и ножей) позволяет получить высокую степень однородности продукта с необходимой степенью измельчения.

4 На основе проведенных теоретических исследований получены математические модели для анализа и расчета конструктивных и технологических параметров дробилки:

- оптимального количества молотков. Установлено, что для обеспечения модуля помола зерновки пророщенного зерна в интервале 0,9 - 1,4 мм рекомендуемое количество молотков составляет 68 - 72 единицы, которые можно установить на дробильном барабане, если обеспечить его частоту вращения 2400 - 2600 мин⁻¹, при толщине молотков в интервале 2,5 - 3,8 мм.; рекомендуемое количество ножей составляет 62 - 68 единиц, которые можно установить на ножевом барабане, если обеспечить его частоту вращения 2640 - 2950 мин⁻¹, при толщине ножей в интервале 1,9 - 2,7 мм.

- производительности дробильной установки. Установлено, что производительность принимает наибольшее значение 0,52 - 0,56 т/ч, если обеспечить частоту вращения дробильного барабана 2200 - 2600 мин⁻¹, а частоту вращения ножевого барабана 2600 - 2800 мин⁻¹.

- удельных затрат на измельчение с обеспечением необходимых конечных размеров зерновки и ростка пророщенного зерна. Удельные затраты находятся в диапазоне 47 - 52 кДж/кг при степени измельчения ростков от 20,71 до 24,17 единиц и степени измельчения зерновки от 7,86 до 9,17 единиц, энергоемкость процесса измельчения составит 6,2 - 8,3 кВт ч/т.

5 Предложены критериальные зависимости для оценки удельных энергозатрат при измельчении пророщенного зерна. На основе критерия оптимальности процесса резания по минимуму удельных энергозатрат на сжатие в результате проведенных расчетов установлено: для резания продукта ($\sigma = 0,08$ МПа; $\tau = 0,32$ МПа) с толщиной слоя 4 мм конструктивные параметры должны быть следующими: толщина ножа $a = 2$ мм, толщина режущей кромки ножа $\delta = 0,05$ мм; угол заточки γ равен 14^0 ; длина участка заточки ножа $z = 7,821$ мм.

В результате экспериментальных исследований по оценке энергоемкости процесса измельчения установлено: при измельчении ножами энергоемкость составила 5,76 - 7,2 кВт ч/т при модуле помола 1 - 1,25 мм и угле заточки ножа 12 - 22 град. и при частоте вращения ножевого барабана 2520 - 2960 мин⁻¹. Установлено, что при производительности дробилки 0,52 т/ч и уменьшении

степени измельчения ростков с 24,17 до 20,71 единиц энергоемкость измельчения возрастет с 6,2 до 7,23 кВт ч/т. Общая энергоемкость процесса измельчения пророщенного зерна, в том числе ростков и зерновки изменится с 8 до 9,35 кВт ч/т.

6 На основе экспериментальных исследований с применением методов планирования эксперимента получены регрессионные уравнения, учитывающие влияние конструктивных и технологических параметров дробилки на модуль помола. В результате анализа уравнений регрессии и поиска оптимальных значений параметров установлено:

- модуль помола пророщенного зерна после измельчения дробильным барабаном, в области исследуемых факторов, находится в диапазоне 1,2 - 1,3 мм и может быть получен при: n_D – частоте вращения дробильного барабана, 2550 - 2580 мин⁻¹; h_M - толщине молотка, 0,002 - 0,003 м; D_b – диаметре барабана, 0,6 - 0,62 м;

- модуль помола пророщенного зерна после измельчения ножевым барабаном, в области исследуемых факторов, находится в диапазоне 1,25 - 1,3 мм и может быть получен при: n_H – частоте вращения ножевого барабана, 2820 - 2840 мин⁻¹; b_H - расстоянию между ножами, 12 - 14 мм; γ_H - угле заточки лезвия ножа, 14 - 15°.

7 В результате производственной проверки и технико-экономического обоснования определено, что в предложенной молотковой дробилке с комбинированной дробильной камерой часовая производительность составляет 522 кг/ч (сменная производительность 2,088 т) при влажности пророщенного зерна $W_1 = 14 - 16\%$. Затраты на измельчение 1 т зерна составят 818,52 руб.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

1. Полученные результаты могут быть использованы при разработке или модернизации машин для измельчения неоднородных материалов.

Результаты научных исследований могут быть использованы в конструкторских бюро предприятий сельскохозяйственного машиностроения при разработке дробилок с двумя измельчающими барабанами, которые имеют одну ось вращения, с целью получения однородной массы.

2. Перспективы настоящей работы заключаются в том, что результаты исследований могут быть использованы в разработке средств механизации, которые будут измельчать пророщенное зерно и гидропонный корм без предварительной сушки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарев, А.Ф. Свиноводство и технология производства свинины [Текст] / А.Ф. Пономарев, Г.С. Походня, Г.В. Ескин. – Белгород: Крестьянское дело. – 2001. – 492 с.
2. Пономарев, А.Ф. Теория и практика промышленного кормопроизводства и свиноводства [Текст] / А.Ф. Пономарев под общей редакцией д. с-х н. профессора Г.С. Походни. - Белгород, БелГСХА: 2003, 616. - с.
3. Сычёва, Л.В. Кормление свиней [Текст] / Л.В. Сычёва. – Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2014. – 149 с.
4. Алиев, А. Профилактика нарушений обмена веществ у сельскохозяйственных животных [Текст] / А. Алиев, В. Барей, П. Бартко [и др.]. – М.: Агропромиздат, 1986. – 384 с.
5. Захарова, О.А. Корма растительного происхождения [Текст] / Н.И. Морозова, Ф.А. Мусаев, О.А. Захарова — Рязань, Рязанский ГАУ, 2011.— 320 с.
6. Дурст, Л. Кормление основных видов сельскохозяйственных животных [Текст] / Л. Дурст, М. Виттман; пер. с нем. Винница: Нова книга, 2003. - 384 с.
7. Баканов, В.Н. Кормление сельскохозяйственных животных [Текст] / В.Н. Баканов, В.К. Менькин. М.: Агропромиздат, 1989. - 511 с.
8. Хохрин, С.Н. Кормление сельскохозяйственных животных [Текст] / С.Н. Хохрин. М.: КолосС, 2004. 692 с.
9. Макарцев, Н.Г. Кормление сельскохозяйственных животных [Текст] / Н.Г. Макарцев. 2-е изд., пераб. и доп. Калуга: Облиздат, 2007. 608 с.
10. Хохрин, С.Н. Кормление сельскохозяйственных животных [Текст] / С.Н. Хохрин. М.: КолосС, 2004. – 692 с.
11. Понедельченко, М.Н. Рациональные способы заготовки и использования кормов [Текст]/ М.Н. Понедельченко, Г.С. Походня, В.И. Гудыменко. – Белгород: Везелица, 2007. – 364 с.

12. Коба, В.Г. Механизация и технология производства продукции животноводства [Текст] / В.Г. Коба, Н.В. Брагинец, Д.Н. Мурусидзе, В.Ф. Некрашевич. – М.: Колос, 1999. – 526 с.
13. Владимиров, Н.И. Кормление сельскохозяйственных животных / Н.И. Владимиров, Л.Н. Черемнякова, В.Г. Луницын, А.П. Косарев, А.С. Попеляев. – Барнаул: АГАУ, 2008. – 212 с.
14. Шабловский, В.В. Воспроизводительные функции и продуктивность свиноматок при скармливании им пророщенного зерна ячменя [Текст]: автореф. дис. кандидата сельскохозяйственных наук: 06.02.01 / Шабловский Владимир Владимирович. – Курск, 2009. – 19 с.
15. Саенко, Ю.В. Физико-механические свойства пророщенного зерна [Текст] / Булавин, Ю.В. Саенко, А.Ю. Носуленко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2012. - № 4. – С. 32-33.
16. Ковригин, А.В. Повышение продуктивности свиней за счет скармливания им пророщенного зерна [Текст] / А.В. Ковригин, С.В. Вендин, Ю.В. Саенко. – Белгород, Политерра, 2020. - 189 с.
17. Саенко, Ю.В. Обоснование частоты вращения ножей дробилки пророщенного зерна [Текст] / С.В. Вендин, С.А. Булавин, Ю.В. Саенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2015. - №4. - С. 9-12.
18. Турубанов, Н.В. Повышение эффективности процесса дробления зерна в молотковой дробилке путем разделения дерти воздушным потоком [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01/ Турубанов Николай Валентинович. – Киров, 2004. – 24 с.
19. Иванов, В.В. Совершенствование режимов работы дискового измельчителя кормового зерна [Текст]: дис. кандидата техн. наук: 05.20.01 / Иванов Вячеслав Владимирович. – Зеленоград, 2014. – 132 с.
20. Денисов, С.В. Технология и механизация животноводства [Текст] / С.В. Денисов, А.С. Грецов, А.Л. Мишанин [и др.]. – Кинель: РИО Самарской ГСХА, 2018. – 165 с.

21. Дружинин, Р.А. Совершенствование рабочего процесса ударно-центробежного измельчителя [Текст]: дис. кандидата технических наук 05.20.01 / Дружинин Роман Александрович. – Воронеж, 2014. – 169 с.
22. Перетягин, Е.Н. Обоснование параметров измельчителя зерна режущего типа [Текст] / Пермский аграрный вестник // Е.Н. Перетягин, В.А. Анисимов. – Пермский ГАУ. – 2018. - №2 (22), С.9-15.
23. Мельников, С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм [Текст] / С.В. Мельников. Л.: Колос, 1978. - 560 с.
24. Шейко, И.П. Свиноводство [Текст] / И.П. Шейко, В.С. Смирнов. – Мн.: Новое знание, 2005. – 384 с.
25. Семенихин, А.М. Механизация животноводства [Текст] / А.М. Семенихин, Н.В. Пономаренко. - зерноград, АЧГАА, 2007. – 226 с.
26. Данилин, А.С. Производство комбикормов за рубежом [Текст] / А.С. Данилин. – М.: Колос, 1968. – 336 с.
27. Труфанов, В.В. Исследование влияния конструктивных и технологических параметров на процесс измельчения в измельчителе ударно-центробежного типа [Текст] / В.В. Труфанов, В.М. Опышко, Р.А. Дружинин // Вестник Мичуринского филиала Российского университета кооперации: научно-производственный журнал. – Мичуринск: 2011. – С.62-67.
28. Труфанов, В.В. Математическая модель удельной энергоемкости процесса измельчения зерна [Текст] / В.В. Труфанов, Н.Ф. Скурятин, Р.А. Дружинин // Вестник Воронежского государственного аграрного университета: теоретический и научно-практический журнал.–Воронеж: ВГАУ, 2012.– С.129 - 131.
29. Труфанов, В.В. Совершенствование устройства для измельчения сыпучих материалов ударно-центробежного типа [Текст] / В.В. Труфанов, В.М. Опышко, Р.А. Дружинин // Вестник Воронежского аграрного университета: Науч. докл. и сообщения. – Воронеж: ВГАУ, 2011. – С.39 - 42.

30. Труфанов, В.В. Теоретические зависимости сепарации измельченного зерна по конусной перфорированной поверхности [Текст] / В.В. Труфанов, Е.А. Андрианов, Р.А. Дружинин // Лесотехнический журнал. – Воронеж: ВГЛТА, 2013. – № 3 – С.164 - 170.

31. Черепков, А.В. Совершенствование процесса измельчения зерна с обоснованием конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки [Текст]: автореф. дис. кандидата технических наук: 05.20.01 / Черепков Александр Викторович. – Орловский ГАУ. - Орёл, 2016. - 20 с.

32. Коношин, И.В. Использование в молотковых дробилках решёт с регулируемым живым сечением [Текст] / И.В. Коношин, А.В. Звекон, А.В. Черепков // Кормопроизводство. – 2014. – № 1. – С. 44 – 48.

33. Коношин, И.В. Повышение эффективности функционирования молотковых дробилок при измельчении зерна [Текст] / И.В. Коношин, А.В. Звекон, А.В. Черепков // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2014. – № 1. – С. 127 – 132.

34. Черепков, А.В. Применение в молотковых дробилках решет с прямоугольными отверстиями [Текст] / А.В. Черепков, И.В. Коношин // Главный механик. – 2013. – № 13. С. 34 – 36.

35. Шкондин, В.Н. Разработка способа измельчения кормового зерна и обоснование параметров двухступенчатого измельчителя [Текст]: автореф. дис. кандидата технических наук: 05.20.01 / Шкондин Владимир Николаевич. – Донской ГАУ. - Зерноград, 2018. - 24 с.

36. Шкондин, В.Н. Дисковый измельчитель кормового зерна [Текст] / В.Н. Шкондин, А.М. Семенихин, Л.А. Гуриненко, В.В. Иванов // Техника и оборудование для села. – 2014. – № 10(208). – С. 9 - 11.

37. Шкондин, В.Н. Энергоресурсосбережение при измельчении компонентов комбикормов [Текст] / А.М. Семенихин, Л.А. Гуриненко, В.Н. Шкондин, А.П. Баимов // Сельский механизатор. 2017. № 9. - С. 22 - 23.

38. Сергеев, Н.С. Центробежно-роторные измельчители фуражного зерна [Текст]: автореферат дис. доктора технических наук: 05.20.01 / Сергеев Николай Степанович. – Челябинский ГАУ. - Челябинск, 2008. - 40 с.

39. Сергеев, Н.С. Новая конструкция и рабочий процесс центробежно-роторного измельчителя фуражного зерна [Текст] / Н.С. Сергеев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2006. - № 6. – с. 30 - 31.

40. Сергеев, Н.С. Новое поколение машин [Текст] / Н.С. Сергеев // Сельский механизатор. – 2006. - № 9. – с. 26 - 27.

41. Сергеев, Н.С. Влияние конструкционных параметров параметров режущих элементов на статическое и динамическое усилие резания зерна [Текст]/ Н.С. Сергеев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. - № 1.

42. Загорский, С.М. Повышение эффективности приготовления кормов за счет совершенствования рабочих органов измельчителя [Текст]: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.20.01 / Загорский Сергей Михайлович. – Великолукская ГСХА. - СПб. - Пушкин, 2006. - 20 с.

43. Яковлев, А.В. Параметры и режимы работы универсального измельчителя стебельчатых кормов и подстилки с вертикальным бункером и ротором молоткового типа [Текст]: автореф. дис. кандидата технических наук: 05.20.01 / Яковлев Антон Владимирович. – Северо-Кавказский НИИМиЭСХ. Ростов-на-Дону. 2013. – 20 с.

44. Яковлев, А.В. Проектирование и расчет технологических линий подготовки и раздачи кормосмесей дифференцированного состава многофункциональными агрегатами [Текст]: Методические рекомендации / Пахомов В.И., Яковлев А.В., Тищенко М.А., Брагинец С.В., Чернуцкий М.В., Тищенко И.И.; ГНУ СКНИИМЭСХ Россельхозакадемии. - зерноград, 2013. – 220с.

45. Яковлев, А.В. Уточненные параметры молоткового аппарата универсального измельчителя-раздатчика стебельчатых кормов и подстилки в тюках и рулонах любых размеров [Текст] / М.А. Тищенко, А.В. Яковлев// В сб.:

"Инновационные процессы и технологии: исследования, испытания, внедрение". СКНИИМЭСХ. - зерноград, 2011. - С . 101 - 107.

46. Яковлев, А.В. Универсальный измельчитель стебельчатых материалов в тюках и рулонах [Текст] / М.А. Тищенко, А.В. Яковлев // Техника и оборудование для села. -2010.- № 8. - С. 14 - 15.

47. Яковлев, А.В. Обоснование параметров молоткового аппарата измельчителя стебельчатых кормов [Текст] / М.А. Тищенко, А.В. Яковлев // Сельскохозяйственные машины и технологии. - 2011. - № 2. - С. 40 - 45.

48. Сергиенко, А.Г. Совершенствование процесса подготовки грубых кормов и подстилки измельчителем с наклонным вращающимся бункером [Текст]: автореф. дис. кандидата технических наук: 05.20.01 / Сергиенко Александр Григорьевич. – зерноград, 2001. – 19 с.

49. Туманова, М.И. Параметры измельчителя стебельных кормов с дисковым рабочим органом для малых ферм КРС [Текст]: дис. кандидата технических наук: 05.20.01 / Туманова Марина Ивановна. – Краснодарский ГАУ. - Краснодар, 2020.- 24 с.

50. Вендин, С.В. Результаты экспериментальных исследований по оценке эффективности применения УФ облучения, СВЧ обработки и искусственного освещения при проращивании зерна пшеницы и ячменя на витаминный корм / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, Е.А. Мартынов, В.Ю. Страхов // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. – 2019. - № 3(43). – С. 84 - 89.

51. Tumanova, M.I., Frolov V.Yu, Sysoev D.P., Morozova N.Yu. Theoretical aspects of the process grinding stalk feed chopper with a disk working body [Текст] / V.J Frolov., D.P. Sysoev, M.I. Tumanova, N.Yu. Morozova // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2019. Т. 6. No 6. С. 13440 - 13444.

52. Туманова, М.И. К вопросу обоснования конструктивно-режимных характеристик дискового рабочего органа, оснащенного режущими сегментами

[Текст] / М.И. Туманова // Вестник аграрной науки Дона. –2018. –№ 41. – С. 65 – 70.

53. Жигжитов, А.В. Механизация процессов консервирования и приготовления кормов [Текст] / А.В. Жигжитов Улан-Удэ: БГСХА им. В.Р. Филиппова, 2008. – 110 с.

54. Tumanova, M.I., Frolov V.Yu, Sysoev D.P., Sarbatova N.Yu. Experimental aspects of crushing of the stalk forage with a disk cone-shaped working organ with combined segments [Текст] / M.I. Tumanova, V.Yu Frolov, D.P. Sysoev,N.Yu. Sarbatova // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences.– 2018. – No 9(3). – P. 958 – 967.

55. Туманова, М.И. Совершенствование технологий и технических средств приготовления и раздачи грубых кормов из рулонов [Текст]/ В.Ю. Фролов, М.И. Туманова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2016. – № 10. – С. 3.

56. Stockman, K. Technologie der Mischfutter Herstellung [Текст] / К. Stockman. -Hannover, 1960. 210 с.

57. Rumpf, H. Prinzipien der Prallzerkleinerung und ihre Anwendung bei der Strahlmahlung. Chemie -Ingenieur -Technic. 1960, Bd. 32, N 3, S. 129 - 252.

58. Пат. 173650 Российская Федерация, U1 B02C 13/00 2006.01 Молотковая дробилка [Текст] / Коняев Н.В., Блинков Б.С., Сараев И.Ф., Назаренко Ю.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Курская ГСХА им. И.И. Вавилова. - № 20171000794 от 10.11.2017 г, опубл. 05.09.2017 г.

59. Пат. 2166368 Российская Федерация, С2, В02С 13/14 (2000.01). Многоступенчатая дробилка [Текст] / В.Р. Алешкин, Н.Ф. Баранов, М.С. Поярков, В.Н. Шулятьев, заявитель и патентообладатель Вятская государственная сельскохозяйственная академия. - №99109165/13; Заявлено 26.04.1999; Опубл. 10.05.2001 г.

60. Пат. 2215400 Российская Федерация, С2, А01F 29/00 (2000.01), В02С 9/02 (2000.01), В02С 13/18 (2000.01) Дробилка кормов [Текст] / В.Г. Коротков, С.Ю.

Соловых, С.В. Антимов, Н.В. Зайцев, В.П. Ханин, заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный университет. - № 2001107876/13; заявл. 23.03.2001; опубл. 10.11.2003 г.

61. Пат. 2457034 Российская Федерация, С1, В02С 13/12 (2006.01). Молотковая дробилка [Текст] / Н.Ф. Баранов, А.Г. Сергеев, А.А. Зыкин, заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Вятская государственная сельскохозяйственная академия. - № 2010149351/13; заявл. 02.12.2010; опубл. 27.07.2012. Бюл № 21.

62. Пат. 1556737 Российская Федерация, А1, В02С 13/12 (2000.01). Дробилка [Текст] / С.Б. Михлин, Ю.А. Фаянс, М.И. Мучник, заявитель и патентообладатель всесоюзный научно-исследовательский институт комплексных проблем машиностроения для животноводства и кормопроизводства. - № 4302346/31-33; заявл. 03.09.1987; опубл. 15.04.1990. Бюл № 14.

63. EP0261913 (A2), В02С13/14; В02С13/18; (IPC1-7): В02С13/18; В02С13/18В4D Vertical shaft impact crusher with interchangeable crusher ring segments [Текст]/ Bechler David; Butts Stephen. – EP19870308335 19870921; US19860909662 19860922. Опубл. 30.03.1988 г.

64. JP4110050 (A), В02С13/14; В02С13/18; В02С13/28; (IPC1-7): В02С13/14; В02С13/28; В02С13/18В4D. Vertical impact type crusher [Текст] / Okawa Koji – JP19900231915 19900831; Опубл. 10.04.1992 г.

65. Пат. 2137546 Российская Федерация, С1 МПК 6 В02С 4/28 (1995.01) Валковая дробилка [Текст] / Стрелков В.А., Мокшанцев А.В., Юленков В.Н., Бессарабов С.Е., Стрелков А.Н., заявитель и патентообладатель Стрелков Владимир Александрович. - № 98116272/13, заявл. 25.08.1998; Опуб. 20.09.1999 г.

66. Пат. 139019 Российская Федерация, U1 В02С 13/22 (2006.01) В02С 13/04 (2006.01) Дробилка зерна [Текст] / Коняев Н.В., Сараев И.Ф., Трубников В.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Курская ГСХА им. И.И. Иванова. - № 2013151430/13 от 19.11.2013 г, опубл. 27.03.2014 Бюл. № 9.

67. Пат. 2596756 С1 Российская Федерация, В02С 13/02 (2006.01) В02С 13/286 (2006.01) Дробилка зерна с сепарацией [Текст] / Мусин Р.Р., Сиганшин Б.Г., Хайдаров Р.Р., Хасанова Ф.Ф.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Казанский ГАУ. - № 2015115335/13 от 23.04.2015 г, опубл. 10.09.2016 Бюл. № 25.

68. Пат. 2621255 Российская Федерация, С1 В02С 13/14 (2006.01) Дробилка для зерна [Текст] / Сундеев А.А., Воронин В.В., Якименко А.В., Яровой М.Н., Извеков Е.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. - № 2016112760, от 04.04.2016 г, опубл. 01.06.2017 Бюл. № 16.

69. Пат. 2380159 Российская Федерация, С1 В02С 13/04 (2006.01) Молотковая дробилка для фуражного зерна с разделительной камерой [Текст] / Труфанов В.В., Барбицкий А.П., Яровой М.Н., Алныкина А.В.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО Воронежский ГАУ. - № 2008144270/03, от 07.08.2008 г, опубл. 27.01.2010 Бюл. № 3.

70. Пат. 96115708 Российская Федерация, А, А01F 29/02 (1995.01), В02С 13/20 (1995.01) Дробилка зерна [Текст] / Желтунов М.Г., Стрижов В.М., Демин В.А.; заявитель и патентообладатель Желтунов М.Г. - № 96115708/13, заявл. 29.07.1996 г, опубл. 10.08.1998 г.

71. Пат. 2683869 Российская Федерация С1 Дробильная установка пророщенного высушенного зерна МПК В02С 13/00 (2006.01) В02С 18/00 (2006.01) В02С 9/00 (2006.01) В02С 23/00 (2006.01) СПК В02С 13/00 (2018.08), В02С 18/00 (2018.08), В02С 9/00 (2018.08), В02С 23/00 (2018.08) [Текст] / Вендин С.В., Саенко Ю.В., Макаренко А.Н., Широков М.С., Гетманов А.А., Казаков К.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ. - 2018117135 заявл. 07.05.2018 г. опубл. 02.04.2019 Бюл. № 10.

72. Пат. 2493918 Российская Федерация, С1 В02С13/02 (2006.01). Дробилка пророщенного высушенного зерна [Текст] / Саенко Ю.В., Булавин С.А., Саенко В.Н., Носуленко А.Ю., Немыкин В.А., Федорчук Е.Г. заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ. – № 2012111904, заявл. 27.03.2012; опубл. 27.09.2013, Бюл. № 27. - 11 с. : ил.

73. Пат. 2552958 Российская Федерация С1 В02С 4/10 (2006.01) В02С 4/10 (2006.01) Роторная дробилка [Текст] / Лебедев А.Т., Очинский В.В., Искендеров Р.Р., Лебедев П.А., Захарин А.В. и др; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ. - 2014108154/13 заявл. 03.03.2014 г. опубл. 10.06.2015 Бюл. № 16.

74. Пат. 2545653 Российская Федерация С1 Роторная дробилка В02С 13/02 (2006.01) [Текст] / Лебедев А.Т., Очинский В.В., Искендеров Р.Р., Лебедев П.А., Захарин А.В. и др; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ. - 2014100094/13, заявл. 09.01.2014 г. опубл. 10.04.2015 Бюл. № 10.

75. Пат. 2546228 Российская Федерация С1 Роторная дробилка В02С 4/28 (2006.01) [Текст] / Лебедев А.Т., Очинский В.В., Искендеров Р.Р., Лебедев П.А., Захарин А.В. и др; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ. - №2013153573/13 от 03.12.2013 г. Опубл. 10.04.2015 Бюл. № 10.

76. Пат. 2598909 Российская Федерация С2 В02С 9/04 (2006.01) В02С 19/00 (2006.01) В02С 13/00 (2006.01) В02С 15/00 (2006.01) [Текст] / Семенихин А.М., Гуриненко Л.А., Шкондин В.Н. заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Донской ГАУ – № 2014147577/13, от 25.11.2014 г. Опубл. от 10.06.2016 Бюл. № 16.

77. Труфанов, В.В. К обоснованию рациональных режимных параметров ударно-центробежной дробилки / А.М. Золотарев, В.В. Труфанов, Р.А. Дружинин, М.Н. Яровой // Вестник Воронежского государственного аграрного университета . 2018. № 1(56). С. 119 - 127.

78. Труфанов, В.В. Снижение удельной энергии дробления ударно-центробежного измельчителя [Текст] / В.В. Труфанов, Е.С. Тарабрин, Р.А. Дружинин // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. - 2013. - № 2. - С. 277 - 281.

79. Алешкин, В.Р. Повышение эффективности процесса и технических средств механизации измельчения кормов [Текст]: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.20.01/ Алешкин Владимир Романович. - Санкт-Петербург, 1995. - 38 с.

80. Сергеев, Н.С. Центробежно-роторные измельчители фуражного зерна [Текст]: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.20.01/ Сергеев Николай Степанович. - Челябинск, 2008. - 38 с.

81. Мухин, В.А. К вопросу повышения эффективности измельчения зернофуражных культур [Текст] / В.А. Мухин, А.М. Пилипенко, А.В. Малышев // Научное обозрение. – 2015. - № 6. – С. 26 - 29.

82. Мухин, В.А. Модернизированный измельчитель кормового материала [Текст] / В.А. Мухин, Д.Э. Калмыков, А.С. Романов // Научная мысль. – 2015. - № 3. – С. 236 - 239.

83. Завражнов, А.И. Современные проблемы науки и производства в агроинженерии [Текст] / А.И. Завражнов. – СПб.: Лань, 2013. – 496 с.

84. Краснов, И.Н. Оценка опытного шестеренного гранулятора кормов [Текст] / И.Н. Краснов, А.В. Щербина, В.В. Скидело // Сельский Механизатор. - 2015. - № 7. - С 30 - 31.

85. Краснов, И.Н. Увлажнение зерна пшеницы перед помолом [Текст] / И.Н. Краснов, Ф.О. Перекрест // Сельский Механизатор. - 2011. - № 3. - С 29.

86. Гулевский, В.А. Результаты экспериментальных исследований производительности измельчителя стебельчатых кормов с шарнирно подвешенными комбинированными ножами и энергетики процесса измельчения [Текст] / В.А. Гулевский, А.А. Вертий, Д.Н. Бахарев, С.Ф. Вольвак // Роль аграрной науки в развитии АПК РФ. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 105-летию ФГБОУ ВО Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I. 2017. С. 220-226.

87. Гулевский, В.А. Математическое моделирование работы измельчителя кормов [Текст] / В.А. Гулевский, А.А. Вертий // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 3 (58). С. 120-128.

88. Гулевский, В.А. Усовершенствование технологии измельчения грубых стебельчатых кормов измельчителем с шарнирно подвешенными комбинированными ножами [Текст] / В.А. Гулевский, А.А. Вертий // Вестник

Воронежского государственного аграрного университета. 2019. Т. 12. № 1 (60). С. 73-81.

89. Коношин, И.В. Экспериментально-теоретическое исследование работы молотковой дробилки [Текст] / И.В. Коношин, Р.А. Булавинцев, А.В. Волженцев, А.П. Башкирев // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 9. С. 198-204.

90. Коношин, И.В. Влияние прямоугольной формы отверстий на энергоемкость измельчения зерна [Текст] / А.В. Черепков, И.В. Коношин // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. 2016. № 8. С. 5-10.

91. Коношин, И.В. Связь прямоугольной формы отверстий и энергоемкости измельчения зерна [Текст] / А.В. Черепков, И.В. Коношин // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2020. № 9. С. 33-39.

92. Купреенко, А.И. Изменение влагосодержания зерна при сушке [Текст] / Купреенко А.И., Панова Т.В., Панов М.В. // Инновации и технологический прорыв в АПК. Сборник научных трудов международной научно-практической конференции. 2020. С. 192-196.

93. Купреенко, А.И. Теоретическая оценка изменения влажности зерна в сушилке [Текст] / Купреенко А.И., Панова Т.В., Панов М.В. // Инновационная техника и технология. 2020. № 3 (24). С. 23-28.

94. Искендеров, Р.Р. Повышение эффективности процесса измельчения зерновых материалов в горизонтальной роторной дробилке [Текст]: дис. кандидата технических наук: 05.20.01 / Искендеров Рамиль Рашидович. – Ставропольский ГАУ.- Ставрополь, 2017.- 190 с.

95. Шумский, А.С. Повышение долговечности измельчителей зерновых материалов роторного типа [Текст]: дис. кандидата технических наук: 05.20.03 / Шумский Александр Сергеевич. – Ставропольский ГАУ.- Ставрополь. 2019.- 155 с.

96. Лебедев, А.Т. Анализ способов измельчения материалов / А.Т. Лебедев, Р.Р. Искендеров. – Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК: сборник научных статей. - Ставрополь: АГРУС. – 2013. – с. 221 - 224.

97. Завражнов, А.И. Биотехнические системы в агропромышленном комплексе [Текст] / А.И. Завражнов, П.И. Огородников. - М.: Университетская книга, 2011. - 412 с.

98. Искендеров, Р.Р. Совершенствование процесса измельчения зерна [Текст] / Р.Р. Искендеров, В.В. Очинский, А.Т. Лебедев, А.С. Шумский // Сельский механизатор. 2015. № 1. – С. 22 - 23.

99. Вендин, С.В. Измельчение пророщенного зерна для приготовления кормовых смесей [Текст] / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко. - Москва; Белгород: ООО «Центральный коллектор библиотек «БИБКОМ», 2017. - 137 с.

100. Пат. 2692559 Российская Федерация С1 МПК В02С 13/00 (2006.01), В02С 18/00 (2006.01), В02С 9/00 (2006.01), В02С 23/00 (2006.01), СПК В02С 13/00 (2019.05), В02С 18/00 (2019.05), В02С 9/00 (2019.05), В02С 23/00 (2019.05) Дробилка пророщенного высушенного зерна [Текст] / Вендин С.В., Саенко Ю.В., Казаков К.В., Семернина М.А. заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ. – № 2018135786, заявл. 09.10.2018, опубл. 25.06.2019 г. Бюл. № 18. 13 с.

101. Программа для ЭВМ № 2019616509 Расчёт конструктивных параметров ножей для измельчения пророщенного зерна [Текст] / Вендин С.В., Саенко Ю.В., Мартынов Е.А., Семернина М.А. заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ. - №2019616509 дата регистрации 23.05.2019. Бюллетень № 6.

102. Программа для ЭВМ № 2021619705 Расчёт затрат энергии на измельчение пророщенного зерна [Текст] / Вендин С.В., Саенко Ю.В., Мартынов Е.А., Семернина М.А. заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ им. В.Я. Горина. - №2021618778 дата регистрации 15.06.2021.

103. Вольвак, С.Ф. Теоретическое обоснование затрат мощности на измельчение стебельчатых кормов измельчителем с шарнирно подвешенными комбинированными ножами [Текст] / С.Ф. Вольвак, Д.Н. Бахарев, А.А. Вертий, Е.Е. Корчагина // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2017. – № 1 (13). – С. 23-32.

104. Вольвак, С.Ф. Теоретическое обоснование затрат мощности измельчителем стебельчатых кормов с шарнирно подвешенными комбинированными ножами [Текст] / С.Ф. Вольвак, Д.Н. Бахарев, А.А. Вертий // Проблемы и решения современной аграрной экономики: материалы XXI Международной научно-производственной конференции (п. Майский, 23 – 24 мая 2017 г.): в 2 т. Т. 1. – п. Майский: Издательство ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2017. – С. 32 - 33.

105. Бахарев, Д.Н. Бионические основы разработки и конструирования эффективных шипов молотильно-сепарирующих устройств для кукурузы [Текст] / Д.Н. Бахарев, С.Ф. Вольвак // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2017. – № 3(15). – С. 3-13.

106. Пат. 2493697 Российская Федерация С1 А01К 5/02 (2006.01) Технологическая линия для подготовки к скармливанию пророщенного зерна: [Текст] / С.А. Булавин, Ю.В. Саенко, А.Ю. Носуленко, В.А. Немыкин. Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Белгородская ГСХА. - № 2012102292; заявл. 23.01.2012; опубл. 27.09.2013, Бюл. № 27.

107. Вендин, С.В. К расчёту конструктивных параметров ножей для измельчения пророщенного зерна [Текст] / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко // Инновации в АПК: проблемы и перспективы: Майский, 2018. - № 1. - С. 16 - 31.

108. Вендин, С.В. Обоснование частоты вращения ножей дробилки пророщенного зерна [Текст] / С.В. Вендин, С.А. Булавин, Ю.В. Саенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2015. - № 4. С. 9 – 12.

109. Кавецкий, Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии [Текст] / Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. – М.: Колос, 2000. - 551 с.

110. Злочевский, В.Л. Исследование прочностных свойств зерновых материалов [Текст] / В.Л. Злочевский, А.П. Борисов. – СПб.: Лань, 2017. - 180 с.

111. Мельников, С.В. Экспериментальные основы теории процесса измельчения кормов на фермах молотковыми дробилками [Текст]: автореферат дис. доктора технических наук: 05.00.00 / Мельников Сергей Всеволодович. - Гос. аграрный ун-т.- Ленинград, 1969.- 576 с.

112. Вертий, А.А. Повышение эффективности процесса измельчения грубых стебельчатых кормов [Текст]: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.20.01 / Вертий Александр Анатольевич. – Воронежский гос. аграрный ун-т.- Воронеж, 2019. - 24 с.

113. Савиных, П.А. Исследования молотковой дробилки открытого типа с пневмосепаратором // Научно-технические проблемы механизации и автоматизации животноводства: Сб. науч. тр. [Текст] / Савиных П.А., Алешкин А.В., Турубанов Н.В., Медведев О.Ю. - Подольск, 2003. - Т. 12.-Ч.2.-С. 115-122.

114. Бурмитрова, М.Ф. Физико-механические свойства сельскохозяйственных растений [Текст] / М.Ф. Бурмитрова, Т.К. Комолькова, Н.В. Клемм и др. – М.: Сельскохозяйственная литература, 1956. – 343 с.

115. Швецова, М.Р. Пророщенное и экструдированное зерно пшеницы, ячменя и кукурузы в кормосмесях для дойных коров [Текст] / М.Р. Швецова, Н.Н. Швецов, Г.С. Походня, М.Ю. Ивлев. – Белгород: Политерра. – 2019. – 125 с.

116. Вендин, С.В. Обоснование конструктивных параметров ножей при резании плоского слоя продукта [Текст] / С.В. Вендин, В.А. Самсонов, Ю.В. Саенко, М.А. Семернина // Вестник всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства № 4 (24) 2019. - с. 101 - 104.

117. Вендин, С.В. Оптимизация конструктивных параметров ножей для измельчения пророщенного зерна / С.В. Вендин, В.А. Самсонов, Ю.В. Саенко, М.А. Семернина // Инновации в АПК: проблемы и перспективы: Майский, 2020. - № 2. - С. 26 - 37.

118. Долгов, И.А. Уборочные сельскохозяйственные машины (конструкция, теория, расчет) [Текст] / И.А. Долгов. – Ростов-на-Дону, 2003. – 706 с.

119. Трубилин, Е.И. Машины для уборки сельскохозяйственных культур (конструкция, теория, расчет) [Текст] / Е.И. Трубилин. – 2-е изд. перераб. и дополн. - КГАУ, Краснодар, 2010. – 325 с.

120. Кленин, Н.И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины [Текст] / Н.И. Кленин, В.Г. Егоров. – М.: КолосС, 2005. – 464 с.

121. Резник, Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов [Текст] / Н.Е. Резник. – М.: Машиностроение, 1975. – 311 с.

122. Кузнецов, В.В. Нормы и нормативы в животноводстве: научно-методическое пособие [Текст] / В.В. Кузнецов, А.И. Баранников, В.Я. Кавардаков и др. – Ростов-на-Дону, 2008. – 400с.

123. Горюшинский, В.С. Совершенствование резания корнеплодов с обоснованием параметров измельчителя [Текст]: автореф. дис. кандидата технических наук: 05.20.01 / Горюшинский Валентин Сергеевич. – Пензенская ГСХА. - Пенза, 2004. - 20 с.

124. Алешкин, В.Р. Повышение эффективности процесса и технических средств механизации измельчения кормов [Текст]: автореферат дис. доктора технических наук: 05.20.01 / Алешкин, Владимир Романович. - Гос. аграрный ун-т.- Санкт-Петербург, 1995.- 38 с.

125. Вараксин, А.В. Исследование процесса измельчения концентрированных кормов: автореферат дис. кандидата технических наук [Текст]: 05.20.01 / Вараксин Андрей Викторович. – Дальневосточный гос. аграрный ун-т. - Благовещенск, 2005. - 24 с.

126. Федоренко, И.Я. Энергетические соотношения при ударном измельчении зерна [Текст] / И.Я. Федоренко, А.М. Левин// Механизация и электрификация. - 2002. - № 11. С. 32 - 33.

127. Гулевский, В.А. Математическое моделирование работы измельчителя кормов [Текст] / В.А. Гулевский, А.А. Вертий // Вестник Воронежского ГАУ: Воронеж, 2018. - № 3. - С. 120 - 129.

128. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики. Часть I Статика, кинематика [Текст] / А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. – М.: Высшая Школа, 1966. – 439 с.

129. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики. Часть II Динамика [Текст] / А.А. Яблонский. – М.: Высшая Школа, 1966. – 411 с.

130. Лурье, А.И. Теория упругости [Текст] / А.И. Лурье. – М.: Наука, 1970. – 939 с.

131. Гулевский, В.А. Краткий курс теоретической механики: учеб. пособие [Текст] / В.А. Гулевский, В.П., Шацкий. – Воронеж: ФГОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2009. – 178 с.

132. Шипачев, В.С. Высшая математика: учебник [Текст] / В.С. Шипачев. – М.: ИНФРА-М, 2009. – 479 с.

133. Фирганг, Е. В. Руководство к решению задач по курсу общей физики [Текст] / Е.В. Фирганг. Учебное пособие. 4-е изд., испр. — СПб.: Лань, 2009. - 352 с.

134. Волков, Е.А. Численные методы [Текст] / Е.А. Волков. — М.: Наука, 1987. - 248 с.

135. Блинова, Е.И. Планирование и организация эксперимента [Текст] / Е.И. Блинова. – Минск: БГТУ, 2010. – 130 с.

136. Реброва, И.А. Планирование эксперимента [Текст] / И.А. Реброва. – Омск: СибАДИ, 2010 – 105 с.

137. Ермакова, С.М. Планирование эксперимента [Текст] / С.М. Ермакова. – М.: Наука, 1983. – 392 с.

138. Юдин, М.И. Планирование эксперимента и обработка его результатов [Текст] / М.И. Юдин. – Краснодар: КГАУ, 2004. – 239 с.

139.ГОСТ 13586.3—83. Зерно. Правила приемки и методы отбора проб. [Текст]. 1983. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 11 с.

140.Хайлис, Г.А. Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных [Текст] / Г.А. Хайлис, М.М. Ковалев. – М.: Колос, 1994. – 169 с.

141.Быков, В.П. Методика проектирования объектов новой техники [Текст] / В.П. Быков. – М.: Высшая школа, 1990. – 165 с.

142.ГОСТ 28098—89. Дробилки кормов молотковые. – Введ. 1989-01-01 [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 4 с.

143.Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента [Текст]/ Н. Джонсон. – М.: Мир, 1981. – 520 с.

144.Даффи, Р. Геометрическое программирование [Текст] / Р.Даффи, Э.Питерсон, К. Зенер. – М.: Мир. – 1972. – 313 с.

145.Монтгомери, Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных [Текст] / Д.К. Монтгомери. – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.

146.Грановский, В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях [Текст] / Грановский В.А., Т.Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. - 290 с.

147.Рязанова, Л.Г. Основы статистического анализа результатов исследований в садоводстве [Текст] / Л. Г. Рязанова, А. В. Проворченко, И. В. Горбунов. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – 61 с.

148.Семернина, М.А. Дробилка зерна с комбинированной дробильной камерой [Текст] / С.В. Вендин, В.А., Ю.В. Саенко, М.А. Семернина // Инновации в АПК: проблемы и перспективы: Майский, 2021. - № 1. - с. 27 - 39.

149.Семернина, М.А. Дробилка для измельчения пророщенного зерна [Текст] / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, М.А. Семернина // Сельский механизатор, 2021. - № 1. – С. 18 - 20.

150.Семернина, М.А. Дробилка пророщенного зерна на витаминный корм животным / Ю.В. Саенко, М.А. Семернина // Материалы национальной

международной научно-производственной конференции «Наука аграрному производству: актуальность и современность» (25 мая 2018 года). - Майский: Издательство ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2018. - С. 117 - 118.

151. Семернина, М.А. Измельчитель пророщенного зерна/ М.А. Семернина // Материалы XXIII международной научно-производственной конференции «Инновационные решения в аграрной науке – взгляд в будущее» (28 - 29 мая 2019 года): в 2 т. Том 1. п. – Майский: Издательство ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2019. – с. 102 - 103.

152. Семернина, М.А. Способы подготовки зерновых кормов к скармливанию / М.А. Семернина // Материалы Национальной (всероссийской) научно-практической конференции с международным участием «АГРОИНЖЕНЕРИЯ В XXI ВЕКЕ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ» посвященной 30-летию инженерного факультета им. А.Ф. Пономарева. – п. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2020. – 223 - 226 с.

153. Семернина, М.А. Обзор дробилок пророщенного зерна / Ю.В. Саенко, М.А. Семернина // Материалы Национальной научно-практической конференции «Инновационные решения в агроинженерии в XXI веке». Решения проблем взаимодействия науки и бизнеса п. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2021. – с. 163 - 167.

154. Семернина, М.А. Новое в измельчении пророщенного зерна [Текст] / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, М.А. Семернина // Механизация и автоматизация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве: материалы национальной научно-практической конференции. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2020. – с. 307 - 311.

155. Семернина, М.А. Новое в измельчении неоднородных материалов [Текст] / М.А. Семернина // Материалы XXIV Международной научно-производственной конференции «Инновационные решения в аграрной науке – взгляд в будущее» (27 - 28 мая 2020 года): в 2 т. Том 1. п. - Майский: Издательство ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2020. – с. 69 - 70.

156. Семернина, М.А. Исследование эффективности применения кормовых смесей с использованием пророщенного зерна в рационах свиней на откорме [Текст] / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, В.Ю. Страхов, М.А. Семернина // Вестник Курской ГСХА. – 2019. - №3. – С. 80 - 86.

157. Ковалев, В.В. Методы оценки инвестиционных проектов [Текст] / В.В. Ковалев. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 144 с.

158. Драгайцева, В.И. Методика экономической оценки технологий и машин в сельском хозяйстве [Текст] / В.И. Драгайцева. Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства. - Москва, 2010. – 146 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11)

2 692 559⁽¹³⁾ C1

(51) МПК
B02C 13/00 (2006.01)
B02C 18/00 (2006.01)
B02C 9/00 (2006.01)
B02C 23/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B02C 13/00 (2019.05); *B02C 18/00* (2019.05); *B02C 9/00* (2019.05); *B02C 23/00* (2019.05)

(21)(22) Заявка: 2018135786, 09.10.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
09.10.2018Дата регистрации:
25.06.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 09.10.2018

(45) Опубликовано: 25.06.2019 Бюл. № 18

Адрес для переписки:

308503, Белгородская обл., Белгородский р-н,
п. Майский, ул. Вавилова, 24, ФГБОУ ВО
Белгородский ГАУ, Крючковой Н.Е.

(72) Автор(ы):

Вендин Сергей Владимирович (RU),
Саенко Юрий Васильевич (RU),
Казаков Константин Владимирович (RU),
Семернина Марина Александровна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Белгородский государственный
аграрный университет имени В.Я. Горина"
(RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2493918 C1, 27.09.2013. RU
2072262 C1, 27.01.1997. RU 2419490 C1,
27.05.2011. RU 2415715 C1, 10.04.2011. WO
2014/092659 A2, 19.06.2014. EP 0261913 A2,
30.03.1988.

(54) Дробильная установка пророщенного высушенного зерна

(57) Реферат:

Дробильная установка пророщенного высушенного зерна относится к сельскому хозяйству, в частности к оборудованию для измельчения пророщенного высушенного зерна с ростками и корешками на витаминный корм для животных и птиц. Дробильная установка содержит загрузочный бункер (1), вентилятор (35), циклон (45), фильтровальный рукав (48), комбинированную дробильную камеру (3), шлюзовый затвор (50), электродвигатель (34). Комбинированная дробильная камера (3) состоит из внутреннего барабана (6) с молотками (7), внешнего барабана (8) с ножами (9), при этом внешний барабан (8) с ножами (9) установлен с возможностью вращения относительно вала (12) в противоположном направлении. Внутренний барабан (6) выполнен соосным с внешним барабаном (8). С левой стороны на валу электродвигателя (34) установлен первый

ведущий шкив, предназначенный для передачи крутящего момента посредством ременной передачи на первый ведомый шкив. С правой стороны на валу электродвигателя (34) установлена ведущая шестерня, выполненная с зацеплением с ведомой шестерней, на валу которой установлен второй ведущий шкив, предназначенный для передачи крутящего момента посредством ременной передачи на второй ведомый шкив. Между внутренним (6) и внешним (8) барабанами установлено внутреннее решето (13), при этом внутреннее решето (13) установлено неподвижно относительно внешнего барабана (8) с возможностью совместного с ним вращения. Дробильная установка обеспечивает повышение производительности процесса дробления за счет применения дробильных барабанов, вращающихся навстречу друг другу. 4 ил.

RU 2 692 559 C 1

RU 2 692 559 C 1

Приложение Б

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU

2019616509

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2019616509 Дата регистрации: 23.05.2019 Номер и дата поступления заявки: 2019615444 14.05.2019 Дата публикации: 23.05.2019 Контактные реквизиты: (4722) 39-21-52, факс (4722) 39-22-62, kryuchkova-bsaa@mail.ru	Авторы: Вендин Сергей Владимирович (RU), Саенко Юрий Васильевич (RU), Мартынов Евгений Алексеевич (RU), Семернина Марина Александровна (RU) Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина» (RU)
---	--

Название программы для ЭВМ:

Расчёт конструктивных параметров ножей для измельчения пророщенного зерна

Реферат:

Программа предназначена для расчёта конструктивно-режимных параметров режущего аппарата для измельчения пророщенного высушенного зерна. Обеспечивает расчёт угла заточки ножа в зависимости от свойств измельчаемого материала, а также строит график зависимости толщины лезвия ножа от высоты сжимаемого слоя материала.

Язык программирования: Visual Basic

Объем программы для ЭВМ: 55 Кб

Приложение В

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU

2021619705

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2021619705

Дата регистрации: **15.06.2021**

Номер и дата поступления заявки:
2021618778 04.06.2021

Дата публикации: **15.06.2021**

Контактные реквизиты:
Тел.: (4722) 39-21-52, факс: (4722)
39-22-62, e-mail:
rusnak_iv@bsaa.edu.ru

Авторы:

**Вендин Сергей Владимирович (RU),
Саенко Юрий Васильевич (RU),
Мартынов Евгений Алексеевич (RU),
Семернина Марина Александровна (RU)**

Правообладатель:

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный аграрный
университет имени В.Я. Горина» (RU)**

Название программы для ЭВМ:

Расчет затрат энергии на измельчение пророщенного зерна

Реферат:

Программа предназначена для расчета затрат энергии на процесс измельчения пророщенного высушенного зерна. Отдельно производится расчет для измельчения зерновки и ростков с учетом их начальных и конечных размеров, а также строит график зависимости затрат энергии на измельчение зерновки и ростков от их степени измельчения. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК; ОС: Windows.

Язык программирования: Visual Basic

Объем программы для ЭВМ: 52 КБ

Приложение Г
(справочное)

ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,934222785
R-квадрат	0,872772212
Нормированный R-квадрат	0,768676748
Стандартная ошибка	0,090596244
Наблюдения	21

Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	9	0,619344098	0,068816011	8,384344367	0,00086625
Остаток	11	0,090284474	0,008207679		
Итого	20	0,709628571			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>	<i>Нижние 90,0%</i>	<i>Верхние 90,0%</i>
Y-пересечение	-19,4986394	10,05307473	-1,799435936	0,099409411	-40,216532	4,03680435	-40,216532	4,0368044
Переменная X 1	0,000731821	0,001635984	0,447327662	0,663318923	-0,002869	0,0043326	-0,002869	0,0043326
Переменная X 2	9,975629821	8,956551572	1,113780202	0,2891187	-9,7376073	29,6888669	-9,7376073	29,688867
Переменная X 3	0,567238686	0,270315559	2,098431512	0,059762374	-0,0277218	1,16219922	-0,0277218	1,1621992
Переменная X 4	1,67285E-07	1,7681E-07	0,946128047	0,364403443	-2,219E-07	5,5644E-07	-2,219E-07	5,564E-07
Переменная X 5	-0,000272801	0,000858011	-0,317945739	0,756480441	-0,0021613	0,00161567	-0,0021613	0,0016157
Переменная X 6	-0,65777E-05	2,00192E-05	-1,327610145	0,211199718	-7,064E-05	1,7484E-05	-7,064E-05	1,748E-05
Переменная X 7	4,754642964	4,566776244	1,041137711	0,320154547	-5,2967638	14,8060497	-5,2967638	14,80605
Переменная X 8	-0,154560201	0,136028513	-1,13623385	0,280007224	-0,4539569	0,14483654	-0,4539569	0,1448365
Переменная X 9	-0,003532234	0,002000656	-1,765537667	0,105178414	-0,0079356	0,00087118	-0,0079356	0,0008712

Приложение Д
(справочное)

ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,940866084
R-квадрат	0,885228988
Нормированный R-квадрат	0,791325432
Стандартная ошибка	0,086745633
Наблюдения	21

Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	9	0,638427146	0,07093635	9,427001821	0,00051195
Остаток	11	0,082772854	0,007524805		
Итого	20	0,7212			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>	<i>Нижние 90,0%</i>	<i>Верхние 90,0%</i>
Y-пересечение	1,077832622	1,36258479	0,791020588	0,445652636	-1,9211963	4,07686152	-1,9211963	4,0768615
Переменная X 1	-0,000849818	0,000899432	-0,944837988	0,365033086	-0,0028295	0,00112982	-0,0028295	0,0011298
Переменная X 2	0,032607295	0,038754453	0,841381901	0,418049791	-0,0526907	0,11790527	-0,0526907	0,1179053
Переменная X 3	0,102944549	0,034513898	2,982698418	0,012459263	0,02697997	0,17890913	0,02697997	0,1789091
Переменная X 4	2,03247E-07	1,69295E-07	1,20054739	0,255142261	-1,694E-07	5,7586E-07	-1,694E-07	5,759E-07
Переменная X 5	-3,83118E-06	1,17363E-05	-0,326437955	0,750219674	-2,966E-05	2,2E-05	-2,966E-05	2,2E-05
Переменная X 6	-1,69327E-05	9,58416E-06	-1,766738224	0,104969025	-3,803E-05	4,1619E-06	-3,803E-05	4,162E-06
Переменная X 7	0,001032812	0,000892383	1,15736501	0,271637165	-0,0009313	0,00299693	-0,0009313	0,0029969
Переменная X 8	-0,001097404	0,000930335	-1,179579549	0,263050043	-0,0031451	0,00095025	-0,0031451	0,0009502
Переменная X 9	-0,001117615	0,000478906	-2,333685467	0,039610895	-0,0021717	-6,3551E-05	-0,0021717	-6,355E-05

Приложение Е

Акт производственной проверки Дробилки пророщенного зерна

СОГЛАСОВАНО

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной работе и
инновациям

Глава крестьянского (фермерского)
хозяйства

ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ

Юрьев А. Ю.

им. В.Я. Горина

«25» 12 2020 г.

Дорофеев А.Ф.

«25» 12 2020 г.

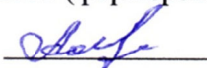
Акт производственной проверки Дробилки пророщенного зерна

Мы, Глава крестьянского (фермерского) хозяйства Юрьев А.Ю. и разработчики Вендин С.В., Саенко Ю.В., Семернина М.А. составили настоящий акт в том, что дробилка пророщенного высушенного зерна патент на изобретение Российской Федерации RU 2692559 проходила производственные испытания с июня месяца 2020 года по декабрь 2020 года на крестьянском (фермерском) хозяйстве Белгородской области.

Разработанная дробилка состоит из двух загрузочных бункеров, двух электрических приводов, дробильной камеры в которой соосно размещены два измельчающих барабана.

По результатам производственной проверки заключаем, что представленная дробилка надежна в работе и выполняет свои технологические функции дробления пророщенного зерна с требуемым качеством.

Представитель крестьянского (фермерского) хозяйства:

Главный инженер Юрьев Ю.А. 

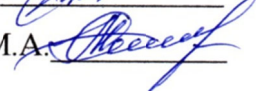
Представители разработчика

От Белгородского ГАУ

им. В.Я. Горина

Вендин С.В. 

Саенко Ю.В. 

Семернина М.А. 

Приложение Ж

Акт производственной проверки Дробильной установки пророщенного высушенного зерна

СОГЛАСОВАНО

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной работе и
инновациям

Глава крестьянского (фермерского)
хозяйства

ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ

им. В.Я. Горина

Дорофеев А.Ф.

Юрьев А. Ю.

« 14 » 20 2021

« 14 » 20 2021



АКТ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРОВЕРКИ ДРОБИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПРОРОЩЕННОГО ВЫСУШЕННОГО ЗЕРНА

1. Краткая характеристика проблемы и необходимость использования дробилки для пророщенного зерна

В процессе эволюции животные и птица приспособились к поеданию зеленых кормов. В настоящее время свиней и птицу выращивают безвыгульно в помещениях и выдают только комбикорма. Пророщенное зерно является естественным источником витаминов, макро и микроэлементов. При выдаче пророщенного зерна отдельно от корма физически развитые животные в первую очередь поедают сладкие ростки, а слабым животным зеленых ростков не достается.

Чтобы пророщенное зерно между животными распределить равномерно, необходимо его распределить в комбикорме. Для того чтобы перемешивание было высокого качества необходимо, обеспечить одинаковые геометрические размеры комбикорма и пророщенного зерна. Пророщенное зерно состоит из зерновки и зеленых ростков. Начальные размеры пророщенного зерна с ростками составляют 20-30 мм, размер измельченных частиц должен составлять 0,9-1,4 мм. Перед измельчением пророщенное зерно необходимо высушить до влажности 14%. Для измельчения пророщенного зерна, запатентована, разработана и изготовлена дробилка. Измельчение пророщенного зерна осуществляют в дробильной камере при помощи двух типов рабочих органов. Зерно дробят молотками, а ростки режут ножами. Рабочие органы закреплены на двух измельчающих барабанах, установленных соосно.

2. Цель испытаний

Целью испытаний является проверка работоспособности дробилки и оценка конечных размеров пророщенного зерна.

3. Объект испытаний

Объектом производственных испытаний является дробилка пророщенного зерна.

4. Методика проведения испытаний

Производственные испытания проводили с июня 2020 года по декабрь 2020 года в крестьянском (фермерском) хозяйстве Белгородской области.

Техническая характеристика дробилки пророщенного зерна представлена в таблице 1.

Таблица 1. Техническая характеристика дробилки пророщенного зерна

№ п/п	Наименование параметров	Единицы измерения	Численные значения
1	Количество измельчающих барабанов		2
2	Частота вращения дробильного барабана	мин ⁻¹	2550-2580
3	Частота вращения ножевого барабана	мин ⁻¹	2820-2840
4	Производительность	т/ч	0,51-0,525
5	Суммарная мощность электродвигателей	кВт	8
6	Размеры габаритные	мм	1200*1650*1030
7	Масса	кг	380

Работу предложенной молотковой дробилки проводили следующим образом. После проращивания зерно сушили до влажности 14%. Затем высушенное пророщенное зерно подавали в дробильную установку (рисунки 1, 2). Пророщенное зерно загружали в бункер и открытием дозирующей заслонки осуществляли его подачу в дробильную камеру. Схема управления электроприводом рабочих органов дробилки показана на рисунке 3.

В процессе работы зерновая масса взаимодействовала с ножами и молотками, в результате чего осуществлялось её измельчение. Удаление измельченной массы производилось через решета.

Потребляемую электродвигателями силу тока и напряжение в сети измеряли при помощи амперметра.

Для определения крупности частиц пророщенного высушенного измельченного зерна применили «рассев» используя решета с круглыми отверстиями диаметром 2,5; 2,0; 1,5; 1,0; 0,5 мм. Результаты качества измельчения и распределения частиц на фракции представлены в таблицах 2, 3.

Таблица 2 – Размер частиц пророщенного высушенного измельченного ячменя

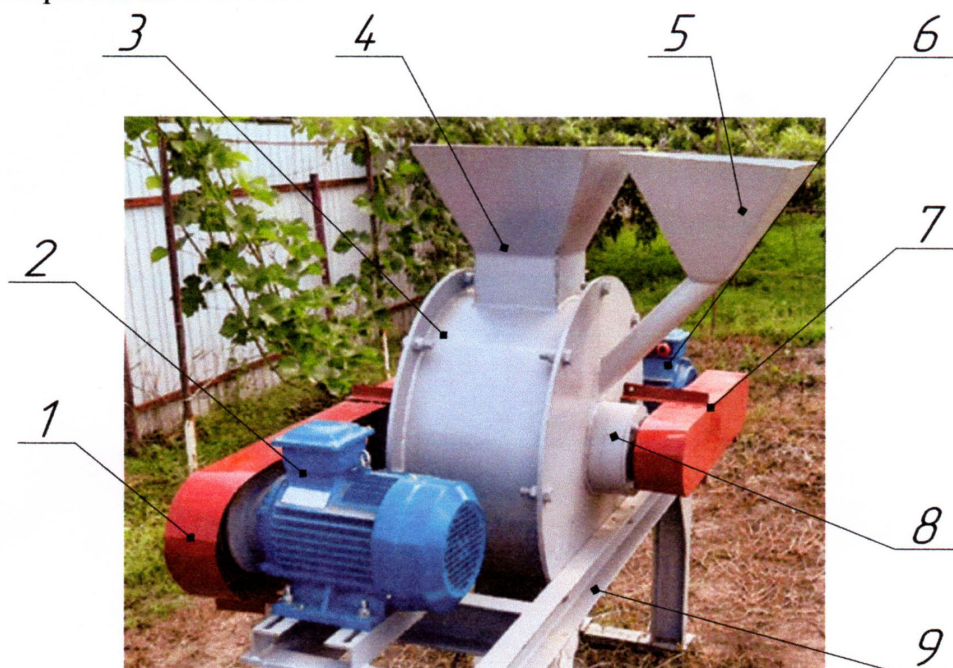
Диаметр отверстий решета, мм	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Процентное содержание частиц	3,20	47,20	45,00	1,40	1,90

Таблица 3 – Размер частиц пророщенной высушенной измельченной пшеницы

Диаметр отверстий решета, мм	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Процентное содержание частиц	2,90	44,20	47,40	1,50	1,85

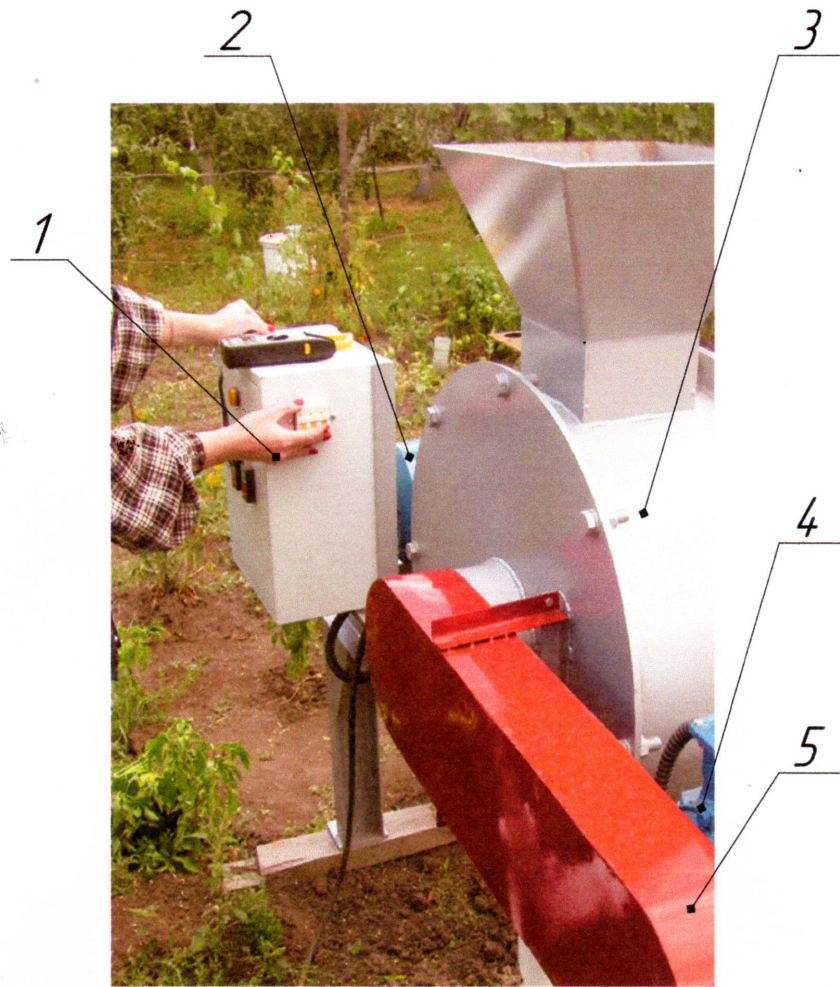
Электробезопасность при эксплуатации дробилки пророщенного зерна осуществляли с помощью заземляющего устройства.

На рисунках 1, 2 представлена дробильная установка с двумя соосно расположенными измельчающими барабанами в дробильной камере. Патент на изобретение: RU 2692559.



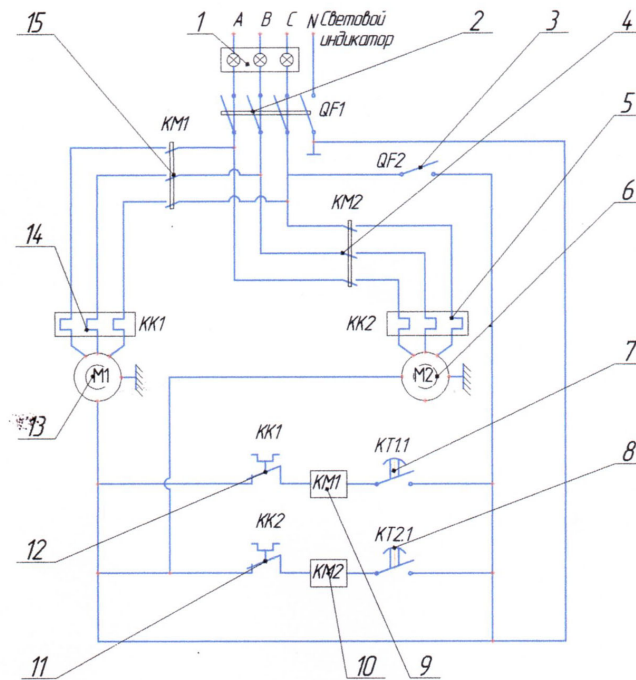
1 – Кожух защитный; 2 – электродвигатель; 3 – камера измельчения; 4 – бункер центральный; 5 – бункер боковой; 6 – электродвигатель; 7 – кожух защитный; 8 – корпус подшипника; 9 – рама;

Рисунок 1 - Экспериментальная дробильная установка для пророщенного зерна. Патент № RU 2692559



1 – Шкаф управления; 2 - электродвигатель; 3 - камера измельчения; 4 - электродвигатель;
5 – кожух ременной передачи

Рисунок 2 - Экспериментальная дробильная установка
для пророщенного зерна. Патент № RU 2692559



1 - Световой индикатор; 2, 3 - пакетный выключатель; 4, 15 – контактор; 5, 14 – тепловое реле; 6, 13 – электродвигатель; 7, 8 – контакты; 9, 10 – катушка; 11, 12 – контакты;
Рисунок 3 - Схема управления дробилкой пророщенного зерна

5. Результаты и заключение

В ходе производственной проверки установили:

1. Предложенная двухбарабанная дробилка, с соосно расположенными барабанами обеспечивает выполнение следующих технологических операций:

- накопление пророщенного зерна в бункере;
- загрузку дробильной камеры;
- измельчение зерновок осуществляют молотками, а ростков ножами до конечных размеров 0,9-1,4 мм;
- удаление измельченного материала из дробильной камеры.

2. Экспериментально определены:

- оптимальные конструктивные и режимные параметры ножевого барабана:

n_H - частота вращения ножевого барабана, 2820-2840 мин⁻¹;

b_H - расстояние между ножами, 12 - 14 мм;

γ_H - угол заточки лезвия ножа, 14 - 15°.

- оптимальные конструктивные и режимные параметры дробильного барабана:

D - диаметр дробильного барабана, 0,6-0,62 м;

h_M - толщина молотка, 0,002-0,003 м;

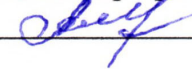
n_D - частота вращения дробильного барабана, 2550-2680 мин⁻¹.

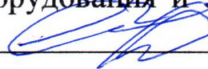
Заключение

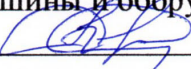
В результате проведенных испытаний установили, что предложенная дробилка с двумя соосно расположенными барабанами выполняла технологический процесс измельчения пророщенного зерна. Начальные размеры пророщенного зерна составляли 20-30 мм, после измельчения размеры частиц составили 0,9-1,4 мм, что соответствует зоотехническим требованиям.


За время производственных испытаний поломок дробилки не установлено.

Состав комиссии:

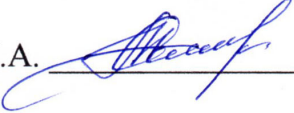
Главный инженер крестьянского (фермерского) хозяйства
Юрьев Ю. А. 

Заведующий кафедрой «Электрооборудования и электротехнологии в АПК», д.т.н., профессор Вендин С.В. 

Заведующий кафедрой «Машины и оборудование в агробизнесе»
доцент, к.т.н. Макаренко А.Н. 

Профессор кафедры «Машины и оборудование в агробизнесе»
доцент, д.т.н. Саенко Ю.В. 

Исполнитель:

Преподаватель кафедры
общеобразовательных дисциплин Семернина М.А. 

Приложение 3

Акт Испытаний экспериментальной дробилки

СОГЛАСОВАНО

И.о. проректора по научной работе и

инновациям

ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ

им. В.Я.Торина

Дорофеев А.Ф.

« 12 »

20

г

УТВЕРЖДАЮ

Глава крестьянского
(фермерского) хозяйства

Юрьев А.Ю.

« 12 »

20

АКТ

Испытаний экспериментальной дробилки

Краткая характеристика устройства

Экспериментальная дробилка (патент на изобретение RU 2692559) предназначена для измельчения высушенного пророщенного зерна до конечного размера частиц 0,9-1,4 мм.

Дробилка высушенного пророщенного зерна состоит из следующих взаимосвязанных частей: рамы с размещенными на ней электродвигателями, дробильной камеры внутри которой размещены внешний и внутренний барабаны с молотками и ножами, двух загрузочных бункеров и выгрузного патрубка, шкафа управления.

В дробилке есть возможность изменения частоты вращения барабанов, замены решет, отключения одного из измельчающих барабанов независимо от другого.

Цель испытаний

Проверка работоспособности дробилки высушенного пророщенного зерна. Оценка качества измельчения продукта, надежности конструкции, определение технической характеристики.

Объект испытаний

Испытания проводились на изготовленной двухбарабанной дробилке пророщенного высушенного зерна.

Таблица 1 – Основные технические параметры дробилки пророщенного высушенного зерна

Наименование	Показатели
1 Количество измельчающих барабанов	2
2 Частота вращения дробильного барабана, мин ⁻¹	2550-2580
3 Частота вращения ножевого барабана, мин ⁻¹	2820-2840
4 Производительность, т/ч	0,51-0,525
5 Суммарная мощность электродвигателей, кВт	8
6 Размеры габаритные, мм	1200*1650*1030
7 Масса, кг	380

Методика проведения испытаний

Зерно проращивали в течение пяти суток. Затем выполняли его сушку, до конечной влажности 14-15%. После этого полученный материал подвергали измельчению на экспериментальной дробилке.

Результаты измельчения пророщенного зерна измеряли после прохождения пророщенным зерном последовательно двух ступеней измельчения – ножевой барабан и барабан с молотками.

Для определения крупности частиц пророщенного высушенного измельченного зерна применили «рассев» используя решета с круглыми отверстиями диаметром 2,5; 2,0; 1,5; 1,0; 0,5 мм.

На рисунке 1 представлен средний размер частиц измельченного пророщенного зерна.



Рисунок 1 – Средний размер частиц измельченного пророщенного зерна

Каждую кормовую добавку: пророщенную высушенную пшеницу и ячмень измельчали отдельно общая мощность электродвигателей составляла 8 кВт, в зависимости от степени измельчения энергоёмкость составила от 6,7 до 8,3 кВт ч/т.

В таблицах 2, 3 представлен размер частиц пророщенного высушенного измельченного ячменя и пшеницы соответственно.

Таблица 2 – Размер частиц пророщенного высушенного измельченного ячменя

Диаметр отверстий решета, мм	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Процентное содержание частиц	3,20	47,20	45,00	1,40	1,90

Графическая интерпретация распределения частиц измельченного пророщенного зерна ячменя по решетам представлена на рисунке 2.

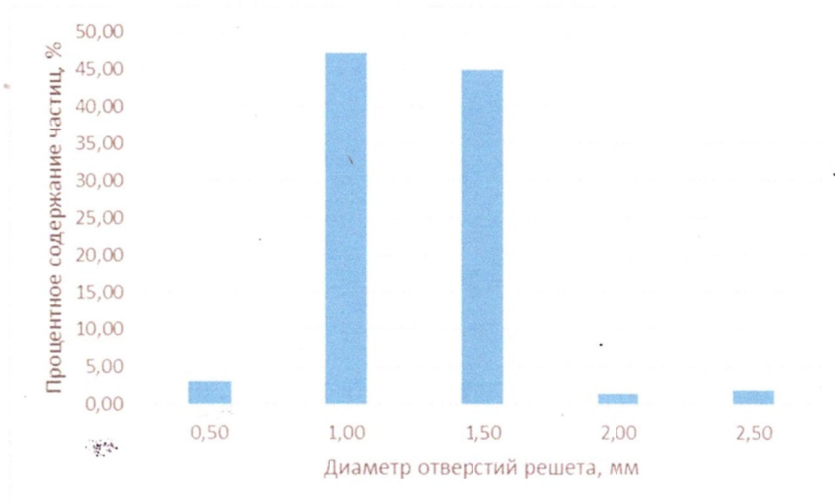


Рисунок 2 - Распределение частиц измельченного пророщенного зерна ячменя по решетам

Таблица 3 – Размер частиц пророщенной высушенной измельченной пшеницы

Диаметр отверстий решета, мм	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Процентное содержание частиц	2,90	44,20	47,40	1,50	1,85

Графическая интерпретация распределения частиц измельченного пророщенного зерна пшеницы по решетам представлена на рисунке 3.

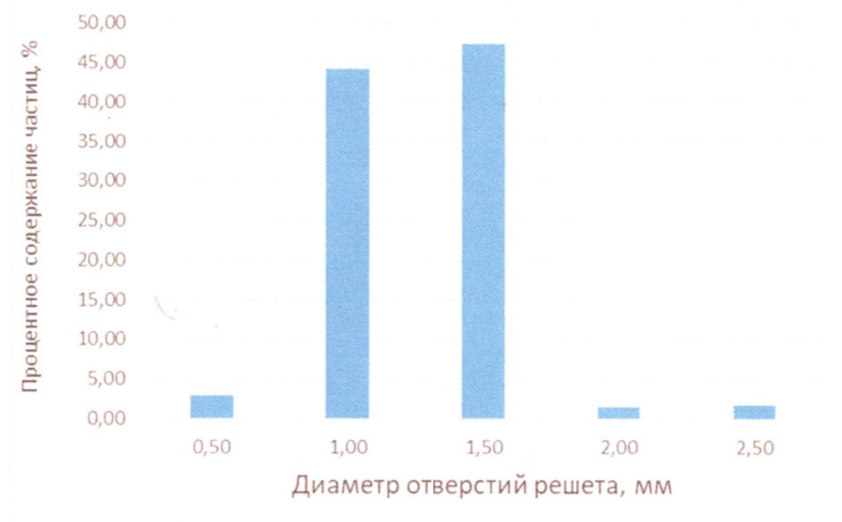


Рисунок 3 - Распределение частиц измельченного пророщенного зерна пшеницы по решетам

5. Результаты и заключение

При выполнении производственной проверки было установлено:

1. Разработанная двухбарабанная дробилка, с соосно расположенными барабанами обеспечивает выполнение следующих технологических операций: накопление пророщенного зерна в бункере; загрузку дробильной камеры; измельчение продукта, удаление измельченного материала из дробильной камеры. Измельчение зерновок осуществляют молотками, а ростков ножами до конечных размеров 0,9-1,4 мм;
2. Экспериментально определены:
 - оптимальные конструктивные и режимные параметры ножевого барабана: n_H - частота вращения ножевого барабана, 2820-2840 мин⁻¹;
 b_H - расстояние между ножами, 12 - 14 мм;
 γ_H - угол заточки лезвия ножа, 14 - 15°.
 - оптимальные конструктивные и режимные параметры дробильного барабана:
 - D - диаметр дробильного барабана, 0,6-0,62 м;
 - h_M - толщина молотка, 0,002-0,003 м;
 - n_D - частота вращения дробильного барабана, 2550-2680 мин⁻¹.

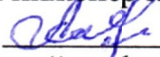
Заключение

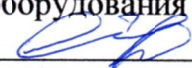
Дробилка пророщенного высушенного зерна показала работоспособность и надежность, при выполнении технологического процесса, что позволило определить оптимальные режимные параметры.


Два измельчающих барабана с рабочими органами: молотками и ножами установлены соосно (патент на изобретение RU 2692559) позволили измельчить массу, при этом размеры частиц 0,9-1,4 мм что соответствует зоотехническим требованиям.

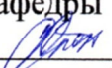
За время производственных испытаний поломок дробилки не установлено.

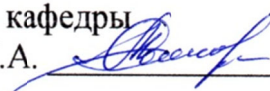
Состав комиссии:

Главный инженер крестьянского (фермерского) хозяйства
Юрьев Ю.А. 

Заведующий кафедрой «Электрооборудования и электротехнологии в АПК», д.т.н., профессор Вендин С.В. 

Заведующий кафедрой «Машины и оборудование в агробизнесе»
доцент, к.т.н. Макаренко А.Н. 

Профессор кафедры «Машины и оборудование в агробизнесе», д.т.н.
Саенко Ю.В. 

Представитель разработчика преподаватель кафедры
общеобразовательных дисциплин Семернина М.А. 

Приложение И

Справка об экономической эффективности использования дробилки пророщенного зерна

СОГЛАСОВАНО

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной работе и
инновациям

Глава крестьянского (фермерского)
хозяйства

ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ

Юрьев А. Ю.
«02» 2020 г.

им. В.Я. Горина

Дорофеев А.Ф.

12 2020 г.



Справка об экономической эффективности использования дробилки пророщенного зерна

Настоящей справкой подтверждается то, что на основе проведенной экономической оценки производственных испытаний дробилки пророщенного высушенного зерна патент на изобретение RU 2692559 вытекают следующие выводы:

1 По результатам производственных испытаний при измельчении пророщенного зерна ячменя и пшеницы производительность дробильной установки для размера частиц 0,9-1,4 мм составила 510-525 кг/ч.

2 На основе проведенных технико-экономических расчетов установлено, что при общей мощности электродвигателей 8 кВт удельные затраты при измельчении пророщенного зерна до размеров частиц 0,9-1,4 мм составили 820-850 руб./т. С повышением производительности дробилки от 510-525 кг/ч, до 4500 кг/ч удельные эксплуатационные затраты снижаются до 124,17 руб./т.

Представитель крестьянского (фермерского) хозяйства:

Главный инженер Юрьев Ю.А. Юрьев

Представители разработчика

От Белгородского ГАУ

им. В.Я. Горина

Вендин С.В. Вендин

Саенко Ю.В. Саенко

Семернина М.А. Семернина