

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский
федеральный научный центр агробιοтехнологий Российской академии наук
(СФНЦА РАН)

На правах рукописи



ЛЕВИН АЛЕКСЕЙ МИХАЙЛОВИЧ

**РАЗВИТИЕ МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ПРАКТИЧЕСКИХ
ОСНОВ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КОРМОВОГО
ЗЕРНА**

Специальность 4.3.1 – Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:
чл.-корреспондент РАН,
доктор технических наук,
профессор Н. М. Иванов

Новосибирск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	15
1.1 Роль зерновых культур в кормлении сельскохозяйственных животных	15
1.2 Требования к процессу измельчения кормового зерна	16
1.3 Основные закономерности измельчения твердых тел	22
1.4 Особенности технологических свойств кормового зерна и механизмы его разрушения	29
1.5 Общие принципы создания энергосберегающих технологических машин вибрационного типа	35
1.6 Морфологический анализ вибрационных измельчителей фуражного зерна	39
1.7 Анализ состояния теоретических и экспериментальных исследований в области вибрационного измельчения зерна	49
1.8 Общая схема диссертационного исследования	53
Выводы по главе 1	54
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ	57
2.1 Механизм разрушения кормового зерна вибрационными рабочими органами	57
2.2 Реологическая модель единичной частицы фуражного зерна	66
2.3 Выбор профиля рабочей поверхности рабочих органов	73
2.4 Расчет основных параметров вибрационного измельчителя фуражного зерна	79
2.4.1 Обоснование угла захвата измельчаемого материала рабочими органами	79
2.4.2 Определение рациональной угловой скорости дебалансных валов	82
2.4.3 Определение производительности измельчителя	87

Выводы по главе 2	87
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВИБРАЦИОННЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДОЙ В ВИДЕ СЛОЯ КОРМОВОГО ЗЕРНА	89
3.1 Общая постановка задачи выбора динамической системы измельчителя на основе многокритериального подхода	89
3.2 Динамические свойства зернового измельчителя с маятниковым вибровозбудителем	92
3.3 Анализ динамических эффектов в измельчителе с двумя самосинхронизирующимися вибровозбудителями на основе плоской расчетной схемы	96
3.4 Особенности динамики виброщекового измельчителя	101
3.5 Выбор рациональной динамической схемы вибрационного измельчителя кормового зерна	108
3.6 Компьютерное и физическое моделирование динамики зернового измельчителя с самосинхронизирующимися вибровозбудителями	110
Выводы по главе	120
4 МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КОРМОВОГО ЗЕРНА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ	122
4.1 Оценка гранулометрического состава дерти, образуемой при измельчении кормового зерна	122
4.2 Сравнение энергетических показателей измельчителей кормового зерна на основе рациональной формулы В. П. Горячкина	125
4.3 Оценка эффективности однократного механического воздействия по слою зерна при его измельчении	131
4.4 Моделирование процесса вибрационного измельчения кормового зерна на основе теории размерности и подобия	143
4.5 Общая программа проведения экспериментов по обоснованию	

параметров вибрационного измельчения	150
4.6 Подбор образцов кормового зерна для измельчения в эксперименте	151
4.7 Выбор критериев оптимальности процесса вибрационного измельчения фуражного зерна	152
4.8 Описание лабораторного образца вибрационного измельчителя и приборной базы	156
4.9 Разработка методики проведения и обработки отсеивающего эксперимента	159
4.10 Обоснование и выбор матрицы планирования основного эксперимента, методики его проведения и обработки	164
5 АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ	167
5.1 Особенности гранулометрического состава измельченного продукта	167
5.2 Производительность вибрационного измельчителя и энергоемкость процесса измельчения	175
5.3 Анализ процесса вибрационного измельчения кормовой пшеницы	178
5.3.1 Влияние параметров измельчения на модуль помола	179
5.3.2 Влияние параметров измельчения на коэффициент вариации модуля помола	181
5.3.3 Влияние параметров измельчения на содержание целых зерен в измельченном продукте	184
5.3.4 Удельная энергоемкость процесса измельчения зерна пшеницы с учетом достигнутой степени измельчения	187
5.4 Экспериментальные закономерности вибрационного измельчения кормового ячменя	189
5.5 Многокритериальная оптимизация процесса вибрационного измельчения кормового зерна	190
Выводы по главе 5	197
6 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	199

6.1 Общие положения	199
6.2 Расчет показателей сравнительной экономической эффективности вибрационного измельчителя	200
6.3 Реализация результатов исследования	204
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	207
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	211
ПРИЛОЖЕНИЯ	236

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Стратегией развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года предусмотрен прирост объема производства отечественных высококачественных кормов, кормовых добавок для животных по отношению к предшествующему году не менее 5 процентов [163]. Подпрограммой "Развитие производства кормов и кормовых добавок для животных" Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017 - 2025 годы планируется создание системы машин для комбикормовой промышленности, предусматривающей механизацию технологических процессов, повышение качества комбикормовой продукции и снижение энергозатрат [176].

Согласно «Стратегии развития машиностроения для пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2030 года», обеспечение предприятий пищевой и перерабатывающей промышленности современным и высокотехнологичным отечественным оборудованием является необходимым условием роста конкурентоспособности выпускаемой продукции, сохранения продовольственной безопасности страны и развития экспортного потенциала [164].

В этом же документе указывается, что техническое развитие продукции включает в себя повышение производительности, надежности и долговечности, увеличение энергоэффективности и экологичности выпускаемого оборудования.

Данные зоотехнической науки показывают, что только в условиях высокого уровня обеспеченности ферм полноценными кормами возможна реализация генетического потенциала животных и птицы. Без применения высокоэффективных машин и поточных линий невозможно решение жизненно важных рыночных проблем современного животноводства [6,7,99.100,214].

Концентрированные корма в рационах крупного рогатого скота составляют 25-40%, свиней и птицы – до 80-95% по питательности. Эффективность применения концентрированных кормов зависит от качества их

приготовления.

Центральное место в производстве комбикормов занимает процесс измельчения исходного сырья, на который расходуется до 70...80 % от всей энергии, затрачиваемой на технологический процесс [1,6,7,28,64,80,98,100,104,133]. Благодаря измельчению значительно улучшается взаимодействие корма с пищеварительными органами животных, поэтому его усвояемость находится в прямой зависимости от крупности частиц.

Однако при любой крупности помола качество корма считается тем выше, чем меньше в нем мучнистого пылевидного продукта. Тонко измельченный продукт теряется при загрузке, разгрузке, транспортировке и раздаче корма, он трудно смачивается водой и слюной животных и хуже усваивается их организмом. По данным Л.А. Глебова, при скармливании телятам и пороссятам разных половозрастных групп корма, содержащего более 20 % пылевидной фракции, его расход на единицу прироста живой массы возрастает в среднем на 10...15 % [38,39].

В настоящее время основным оборудованием для измельчения фуражного зерна являются молотковые дробилки, однако при тонком помоле они дают до 30 % пылевидной фракции, а при грубом - до 20% недоизмельченных частиц и целых зерен. Кроме этого, переизмельчение обуславливает повышенную энергоемкость рабочего процесса у молотковых дробилок (до 15 кВт-ч/т) [6,7,38,39,142,165].

Проблемная ситуация в области измельчения фуражного зерна, таким образом, состоит в том, что, с одной стороны, постоянно растут требования к качеству измельчения кормового зерна, снижению расхода энергии, металла, а, с другой стороны, традиционные измельчающие устройства и научные знания в этой области не могут обеспечить дальнейшее коренное совершенствование данного процесса.

Совершенно иной, чем у молотковых дробилок, принцип работы положен в основу вибрационных измельчителей, в которых зерно разрушается в результате сжатия между неподвижным и вибрирующим элементами. В ряде отраслей промышленности, таких как горная, строительная, химическая, данные

измельчители уже нашли широкое применение и позволяют вести процесс измельчения при низких энергозатратах [10,20,32,34,40,134]. Однако при измельчении фуражного зерна они не используются вследствие малой изученности процесса.

В связи со сказанным, особую актуальность приобретает исследование технологического процесса вибрационного измельчения кормового зерна для разработки измельчителей вибрационного действия, позволяющих получать более однородный гранулометрический состав готового продукта, при минимизации энергоемкости процесса.

Связь темы исследований с государственными программами и НИР.

Исследования выполнялись в соответствии с основополагающими документами:

– «Федеральной научно-технической программой развития сельского хозяйства на 2017 - 2025 годы» (утверждена постановлением Правительства РФ 25 августа 2017 г. № 996);

– «Стратегией развития машиностроения для пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2030 годы» (утверждена постановлением Правительства РФ 30 августа 2019 года № 1931-р);

– темой НИР СФНЦА РАН по теме государственного задания на 2022-2023 годы № 0533-2021-0012 «Обосновать и разработать системы инженерного, технологического и энергетического обеспечения производства сельскохозяйственной продукции и утилизации отходов животноводства, обеспечивающих снижение совокупных затрат, на основе использования новых физических, технико-технологических методов воздействия на биологические объекты и цифровых технологий управления производственными и технологическими процессами в условиях Сибири».

Степень разработанности темы. Основной вклад в разработку теоретических и практических основ вибрационных дробилок для горной и строительной индустрии внесли сотрудники НПК «Механобр-техника» И. И. Блехман, Л. А. Вайсберг, Л. П. Зарогатский, Б. П. Лавров, В. И. Ревнивцев, К. А. Рундквист, А. К. Рундквист, Р. Ф. Нагаев и многие другие. Теперь, когда

вибрационные дробилки выпускаются серийно и широкомасштабно используются, стало очевидным, что в режимах сверхтонкого измельчения в них по сравнению с эксцентриковыми дробилками удалось снизить удельные энергозатраты на единицу степени дробления в 1,5 раза, а на прирост вновь образованной поверхности - в 2 раза. В то же время почти вдвое снижается потребление электроэнергии на 1 т перерабатываемого материала [33,34]. Такие результаты побуждают искать применение вибрационных дробилок в других отраслях, в частности в сельском хозяйстве.

Исследования по использованию вибрационных рабочих органов для измельчения фуражного зерна провели С. Н. Васильев, О. Ю. Маркин, С. А. Мартыанов, И. Я. Федоренко [84,93,94,119,190,191]. Констатировано, что конструкции, предложенные для горной и строительной промышленности, неработоспособны при измельчении кормового зерна, обладающего уникальными технологическими свойствами. В трудах перечисленных ученых содержатся основы теории измельчения зерна вибрационными рабочими органами, на базировании которой созданы лабораторные образцы вибрационных измельчителей.

Однако проблема не была полностью изучена и решена. Степень разработанности научных задач оказалась недостаточной, чтобы получить исходные данные для проектирования производственного образца вибрационного измельчителя кормового зерна. Небольшой объем теоретических и экспериментальных исследований в области использования вибрационных измельчителей не позволяет пока надеяться на широкое применение этих машин в животноводстве. Это диктует необходимость дальнейшего рассмотрения проблемы, исходя из современных методов и возможностей.

Цель исследования - повышение эффективности процесса измельчения кормового зерна на основе использования вибрационных методов технологического воздействия.

Объектом исследования является технологический процесс вибрационного измельчения кормового зерна.

Предмет исследований – факторы, выходные характеристики процесса,

их связи, а также закономерности взаимодействия вибрационных рабочих органов с измельчаемым кормовым зерном.

Для достижения сформулированной цели требуется решение **следующих основных задач:**

1. Дать анализ известных технологических и технических решений в области измельчения кормового зерна;
2. Развить и уточнить механико-технологические механизмы разрушения зерновок вибрационными нагрузками;
3. Разработать математические модели динамики взаимодействия механической системы вибрационных измельчителей с технологической средой в виде слоя кормового зерна.
4. Обосновать рациональные конструктивные и технологические параметры, а также режимы работы вибрационных измельчителей кормового зерна;
5. Дать технико-экономическую оценку основных результатов исследования.

Научную новизну представляют:

- морфологический анализ вибрационных измельчителей, позволивший провести структурный синтез измельчителей фуражного зерна;
- закономерности взаимодействия зерновки с рабочими поверхностями вибрационных рабочих органов, обеспечивающие профилирование последних;
- реологическая модель зерновки, отражающая основные явления при ее виброразрушении;
- динамический анализ измельчителей с учетом вязкоупругих свойств технологической нагрузки;
- регрессионные математические модели, полученные на основе экспериментов, позволяющие найти рациональные параметры и режимы работы измельчителей.

Техническую новизну подтверждают конструкторские решения, реализующее процесс вибрационного измельчения зерна по патентам РФ №№ 2262984, 2688424, 2759864, 2787723.

Результаты исследований существенно расширяют и углубляют представления о механизме разрушения зерновок, закономерностях их взаимодействия с рабочими поверхностями вибрационных рабочих органов, уточняют динамические свойства измельчителей с учетом реологических свойств технологической нагрузки, устанавливают аналитические и экспериментальные зависимости энергетических и качественных показателей работы измельчителей от их режимных и конструктивных параметров.

Разработанное методическое обеспечение дает возможность осуществить проектирование измельчительных установок с вибрационными рабочими органами. Применение разработанных методик проектирования позволяет сократить время выполнения проектных работ, увеличить эффективность проектирования систем приготовления комбикормов.

Подготовлены и изданы рекомендации «Совершенствование процесса измельчения кормового зерна», утвержденные заместителем министра сельского хозяйства Алтайского края Лукьяновым Ю. С. 19 мая 2023 года [185].

Результаты работы используются проектно-конструкторским бюро ООО «СТ-Проект» (г. Ставрополь), ООО "Глобал Инжиниринг» (г. Барнаул) для разработки вибрационных измельчителей кормового зерна (Приложение Л).

Некоторые результаты наших исследований вошли в лабораторный практикум *«Моделирование вибрационных процессов и устройств АПК. - Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2020.- 198 с.»* [194], который предназначен для студентов и аспирантов вузов, осваивающих образовательные программы магистратуры по направлению подготовки «Агроинженерия» и аспирантуры по группе научных специальностей 4.3 «Агроинженерия и пищевые технологии».

Методология и методы исследования базировались: на аналитическом обобщении известных научных и технических результатов, физическом, математическом и компьютерном моделировании, методах теоретической механики, дифференциального и интегрального исчисления; на постановке и обработке экспериментальных данных методами теории математической статистики и планирования эксперимента, сопоставлении полученных автором результатов экспериментальных исследований, выполненных в лабораторных

условиях, с соответствующими теоретическими результатами, а также с результатами, полученными другими авторами.

На защиту выносятся: - результаты морфологического анализа вибрационных измельчителей;

- реологическая модель зерновки, теоретическое описание процесса взаимодействия вибрационных рабочих органов с измельчаемым продуктом, динамический анализ измельчителей с учетом технологической нагрузки;

- обоснование коэффициента соответствия данного измельчителя и его режима настройки зоотехническим требованиям для животных;

- методология расчета модельного ряда вибрационных измельчителей на основе критериального анализа процесса измельчения кормового зерна вибрационной нагрузкой;

- математические регрессионные модели по обоснованию параметров и режимов работы вибрационного измельчителя зерна.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные положения, заключение и практические предложения, сформулированные в диссертации, отвечают целям и задачам работы. Обоснованность и достоверность результатов исследований подтверждаются корректностью сделанных допущений при построении математических моделей, статистической обработкой полученных данных с применением методики планирования эксперимента и компьютерных программ, использованием с целью повышения достоверности результатов различных дублирующих методов математического моделирования объекта исследований и сопоставления их результатов с компьютерным и натурным экспериментом. Экспериментальные исследования выполнены на сертифицированном поверенном современном оборудовании.

Степень достоверности представленных в работе основных научных положений, сформулированных выводов и разработанных рекомендаций обоснована также применением последних достижений теории разрушения, теоретической механики, теории размерности и подобия, а также современных методик проведения научных исследований, сходимостью полученных автором результатов теоретических и экспериментальных исследований в пределах

относительной погрешности $\pm(5-9)\%$ с доверительной вероятностью 0,95 и получением прогнозируемых результатов при практической реализации.

Материалы диссертационной работы доложены на ежегодных научно - практических конференциях ФГБОУ ВПО «Алтайский ГАУ»: Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» (г. Барнаул, 2020-24 гг.); на Российской (национальной) научно-практической конференции «Перспективы внедрения инновационных технологий в АПК» (Барнаул, 2020-21 гг.). Основные результаты работы также одобрены и опубликованы в материалах Национальных (Всероссийских) научных конференций «Теория и практика современной аграрной науки», проводимых Новосибирским ГАУ (2020 - 21 гг.), а также опубликованы в сборниках на английском языке, проиндексированных в базах Scopus.

Публикации. По материалам представленной к защите диссертации опубликовано 33 научные работы, общим объемом около 25 печ. л. (13.5 печ. л. принадлежит лично соискателю), в которых отражены основные положения, в том числе 12 работ - в рецензируемых журналах, рекомендованном перечне ВАК РФ, в том числе 2- в сборниках с регистрацией в базах Scopus и 2 – в журналах, регистрируемых в базе RSCI.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии при разработке математических моделей, характеризующих работу вибрационных измельчителей, обосновании лабораторных установок, проведении опытов и обработке экспериментальных данных, обобщении и структуризации научного материала по теме исследования, формулировке основных выводов и положений диссертации. Постановка задач, направление и методология исследований были осуществлены при консультациях с научным руководителем по нашей кандидатской диссертации, заслуженным деятелем науки РФ, д.т.н., профессором И. Я. Федоренко. Неоценимую методическую помощь на завершающем этапе выполнения докторской диссертации оказал научный консультант чл.-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор Н. М. Иванов. Перечисленным лицам автор приносит глубокую благодарность.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 296

страницах текста в компьютерном исполнении, содержит 23 таблицы, 74 рисунка, состоит из введения, обзора литературы, материала и методов исследований, результатов собственных исследований, заключения, перспектив дальнейшей разработки темы, списка литературы, включающего 237 источников, из которых 218 отечественных и 19 иностранных авторов, 11 приложений.

1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Роль зерновых культур в кормлении сельскохозяйственных животных

Измельчение зерновых кормов обусловлено физиологией сельскохозяйственных животных. Дело в том, что скорость обработки частиц корма желудочным соком и доступности питательных веществ прямо пропорциональна площади их поверхности. В результате измельчения кормов образуется множество частиц с большей общей поверхностью, что способствует ускорению пищеварения и повышению усвояемости питательных веществ.

Поэтому содержание целых зерен в измельченном продукте не должно превышать 1% [161]. Как свидетельствует отечественный и зарубежный опыт, нарушение этих границ ведет к перерасходу кормов. Однако чрезмерное измельчение зерна до пылевидного состояния также снижает эффективность его использования и вредно для животных. Так, среднесуточные привесы молодняка свиней оказались на 18% ниже при скармливании кукурузной дерти с размером частиц 0,2 мм, чем при скармливании дерти с рекомендуемым размером частиц. К тому же при переизмельчении увеличиваются затраты энергии дробилкой [201].

Измельчение – самый распространенный и совершенно обязательный способ подготовки зерновых кормов. При размоле и дроблении зерна разрушается твердая оболочка, питательные вещества становятся более доступными действию пищеварительных соков, что повышает их использование. Скармливание, например, зерна свиньям в цельном виде снижает усвояемость питательных веществ на 20%, а у жвачных потери составляют 30% и более [6,7].

При повышенной влажности зерно хуже измельчается, плохо хранится, снижается производительность машин, возрастает расход энергии. Установлено, что увеличение влажности зерна на 1%, свыше оптимальной, расход энергии на измельчение возрастает на 6%.

Измельчение компонентов комбикормов – одна из основных технологических операций процесса их производства. Измельчение до необходимой крупности обеспечивает не только более полное усвоение

животными питательных веществ, содержащихся в комбикорме, но и обуславливает возможность равномерного смешивания компонентов в смесителях после дозирования [6,7,39,79,97,166,201,208,215,216].

Одним из приемов снижения себестоимости получаемой продукции является удешевление рациона кормления одновременно с увеличением переваримости и питательности рациона согласно зоотехническим нормам. Наиболее рациональный путь для этого - увеличение производства и повышение качества комбикорма. Установлено, что каждая тонна комбикорма по сравнению с тем же количеством зерна позволяет получить дополнительно 250 – 300 кг молока или 30 – 40 кг мяса [189]. Каждая тонна зерна в составе комбикорма используется почти в два раза эффективнее, чем такое количество зерна, скормленное животным в натуральном виде.

При балансировании рационов сельскохозяйственных животных по энергии и протеину главную роль играют концентрированные корма. Но эта же группа кормов является и самой затратной в структуре себестоимости. Поэтому для извлечения из зерновой группы максимального экономического эффекта, необходимо добиться максимальной усвояемости.

1.2 Требования к процессу измельчения кормового зерна

Современные требования к показателям назначения, надежности и условиям испытаний дробилок для кормов (плющилок кормов) приведены в Таблицах 1.1 и 1.2. Эти требования изложены в относительно новом документе: СТО АИСТ 1.14.2-2020 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для кормопроизводства. Показатели назначения и надежности. Общие требования». Дата утверждения 30.01.2020. Дата введения в действие 03.02.2020 [161].

Данный документ повторяет ранее изложенные требования [96] на крупность размола кормового зерна, а также вводит новое жесткое требование на однородность гранулометрического состава измельченного продукта. Согласно документу, неравномерность измельченного продукта (коэффициента вариации) не должна превышать 10%.

Таблица 1.1 – Требования к показателям назначения и надежности дробилок для кормов (плющилок кормов)

Наименование показателя	Значение показателя
Культура	По ТУ
Регулировка рабочих органов	По ТУ
Производительность, т/ч	По ТУ
Характеристика измельченного зерна: фракционный состав измельченного продукта, %: размеры частиц, мм: до 0,25 включ. св. 0,25 » 0,6 » » 0,6 » 1,0 » » 1,0 » 2,0 » » 2,0 » 3,0 » » 3,0 » 4,0 » » 4,0 » 5,0 » » 5,0	Указываются показатели используемого корма
Средневзвешенный размер частиц, мм: - для КРС, не более - для свиней, не более - для птицы	3,0 1,0 2,0-3,0
Неравномерность измельченного продукта (коэффициент вариации), %, не более	10
Характеристика хлопьев: - фракционный состав, % - толщина, мм	По ТУ Для злаковых и бобовых культур оптимальная толщина 1,1-1,8 мм, кукурузы – 2,5 мм
Средняя толщина хлопьев, мм	0,8-1,8
Содержание целых зерен в продукции, %, не более	1
Неоднородность плющеного продукта (коэффициент вариации), %	10-15
Степень пропаривания, %	95
Насыпная плотность, кг/м ³	410
Удельный расход пара, кг/т	76
Потери, %, не более	0,2
Температура готового продукта, °С, не более	29
Коэффициент абсорбции, не менее	0,85
Содержание металломагнитной примеси, мг/кг, не более	30
Наработка на отказ единичного изделия, ч, не менее	200
Коэффициент готовности с учетом организационного времени, не менее	0,99

Известные типы измельчителей кормового зерна в настоящее время не соответствует данному показателю. Причем самую большую неравномерность, достигающую 60-75% и более [135,215,216], имеют самые массовые машины – молотковые дробилки.

При этом максимальный средневзвешенный размер частиц дерти для КРС устанавливается в 3,0 мм, хотя современная зоотехническая наука утверждает о необходимости размера частиц 1.0-2,0 мм [108,128]. По другому источнику, для

кормления молочного скота зерна злаковых и бобовых необходимо размалывать до величины частиц: для коров — 1,5—2 мм, для телят — меньше 1 мм. Целесообразно также плющение зерна [105].

Таблица 1.2 – Требования к условиям испытаний дробилок для кормов (плющилок кормов)

Наименование показателя	Значение показателя
Метеорологические условия: а) температура, °С: - для дробилок - для плющилок б) относительная влажность, %, не более	От -30 до +45 0-35 98
Характеристика исходного материала: - культура - влажность, %, не более для дробилок для плющилок	Зерновые культуры, зерносмеси 14,5 18-20
Засоренность зерна, %, не более: В том числе примесь: - органическая - минеральная - металломагнитная размером до 2 мм с неострыми краями в 1 кг корма, мг, не более	5 4,0 0,7 30
Состав вороха зерна, %: - целое - щуплое - битое	Указываются фактические показатели
Натура зерна, г/л: - ячмень - овес	Указываются фактические показатели
Абсолютная масса, г: - ячмень - овес	Указываются фактические показатели
Температура, °С	По ТУ

Что же касается влажности измельчаемого сырья, то документ устанавливает практически прежние показатели: для дробилок - не более 14,5 %, для плющилок – не более 18-20% (см. Таблица 1.2).

В настоящее время, в зависимости от востребованной производительности, необходимой структуры частиц, находят применения различные технические решения системы измельчения: вальцовый станок, горизонтальная молотковая дробилка, вертикальная молотковая дробилка.

В компании Бюлер, известному мировому лидеру в области измельчения зерна, провели опыты по сравнению эффективности процесса измельчения в

вальцовых станках и молотковых дробилках. Испытания проводились на одном продукте (кукурузе) с применением различных сит для дробилок и при различных зазорах валцов. Результаты испытаний представлены на Рисунке 1.1 [146].

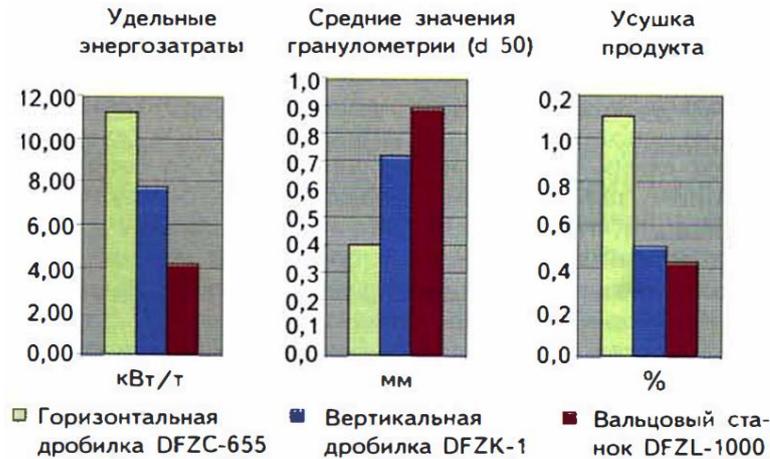


Рисунок 1.1 - Сравнительные характеристики измельчителей компании Бюлер

Показатель d_{50} означает среднюю гранулометрическую характеристику продукта после измельчения, соответствующую 50% от крайних значений (мелкой и крупной фракции). Разброс размера частиц при измельчении в вальцовом станке значительно уже, чем при измельчении в горизонтальной молотковой дробилке. В вертикальной дробилке доля мелкой и крупной фракции также ниже, чем в горизонтальной, т.е. более выровненный гранулометрический состав (Рисунок 1.2).

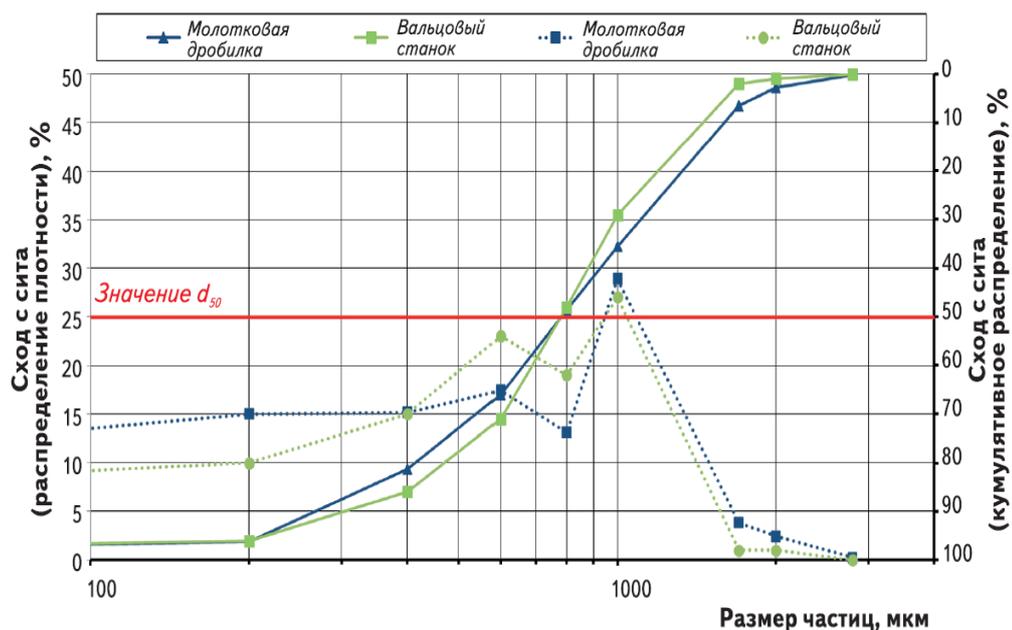


Рисунок 1.2 - Сравнение кумулятивного распределения (сплошные линии) и распределение плотности (пунктирные линии) размеров частиц измельченной кукурузы (результаты компании Бюлер)

К двум основным параметрам, определяющим качество размола, относятся распределение частиц по размеру и значение d_{50} . Первый устанавливает пропорции частиц определенного размера в образце. На Рисунке 1.2 показаны кумулятивные кривые (сумма всех пропорций) и кривые плотности распределения (отдельные пропорции). Значение d_{50} представляет собой средний размер частиц гранулометрического спектра. Это означает, что 50% частиц имеют размер меньше значения d_{50} , а 50% — больше, чем d_{50} . Как показано на рисунке, сыпучие материалы с одинаковым значением d_{50} могут иметь различный гранулометрический состав. Этим подтверждается важность обоих значений для определения характеристик размера частиц [146].

Тем не менее, даже вертикальная молотковая дробилка дает широкий спектр размеров измельченного продукта и несоответствие зоотехническим требованиям. Из Рисунка 1.2 следует, что примерно 50% полученных частиц имеют размер от 0 до 1 мм, другая половина частиц - от 1 до 3 мм. Таким образом, налицо переизмельчение зерна на испытываемых машинах.

По данным отечественных ученых, молотковые дробилки при тонком размоле дают до 30 % пылевидной фракции, а при грубом - до 20% недоизмельченных частиц и целых зерен. Кроме этого, переизмельчение обуславливает повышенную энергоемкость рабочего процесса у молотковых дробилок (до 15 кВт-ч/т) [3,6,7,38,39,142,165,236].

Судя по тому, что шкала размеров частиц на Рисунке 1.2 является логарифмической, закон распределения частиц в измельченном продукте является логарифмически - нормальным. Этот факт, что размольные характеристики фуражного зерна могут быть описаны с помощью непрерывного логарифмически нормального распределения, давно известен. Впервые на этот закон указал академик А.Н. Колмогоров при анализе процесса измельчения различных материалов [75], а экспериментально подтвердил в отношении измельчения фуражного зерна и травяных кормов профессор С. В. Мельников (Рисунок 1.3) [97].

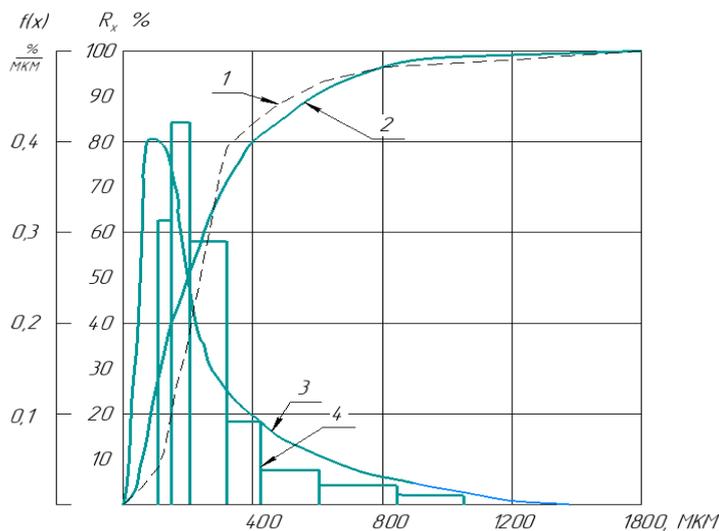


Рисунок 1.3 Характеристики крупности травяной муки (по С. В. Мельникову): 1 – эмпирическая; 2 – теоретическая; 3 – кривая плотности распределения; 4 - гистограмма

Однако в дальнейшем логарифмически-нормальное распределение было незаслуженно забыто, а исследователи в области измельчения зерна использовали в основном распределение Розина-Раммлера.

Логарифмически нормальное (логнормальное) распределение частиц по размерам x утверждает, что нормально распределена не сама случайная величина x , а логарифм этой величины [73].

Из Рисунка 1.3 видно, что при логарифмически-нормальном законе преобладают мелкие фракции. Коэффициент вариации средневзвешенного модуля размола достигает 0,65-0.71 [54,135,215].

Отсюда видна проблема сужения разброса частиц по размеру, что, как мы предполагаем, можно в некоторой степени решить в вибрационных измельчителях.

Для развития машинной технологии измельчения кормов необходимо дальнейшее изучение физико-механических и технологических свойств перерабатываемого материала, разработка новых способов измельчения и рабочих органов дробилок, повышение равномерности размола, а также снижение энерго- и материалоемкости.

1.3 Основные закономерности измельчения твердых тел

Измельчением называется процесс механического разделения твердого тела на части. При этом действующие на тело внешние силы превосходят силы молекулярного сцепления.

В зависимости от назначения и принципа действия в машинах для измельчения могут использоваться различные виды нагрузок [28]: раздавливание (сжатие куска), излом (изгиб), раскалывание (эквивалентно растяжению), истирание и удар (Рисунок 1.4).

Теория измельчения или массового разрушения твердых тел рассматривает два комплекса основных вопросов. Во-первых, она изучает основные закономерности в распределении частиц по размерам с целью отыскания простых методов определения их средних значений и степени измельчения. Во-вторых, она исследует функциональные зависимости между затратами энергии на процесс измельчения и степенью измельчения, что позволяет оценить эффективность рабочего процесса измельчителя по принятой технологии, конструкции и режимам работы.

В результате измельчения образуется множество мелких частиц с сильно развитой поверхностью. Поэтому измельчение можно охарактеризовать как процесс приращения новых поверхностей. Количественной мерой дисперсности или развитости поверхности частиц служит удельная площадь поверхности.

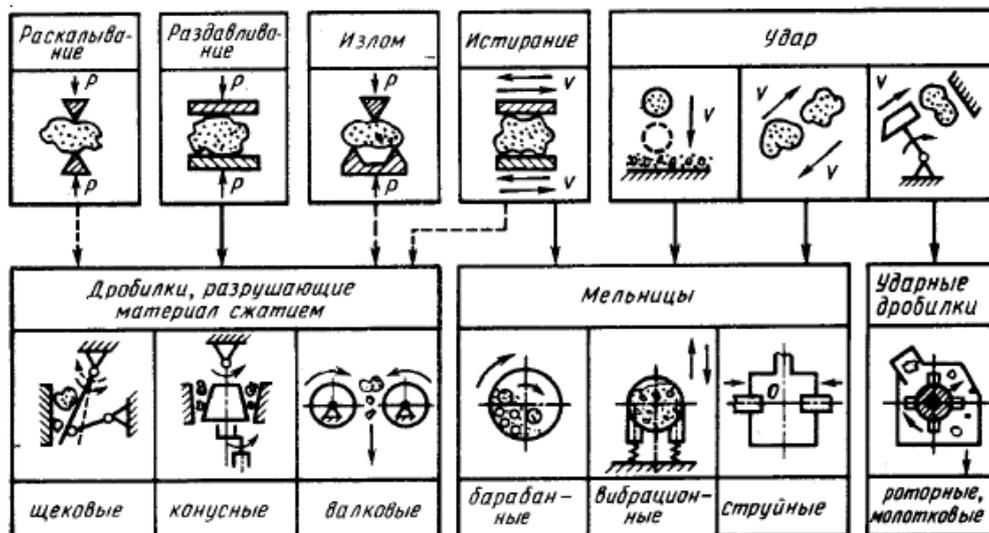


Рисунок 1.4. - Способы механического разрушения материалов, реализуемые в дробилках и мельницах: ---- — преобладающие; — сопутствующие

(по Борщеву В. Я.)

Классическими трудами в науке об измельчении различных материалов следует признать работы таких исследователей как Г. И. Баренблатт, В. В. Болдырев, Ф. Бонд, В. П. Горячкин, А. Гриффитс, В. П. Жуков, Г. Р. Ирвин, В. В. Кафаров, В. Л. Кирпичев, Ф. Кик, В. Д. Кузнецов, А. Д. Лесин, Е. Орован, С. В. Мельников, В. Е. Мизонов, П. А. Ребиндер, Р. Риттингер, Г. Румпф, А. К. Рундквист, П. М. Сиденко, Г. С. Ходаков, Л. А. Шрейнер, Е. Д. Щукин, А. М. Фрумкин, и др. [27,32,41,70,72,97,131,134,158,207].

Проблемами теоретического и экспериментального описания процесса разрушения зерна занимались такие ученые, как В. Р. Алешкин, А. В. Алешкин, Н. Ф. Баранов, С. Ю. Булатов, М. М. Гернет, Л. А. Глебов, А. Р. Демидов, В. А. Елисеев, П. И. Леонтьев, С. В. Мельников, Ф. Г. Плохов, У. К. Сабиев, П. А. Савиных, В. В. Садов, В. И. Сыроватка, В. А. Сысуев, С. Д. Хусид, и многие другие [1,2,4,13,15,196,57,35,97-105,139,148,160,162,163].

В настоящее время совершенствованием машин для измельчения кормового зерна заняты научные коллективы в Алтайском, Воронежском и Донском ГАУ, Вятском ГАТУ, Омском и Южно-Уральском ГАУ, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого», Нижегородском государственном инженерно-экономическом университете, других научных и учебных заведениях.

Для измельчения тела до требуемого размера необходимо затратить определенное количество энергии, зависящее от его размера, прочности, формы, влажности, условий измельчения и других параметров. Существует несколько теорий оценки расхода энергии на измельчение материалов. В 1867 г. П. Риттингер впервые выдвинул гипотезу о том, что работа A , затрачиваемая на измельчение материала, пропорциональна вновь образованной поверхности:

$$A = K_S \Delta S \quad (1.1)$$

где K_S —коэффициент пропорциональности;

ΔS — приращение поверхности.

Гипотеза Риттингера применима только при мелком дроблении и помоле материалов ввиду небольшой погрешности в оценке расхода энергии на измельчение.

Практическое значение гипотезы невелико, так как трудно определить коэффициент пропорциональности.

В 1874 г. Ф. Кик и В. П. Кирпичев предложили гипотезу, заключающуюся в том, что энергия, необходимая для одинакового изменения формы геометрически подобных и однородных тел, пропорциональна объемам или массам этих тел:

$$A = K_V \Delta V, \quad (1.2)$$

где K_V —коэффициент пропорциональности;

ΔV – часть объема тела, подвергнутого деформации.

В 1940 г. П. Ребиндер предложил расчетную формулу, в которой объединена работа, затрачиваемая на деформацию и образование новых поверхностей:

$$A = K_V \Delta V + K_S \Delta S. \quad (1.3)$$

Формула Ребиндера также не получила практического применения ввиду отсутствия рекомендаций по выбору значений коэффициентов пропорциональности.

В 1949 г. Ф. Бонд выдвинул гипотезу, согласно которой работа, необходимая для измельчения, пропорциональна приращению параметра, являющегося среднегеометрическим между объемом и поверхностью:

$$A = K (1/d_{cp} - 1/D_{cp}) Q, \quad (1.4)$$

где K — коэффициент пропорциональности;

D_{cp} , d_{cp} — средний размер материала до и после измельчения;

Q —количество материала.

В 1954 году А. К. Рундквист, преобразовав формулу Ф. Бонда, получил обобщенное выражение, по которому элементарная работа дробления одного куска материала пропорциональна элементарному изменению некоторой степени его размера D :

$$dA = K d(D^{n-1}), \quad (1.5)$$

где K —коэффициент пропорциональности;

i —степень измельчения;

n — показатель степени.

Принимая в выражении показатель степени $n=2$, $n=1,5$ и $n=1$, можно соответственно получить выражения для законов П. Риттингера, Ф. Бонда и

Кирпичева — Кика.

Специалистами отмечается [158], что ни одна из ранних гипотез не дает удовлетворительных результатов при теоретическом определении затрат энергии на дробление даже в узкоограниченных случаях, например при разрушении одиночных кусков изотропного материала заданной формы лабораторными методами. Поэтому энергетические гипотезы дробления следует рассматривать лишь как некоторое приближение к истине, дающее возможность разобраться в существе явлений или их вариантах, которые имеют место при процессе дробления, т. е. понять хотя бы в общем виде механику процесса, без чего нельзя приступать к созданию дробильной машины или ее совершенствованию [158].

Указанные выше зависимости носят феноменологический характер, поскольку отвлекаются от физики процесса, и их можно использовать лишь для качественного исследования рабочих процессов и сравнительных расчетов с целью выявления относительной величины энергии, затрачиваемой на измельчение [158].

Ввиду трудности математического описания процесса измельчения продолжают работы по совершенствованию имеющихся теорий и разработке новых зависимостей.

Опираясь на гипотезу П. А. Ребиндера, С. В. Мельников предложил полуэмпирическую формулу для определения затрат работы на процесс измельчения зерна [97]:

$$A_{изм} = C_1 \lg \lambda^3 + C_2 (\lambda - 1), \quad (1.6)$$

где λ - степень измельчения;

C_1, C_2 - эмпирические коэффициенты, зависящие от физико-механических свойств измельчаемого материала и типа измельчающей машины, Дж/кг.

При выводе этой формулы С.В. Мельников ввел два разумных допущения:

1. Расширением имеющихся микротрещин и образованием новых в пределах упругих деформаций, вплоть до начала текучести материала, можно пренебречь, допустив, что вся работа при этом расходуется только на деформацию корма и пропорциональна деформированному объему;

2. Энергия, расходуемая на измельчение корма в интервале от предела

текучести до разрушения, затрачивается на образование новых поверхностей (в том числе и в ходе развития пластических деформаций).

Эти гипотезы требуют развития при рассмотрении процесса вибрационного измельчения зерна.

В 1987 году Р.А. Родин высказал еще одну интересную энергетическую гипотезу [138]. Им было установлено, что единичный акт разрушения куска горной породы правильной формы с изотропными свойствами состоит из следующих четырех стадий [136-141]:

- 1-появление контактов и возникновение упругих деформаций в куске;
- 2-образование зоны всестороннего сжатия, ее увеличение и формирование до момента появления эффективной трещины;
- 3 - возникновение эффективной трещины и ее развитие до критических размеров;
- 4- скоростное развитие эффективной трещины до полного разрушения дробимого куска.

Расход энергии на первую стадию разрушения (упругую деформацию куска породы), по расчетам Р.А. Родина, составляет менее 10% общего расхода энергии. Установлено, что большая часть энергии расходуется на деформацию самой системы – дробилки или пресса. Опытами доказано, что работа, затрачиваемая на деформацию пресса, составила около 80% работы, совершаемой при дроблении прочного известняка, и около 35% - при дроблении известняка средней прочности.

Если всю полезную работу дробления принять за 100%, то на образование зоны всестороннего сжатия расходуется 73%, на развитие эффективной трещины до критического размера – 22,5% и на скоростное развитие трещины – 4,4%.

Схема разрушения куска горной породы, по Р.А. Родину, следующая. Вначале в зоне действия силы образуется площадка контакта и происходит упругое сжатие. После достижения определенного усилия начинается местное разрушение с образованием зоны всестороннего сжатия конической формы. По мере увеличения усилия увеличивается площадка контакта, а значит, и объем конуса. Угол α при основании конуса является углом внутреннего трения (tga – коэффициент внутреннего трения) и сохраняется постоянным. Поверхность частиц, заключенных в

зону всестороннего сжатия, составляет около 97% всей вновь образованной поверхности разрушения. Эти частицы подвергаются сильной нагрузке (до нескольких тысяч МПа), интенсивному трению между собой при формировании и расширении зоны сжатия и образования эффективной трещины, на что и расходуется основная часть (95%) всей энергии, потребляемой при дроблении, и только 5% энергии идет на все остальные этапы процесса до полного разрушения куска на две половины.

Предложенная гипотеза может быть сформулирована так: работа, затраченная на единичное разрушение куска горной породы пропорциональна работе, затраченной на образование новых поверхностей, и трению между образовавшимися поверхностями в зоне всестороннего сжатия.

Оценивая рассмотренные теории измельчения с позиций их практической значимости, следует отметить, что в зависимостях для определения затрат энергии отсутствуют характеристики самих материалов и каких-либо параметров рабочих органов, что затрудняет формирование требований к разработке новых технических решений или режимов работы дробильных машин.

Разрушение твердых тел – процесс настолько сложный и неоднозначный, что до настоящего времени не существует единой и работоспособной теории. Однако эта проблема настолько актуальна для самых различных областей деятельности человека, что в данном направлении уже сотни лет ведется целенаправленный научный поиск. Известны тысячи публикаций по данному вопросу. В физике определилось самостоятельное научное направление – механика разрушения [77,109,131,175].

Первые расчеты по этой теории показали, что теоретическая прочность, как правило, на несколько порядков выше необходимых напряжений для разрушения тела.

Впервые это противоречие для хрупких материалов (стекла) разрешил А. А. Гриффитс [130,131]. Опираясь на теоретические исследования Г. В. Колосова, определившего закономерности концентрации напряжений в окрестности трещины, Гриффитс сформулировал стройную теорию хрупкого разрушения тел. В соответствии с этой теорией, разрушение тела определяется ростом единственной «магистральной» трещины. За счет концентрации напряжений в ее

устье для развития трещины требуется энергия, значительно меньшая, чем для разрушения идеально бездефектного тела. Теория Гриффитса до сих пор остается основным инструментом исследований в области механики разрушения, поскольку она верно отражает физику процесса. Однако количественные оценки теории (критерий Гриффитса) совпадают с экспериментальными данными лишь для хрупких аморфных тел. Для кристаллических материалов разрушающие напряжения должны быть значительно выше, чем предсказывает теория.

В развитие теории Гриффитса для пластических материалов типа металлов в последнее время был предложен ряд деформационных критериев разрушения [130,131]. Из них наиболее известным является КРТ-критерий (критическое раскрытие трещин). Для повышения работоспособности теории трещин многими авторами в формулу критериев вводятся различные характеристики структуры реального материала. Предложен ряд критериев, учитывающих скорость приложения нагрузки, условия торможения и разветвления трещин и т. д.

Таким образом, теория трещин Гриффитса и ее приложения широко используются в теоретических и практических исследованиях. Однако данная теория имеет существенные недостатки, т. к. не решает ряд проблем [130].

1. Теория не учитывает фактор времени, который может играть исключительно важную роль в некоторых процессах разрушения вязкоупругих материалов. Так, при очень быстром приложении нагрузки (например, при взрывном или ударном разрушении горных пород, измельчении зерна ударом) в тело вносится избыточная энергия, что определяет развитие не одной, а многих трещин одновременно. Напротив, при малой скорости нагружения наблюдается постепенный «докритический» рост трещин, чего не учитывает теория Гриффитса.

2. Теория описывает только начальное и конечное состояния системы и не учитывает особенности самого процесса развития трещины (ее ветвление, затухание, выход на границу тела и пр.). Поэтому критерий Гриффитса представляет собой только необходимое условие разрушения тела. Достаточным условием является наличие запаса потенциальной энергии деформаций в окрестности трещины.

3. В энергетическом балансе не учитывается величина кинетической энергии, которую приобретают расходящиеся берега трещины. При большой скорости деформирования (например, при взрыве или ударе) эта составляющая может быть достаточно существенной.

Кроме того, теория Гриффитса изначально постулирует наличие в разрушаемом теле трещин, никак не объясняя механизм их зарождения. А без наличия начальных трещин теория просто не имеет смысла.

1.4 Особенности технологических свойств кормового зерна и механизмы его разрушения

Основоположником направления по изучению технологических свойств зерна является профессор Петербургского технологического института П.А. Афанасьев, опубликовавший в 1883 году первые работы по исследованию прочности зерна. Позднее К.А. Зворыкин (1894 г.), а затем П.А. Казьмина (1912 г.) дополнили и расширили сформулированные им основные положения. Широко известны и используются в различных расчетах данные, приведенные в трудах профессоров В. Л. Злочевского, Г. А. Егорова, Я. Н. Куприца, С. В. Мельникова, И. А. Наумова, У. К. Сабиева, Н. С. Сергеева, и др. [59,61,97,104,147,157].

Зерна злаковых относятся к коллоидным капиллярно-пористым телам, отдельные части которых (оболочки, зародыш) имеют различную структуру, разные физические и механические характеристики. Составляющий основную массу зерновых крахмал, также как и клетчатка, представляют собой вещества кристаллической структуры. Белковые вещества имеют аморфную структуру.

Зерновым, в отличие от идеально твердых минеральных тел, свойственна пространственная анизотропия, т.е. их механические свойства в различных направлениях неодинаковы. Указанные особенности структуры зерна значительно влияют на механические свойства и на его поведение в процессе деформирования и измельчения [97,104].

В зависимости от характера и величины приложенных к зерну внешних сил, его линейные размеры и форма изменяются, т.е. в зерне возникают

деформации. Они могут быть упругими (обратимыми) и пластическими (необратимыми). Если внешние силы не превышают некоторого предела, то смещение частиц из равновесных положений и возникающие деформации будут обратимыми. При упругой деформации после снятия внешних сил зерно под действием сил межатомного взаимодействия возвращается в первоначальное состояние.

Развитие упругих, а затем пластических деформаций в зерне при воздействии на него внешних сил заканчивается разрушением. Оно наступает при возникновении в нем напряжений, превышающих некоторый предел, называемый пределом прочности или критическим напряжением.

В механике разрушения доказана особая роль микротрещин, которые имеются в любом теле, в том числе в зерне. На кончиках трещин происходит концентрация напряжений, что обуславливает разрушение зерновых при более низких напряжениях. В теории разрушения доказывается, что имеется некоторое критическое напряжение σ_* для данной длины трещины ℓ , при превышении которого она растёт

$$\sigma_* = \sqrt{\frac{2E\lambda}{\pi\ell}},$$

где E – модуль упругости материала;

λ – удельная работа разрушения на единицу приращения поверхности продукта (константа материала).

На Рисунке 1.5 в качестве примера даны кривые, характеризующие процесс разрушения пшеницы при влажности $W = 12,5 \%$ и скорости нагружения 437 и 223 г/с [104].

Из кривых ясно видна первая фаза деформации (участок ОА), на которой величина деформации прямо пропорциональна времени и нагрузке. За упругой стадией следует скачкообразное увеличение деформации (участок АБ) из-за хрупкого разрушения оболочек и верхних слоев эндосперма.

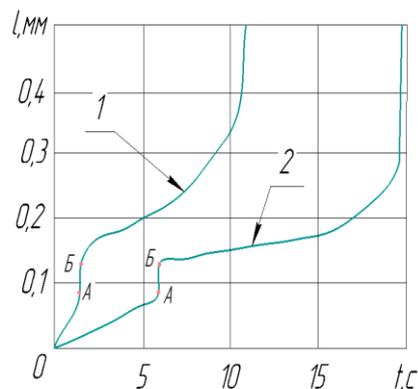


Рисунок 1.5 - Кривые деформации зерна пшеницы во времени при скорости нагружения: 1 - 437 г/с; 2 - 223 г/с. (по И. А. Наумову)

Третья стадия характеризуется постепенным увеличением пластической деформации, которая перед разрушением резко возрастает. При медленном нагружении зерновые проявляют в большей степени пластические свойства: прочность такого зерна ниже, а деформируемость выше. Существенно также то, что влияние скорости нагружения на изменение механических характеристик зерна в большей степени проявляется на влажном зерне, чем на сухом.

На Рисунке 1.6 приведены примерные диаграммы разрушения зерна пшеницы влажностью 13,5% в координатах напряжение – деформация в зависимости от продолжительности нагружения.

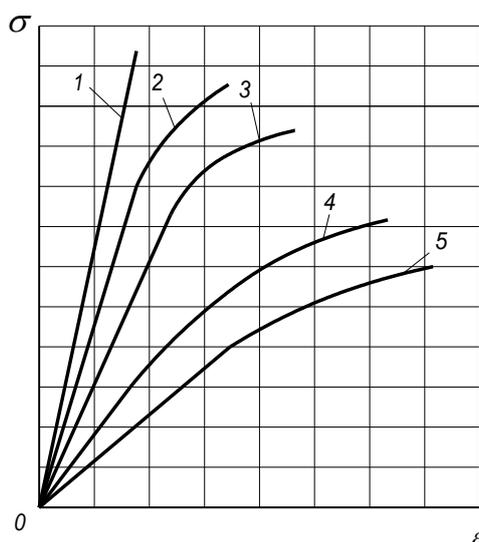


Рисунок 1.6 - Зависимость между напряжением и деформацией при различной продолжительности нагружения (по И.А. Наумову): 1 – мгновенное; 2 – через 5 с; 3 – через 15 с; 4 – через 30 с; 5 – через 60 с.

Как видно, при мгновенном и быстром (до 5 с) нагружении (кривые 1 и 2) зерно хорошо подчиняется закону Гука. При медленном погружении зерно пшеницы показывает значительные отклонения от закона прямой пропорциональности.

Таким образом, увеличение пластической деформации зависит не только от влажности, температуры и величины приложенного напряжения (нагрузки), но и скорости и продолжительности нагружения.

Следовательно, если задача состоит в хрупком измельчении зерна, то усилие следует прилагать быстро, прежде чем успеют развиваться в зерне релаксационные процессы (рассасывание напряжений). При этом зерно претерпевает небольшую деформацию.

Наоборот, если требуется вязкое разрушение, то усилие нужно прилагать медленно. В этом случае будет преобладать не хрупкое разрушение, а расплющивание зерна.

Таким образом, одно и то же зерно в зависимости от характера приложения действующей силы может проявлять себя как хрупкое или пластичное. При ударном измельчении с достаточным основанием зерно следует считать хрупким телом (до влажности 16-17%).

Эти положения подтверждают также эксперименты, проведенные профессором С.В. Мельниковым с сотрудниками. При оценке прочности единичных зерен величиной разрушающего напряжения, было установлено, что для ячменя оно составляет в среднем $7,03 \pm 1,02$ МПа в статических испытаниях против $12,73 \pm 0,4$ МПа, полученных в динамическом режиме [97]. На основании этих данных С.В. Мельников заключил, что «свойство большинства материалов повышать свою прочность с увеличением скорости погружения присуще и зерну».

Из зерновых культур наибольшей прочностью обладает ячмень, который, будучи основной фуражной культурой, может быть принят за эталон для сравнительной оценки. О соотношении показателей прочности зерна различных культур можно судить по следующим данным С.В. Мельникова (прочность зерна ячменя принята за 100%):

- ячмень – 100%;
- пшеница – 91%;
- рожь – 83%;
- горох – 65%;
- овес (без пленок) – 54%.

Интересны данные, полученные Л.А. Глебовым по скоростям разрушения зерна (Таблица 1.3) свободным ударом.

Из этих данных следует, что динамические прочностные характеристики зерновых одной и той же культуры имеют большой разброс. Гарантированное разрушение всех без исключения зерен ячменя наблюдается при скорости удара 130 м/с и выше, пшеницы – 115 м/с и выше, овса 105 м/с и выше. Это весьма большие скорости, обуславливающие напряженный динамический режим измельчителей, работающих на принципе удара.

Таблица 1.3 - Скорости разрушения зернового сырья

Скорость удара (м/с):	Вид зерновой культуры				
	ячмень	овес	пшеница	рожь	кукуруза
- начала разрушения зерна	70	56	43	45	20
- полного разрушения зерна	130	105	115	92	60

С.В. Мельников первым высказал мысль, что процесс разрушения зерновых материалов можно представить как усталостный под циклическим действием нагрузки [97].

Эту гипотезу развили и доказали ее состоятельность исследователи Алтайского ГАУ [160,191,198]. Они конкретизировали ее в следующем виде: механизм разрушения зерновок ударными нагрузками подобен малоцикловой усталости. На специально сконструированном динамическом нагружателе зерновок была получена кривая Вёлера для зерна (Рисунок. 1.7).

Таким образом, было доказано, что, применяя пониженные напряжения, меньшие предела упругости материала, зерновку тоже можно измельчить, но для этого приходится применять множество ударов. На основании этих данных была

проведена оптимизации числа ударов, исходя из энергетического критерия.

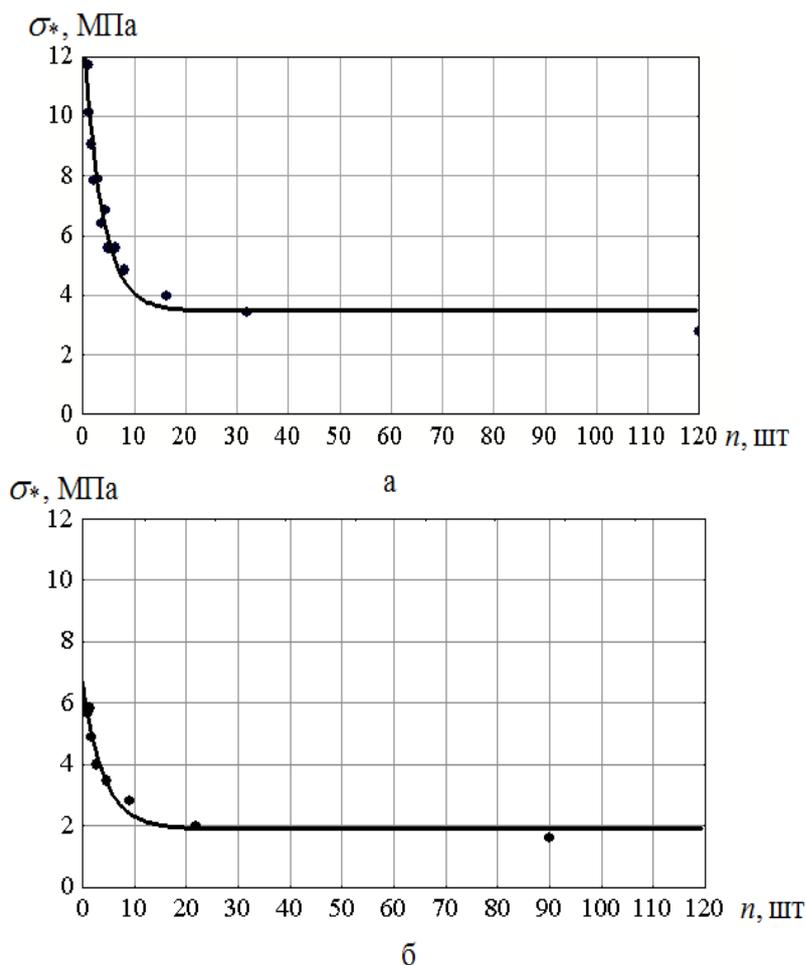


Рисунок 1.7 - Экспериментальная зависимость $\sigma_n = f(n)$: а – ячмень; б – пшеница; n – число ударов, необходимых для полного разрушения зерновки с помощью ударной нагрузки, вызывающей напряжения – σ_n [160]

Много позже, в 2010 году, появилась статья украинских ученых, эксперименты которых также подтверждают указанные положения [236]. Они пишут «В результате исследований зерна различных культур на разрушение было определено, что многократное воздействие статической нагрузкой ниже критической (т.е. ниже усилия разрушения) приводит к появлению микротрещин внутри зерновки. Поэтому разрушение наступает при усилении сжатия в 1,5...5,0 раз ниже критического. Это особенно заметно на зерне кукурузы, где зафиксировано максимальное усилие разрушения 20,5 кГ, а в случае многократного нагружения зерновка разрушается при 2,8 кГ».

Это свойство зерна необходимо учитывать при разработке измельчителей зерновых материалов, т. е. создавать такие условия, при которых зерно будет многократно деформироваться. Такие условия создаются в вибрационных измельчителях, что способствует уменьшению работы, идущей на измельчение и снижению энергоемкость процесса.

1.5 Общие принципы создания энергосберегающих технологических машин вибрационного типа

Эффективность и конкурентоспособность функционирования современных предприятий АПК в значительной мере определяются ресурсосберегающими технологиями их производственных процессов. Ресурсосбережение включает понятия энергосбережения и материалосбережения. Кроме того, ресурсосбережение затрагивает вопросы рационального природопользования, экологической и промышленной безопасности, включающих уменьшение воздействия на окружающую среду и снижение отходов производства, а также сокращения трудозатрат, повышения профессионального уровня задействованных на предприятиях специалистов и качества произведенной ими продукции.

Поэтому расширение применения на предприятиях АПК ресурсосберегающих технологий и машин, в том числе технологических вибрационных машин в составе перерабатывающих комплексов, имеет важное значение не только для отрасли, но и всей окружающей инфраструктуры.

Принцип действия вибрационного оборудования, описанный в целом ряде работ (например, [25,40,190]), позволяет по сравнению с машинами аналогичного назначения получить более высокую эффективность работы и лучшие технологические, режимные, энергетические и другие параметры.

Это стало возможным, в частности, благодаря положенным в основу конструирования современных вибрационных машин принципам вибрационной механики и физическим эффектам, возникающим при действии вибрации на

линейные и нелинейные механические системы, и позволяющим добиваться значительных преимуществ перед машинами аналогичного назначения других типов.

Так, при воздействии вибраций на материал используются [5,69]:

- эффект внутрислойного вибрационного дробления и измельчения;
- принцип вибрационного перемещения (или вибротранспортирования).

В конструкциях вибрационных машин заложены:

- принцип центрирования действующих сил (приложения сил к центру масс колеблющихся частей вибромашины);
- принцип уравнивания масс вибромашины в целом или масс ее отдельных частей;
- эффект автобалансировки движущихся масс;
- эффект самосинхронизации вращения дебалансов.

Благодаря этим принципам и эффектам вибромашины имеют в том числе следующие преимущества перед машинами с вращательными рабочими органами аналогичного назначения:

- улучшение режимных параметров и увеличение производительности;
- сокращение стадильности;
- возможность пуска и остановки под нагрузкой;
- исключение поломок при попадании недробимых тел;
- снижение энергозатрат (в среднем на 30 %) и массы;
- уменьшение капитальных затрат и сокращение обслуживающего персонала;
- улучшение качества продукта (кубовидность, уменьшение отсевов, более полное раскрытие минералов, однородность фракций и т.п.);
- расширение области применения.

Использование этих принципов и эффектов привело, например в горной промышленности, к созданию уникальных дробилок (Рисунок 1.8), имеющих по сравнению с традиционными, как отечественными, так и зарубежными, меньшую энерговооруженность (киловатт установленной мощности на тонну массы машины) и проектную удельную энергоемкость дробления (киловатт-час

затрачиваемой энергии на тонну измельчаемого материала) при возможности дробления особопрочных материалов (базальта, ферросплавов, отходов твердосплавного инструмента и т.п.) [4,10,20.28.32,40,72,134].

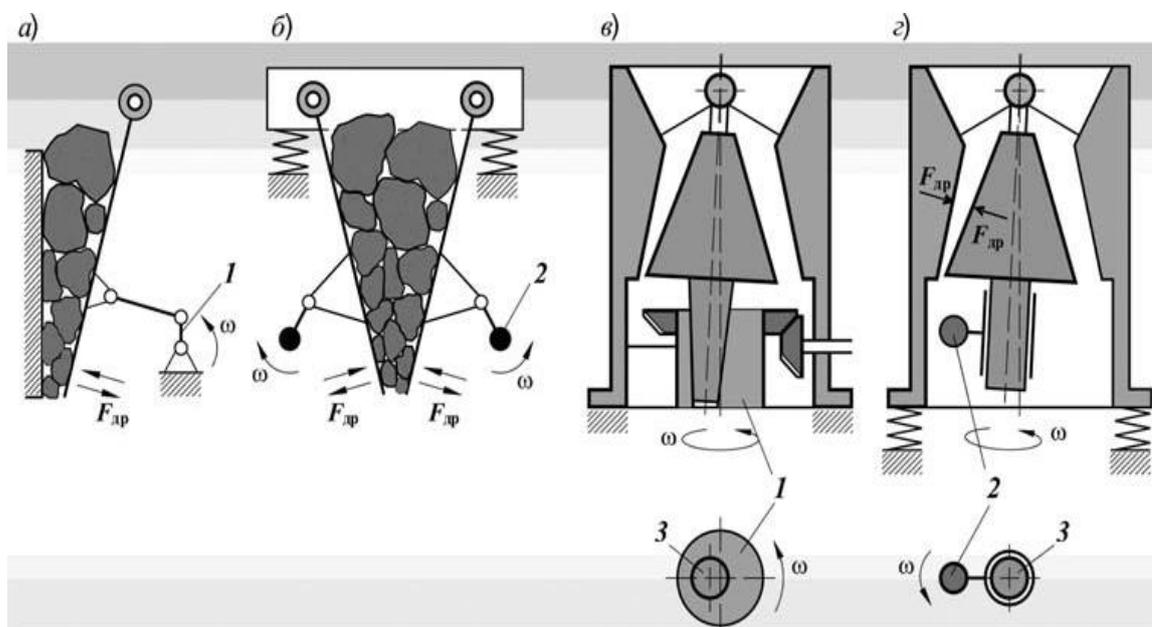


Рисунок 1.8-- Принципиальные схемы традиционных эксцентриковых (а и в) и вибрационных (б и г) дробилок, используемых в горном деле: а, б – щековые дробилки; в, г – конусные дробилки; 1 – эксцентрик; 2 – дебаланс; 3 – вал конуса [69]

Эффект внутрислойного вибрационного дробления и измельчения основан на селективном разрушении материалов, когда при регулируемом воздействии на их частицы становится возможным, например, разделение минералов по межкристаллическим связям, если их прочность ниже прочности самих кристаллов или их блоков [134]. В этом случае заданность деформации частиц заменяется заданностью дробящей силы и тогда деформация слоя определяется его сопротивлением разрушению и заданной силой. Интенсивное вибровоздействие на слой материала способствует постоянной и интенсивной переориентации его частиц относительно друг друга в рабочей зоне, что повышает вероятность их разрушения по ослабленным зонам в объеме каждой частицы с помощью соседних частиц. При этом также ускоряется удаление

скапливающейся между ними мелочи и тем самым уменьшаются потери энергии на переизмельчение, что характерно при обычных вариантах дробления в слое.

В отличие от традиционного воздействия на материал, когда энергия может тратиться на разрыв связей на неразупрочненных участках кристаллической решетки, при вибрационном воздействии она затрачивается только на развитие имеющихся в зонах приложения нагрузки зародышевых трещин [134]. Таким образом, имеет место энергетически экономное производство.

В двоярных приводах вибрационных машин используется *эффект самосинхронизации вращения дебалансов*, являющийся следствием открытого в институте «Механобр» явления, сущность которого состоит в согласованности вращения нескольких тел (роторов) с одинаковыми или кратными частотами (т.е. синхронизации) вибрационного воздействия при отсутствии между роторами кинематических связей. Следствием этого открытия для дебалансных вибровозбудителей является автоматическая (при определенных условиях) синхронизация вращения дебалансов навстречу друг другу или в одну сторону.

Так, например, оказалось, что неуравновешенные роторы вибровозбудителей, установленных на общем подвижном основании, обнаруживают столь сильную тенденцию к самосинхронизации, что даже выключение одного или нескольких из них из электрической сети не приводит к выпадению их из синхронного вращения [21,22]. Причем работающие вибровозбудители поддерживают вращение отключенных, и, если отключить один из двух вибровозбудителей, затрачивается меньше энергии, чем суммарно при обоих работающих, что сокращает энергозатраты.

Этот эффект позволяет отказаться от принудительной механической или электрической синхронизации вращения дебалансов, которые значительно ухудшают режимные, энергетические и другие показатели вибромашины.

Таким образом, машины, основанные на вибрационном принципе действия и являющиеся уравновешенными, имеют лучшие энергетические и другие показатели по сравнению с машинами аналогичного назначения.

Передача энергии привода центробежного вибровозбудителя ее колеблющейся части осуществляется инерционными силами, образующимися в относительном движении дебаланса вибровозбудителя. Величина энергии, затрачиваемой на колебания вибромашины в установившемся далеко зарезонансном режиме, пропорциональна произведению массы колеблющихся частей, квадратам заданной амплитуды и частоты колебаний вынуждающей силы.

Энергия, расходуемая на колебания, затрачивается на преодоление инерционных и упругих сил, диссипативных и других сил трения. В вибромашинах без специального демпфирования диссипативные потери и затраты на трение в подшипниках не превышают 6...8 % общих затрат энергии.

1.6 Морфологический анализ вибрационных измельчителей кормового зерна

Вибрационные измельчители широко применяются в горнодобывающей и строительной отраслях промышленности. Для крупного и среднего дробления различных материалов разработаны вибрационные дробилки [32,134]. Они представляют собой сравнительно новое, прогрессивное направление развития вибрационной техники. Большинство этих конструкций разработаны НИИ «Механобр» (ныне научно-производственная корпорация "Механобр-техника", г. Санкт-Петербург) и предназначены для измельчения неорганических минеральных материалов в горнорудной промышленности.

Преимущества вибрационных дробильных машин обусловлены следующими принципиальными особенностями механизма разрушения [32,134]:

- куски материала подвергаются силовому воздействию во всей объемной массе;
- за время прохождения зоны дробления нагружение кусков происходит многократно и быстротечно;
- куски подвергаются комбинированному нагружению, включающему деформации сжатия, сдвига, изгиба и кручения;
- в промежутках между циклами нагружения куски приобретают относительную подвижность, обеспечивающую их взаимную переориентацию,

своевременное удаление из слоя частиц готовой крупности;

- разрушающие нагрузки регулируются в зависимости от прочности и выносливости дефектных зон.

Однако все эти конструкции не способны обеспечить измельчение фуражного зерна в связи с особыми его технологическими свойствами. Немногочисленные исследования использования вибраций при дроблении зерна пока не привели к созданию измельчителя, в полной мере отвечающего потребностям животноводства [93,94].

Поэтому в данном разделе применен морфологический анализ конструкций вибрационных измельчителей фуражного зерна на предмет поиска рациональной структурной (конструктивной) схемы.

Морфологический метод (анализ) предусматривает обобщение информации в рамках специальной матрицы, в которой аккумулируется огромное количество возможных решений. В матрице проставляются значения множества переменных, существенных характеристик того или иного объекта как уже достигнутых, так и теоретически возможных в перспективе.

Морфологический метод организует мышление таким образом, что генерируются такие идеи, которые при несистематизированном подходе ускользают от внимания.

Данный метод целесообразно применять при решении научных и конструкторских задач концептуального плана: при поиске облика различных сельскохозяйственных машин и механизмов, при поиске структурных, компоновочных, схемных решений и т.д.

Рабочие процедуры морфологического метода:

- 1) точная формулировка решаемой проблемы и определение ее границ;
- 2) определение важнейших характеристик, параметров объектов;
- 3) построение «морфологического множества»: двухмерной матрицы («морфологического ящика») или трехмерной матрицы.

Далее, принимая те или иные значения параметров и их состояний (в каждой строчке матрицы), можно получить различные варианты технического исполнения того или иного устройства [132,217].

Рассматриваемый морфологический метод основан на комбинаторике. Суть его состоит в том, что в интересующем изделии или объекте выделяют группу основных конструктивных или других признаков. Для каждого признака выбирают альтернативные варианты, т. е. возможные варианты его исполнения или реализации. Комбинируя их между собой, можно получить множество различных решений, в том числе представляющих практический интерес.

Из изложенного видно, что суть метода заключается в построении морфологической таблицы, заполнении ее возможными альтернативными вариантами и в выборе из всего множества получаемых комбинаций наилучших решений.

Анализ большого количества научной и патентной литературы [56-58,76-79.] позволил нам построить морфологическую таблицу (Таблица 1.4) и соответствующую морфологическую матрицу [118] (Таблица 1.5).

Морфологическая матрица содержит как уже известные варианты технических решений (на основе которых матрица и строилась), так и множество новых (неизвестных) технических решений. Также в матрице содержатся нереализуемые технические решения (Рисунок 1.9).

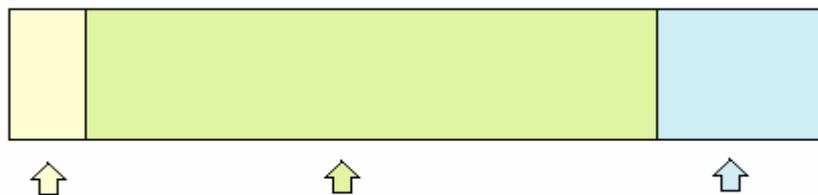
Таблица 1.4 - Морфологическая таблица

Классификационные признаки дробилки	Варианты исполнения					
	1	2	3	4	5	6
А. – Вид воздействия не измельчаемый	сжатие	сдвиг	сжатие с одновременным сдвигом	истирание	плющение	резание
Б. – Вид вибраций рабочих органов	прямолинейные вертикальные	прямолинейные горизонтальные	прямолинейные наклонные	круговые в вертикальной плоскости	круговые в горизонтальной плоскости	круговые наклонные
В. – Число полостей (камер) измельчения	1	2	3	4	5	6
Г. – Направление полостей в пространстве	вертикальное	горизонтальное	наклонное	вертикальное криволинейное	горизонтальное криволинейное	наклонное криволинейное

Д. – Отношение числа активных элементов рабочих органов к их общему числу	1/1 Место для формулы.	1/2	2/2	1/3	2/3	3/3
Е. – Число вибровозбудителей	1	2	3	4	5	6
Ж. – Тип вибровозбудителей	эксцентриковый	центробежный (дебалансный)	маятниковый	два центробежных самосинхронизирующихся	три центробежных самосинхронизирующихся	четыре центробежных самосинхронизирующихся
З. – Характер соединения активных и пассивных элементов рабочих органов	шарнирное	при помощи пружин	при использовании торсионов	по схеме двойного маятника	по схеме опрокинутого маятника	по схеме маятника Капицы
И. – Вид рабочих органов	жесткие плоские поверхности	жесткие криволинейные поверхности	пуансоны – решетки	терки (типа чешуйчатых решет)	молотки	ножи

Таблица 1.5 - Морфологическая матрица

A1	A2	A3	A4	A5	A6
B1	B2	B3	B4	B5	B6
B1	B2	B3	B4	B5	B6
Г1	Г2	Г3	Г4	Г5	Г6
Д1	Д2	Д3	Д4	Д5	Д6
Е1	Е	Е3	Е4	Е5	Е6
Ж1	Ж2	Ж3	Ж4	Ж5	Ж6
З1	З2	З3	З4	З5	З6
И1	И2	И3	И4	И5	И6



Известные решения Новые решения Нереализуемые решения

Рисунок 1.9 - Морфологическое множество решений

Морфологическую таблицу можно рассматривать как классификацию вибрационных дробилок, в которую, однако, заложены и возможные (будущие) технические решения.

Выбрать из морфологической таблицы наиболее приемлемые или эффективные комбинации технических решений нелегко из-за большого числа комбинаций. Поэтому сначала оценим число возможных вариантов технических решений, которые можно получить (синтезировать) на основе морфологической таблицы:

$$N = n_1 \cdot n_2 \dots n_m,$$

где n – число альтернативных вариантов в столбце;

m – число столбцов.

В нашем случае число вариантов измельчителей составит

$$N = 9^6 = 531441.$$

Наиболее эффективные технические решения из множества всех возможных вариантов можно выбрать путем последовательного сокращения этого множества за счет исключения неперспективных технических решений. Поскольку вариантов очень много, то эта процедура очень сложна и трудоемка.

На первом этапе мы анализировали только известные технические решения по вибрационному измельчению фуражного зерна (Таблица 1.6).

По этим решениям имеются существенные априорные данные, поэтому проведение анализа облегчается. Так, по конструкциям 2 и 4 были выполнены диссертации, а конструкции 1 и 3 были испытаны на физических моделях. Конструкция 6 выпускается серийно, но на зерне не испытывалась.

Попытки использования вибрационных машин для измельчения фуражного зерна обычно оканчивались неудачей. Так, в Алтайском ГАУ была предложена инерционная дробилка для измельчения фуражного зерна и других твердых материалов [119]. Дробилка состоит из конуса (в центре) (Таблица 1.6, рис.1), корпуса и двух самосинхронизирующихся дебалансных вибровозбудителей. Хвостовой частью конус установлен с возможностью самоцентрирования в подшипнике, опора которого связана с опорной рамой посредством упругих элементов. Во избежание распространения вибраций на

фундамент дробилки, корпус подвешен к опорной раме на тросово-пружинных подвесках. Для отвода измельченного материала служит лоток.

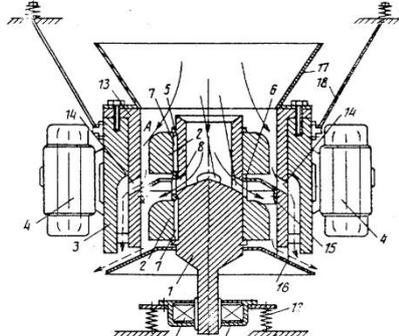
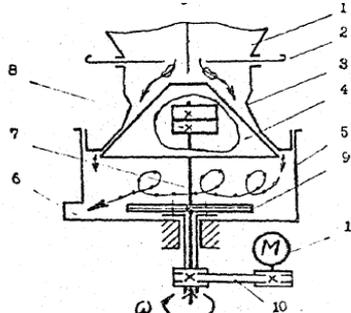
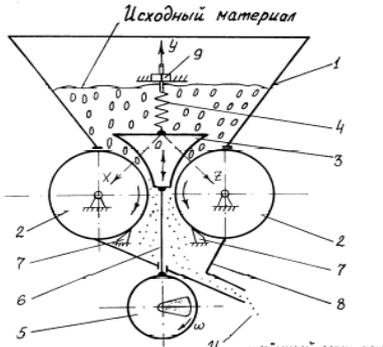
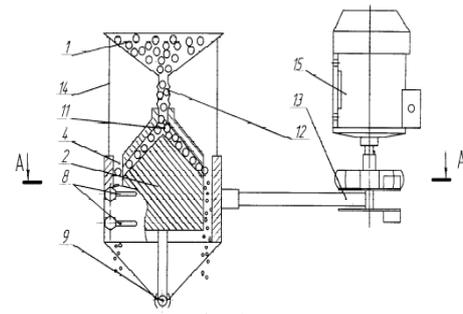
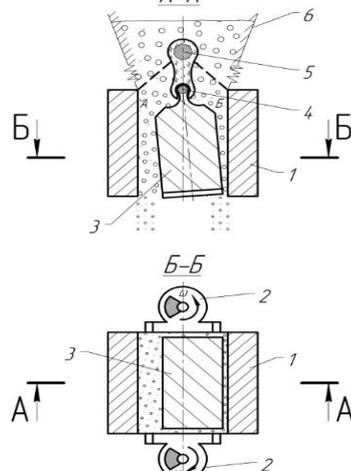
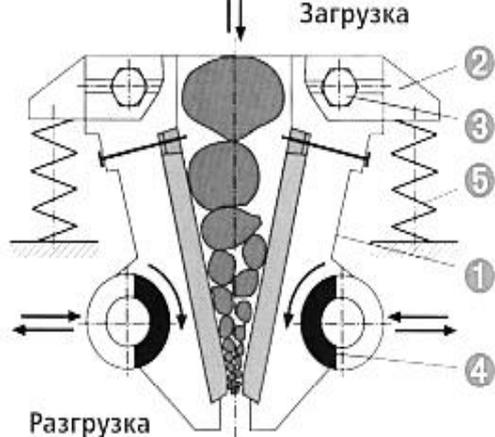
Технологический процесс протекает следующим образом. При включении вибровозбудителей корпус вместе с закрепленными на нем узлами совершает круговые колебания в горизонтальной плоскости. Эти колебания передаются конусу, вызывая интенсивную обкатку последнего по внутренней поверхности корпуса. Исходный материал из бункера под действием вибраций самотеком поступает в зону дробления, где раздавливается и просыпается на лоток, по которому отводится из дробилки [119].

Испытания показали, что дробилка при измельчении зерна демонстрирует неустойчивый технологический процесс: наблюдалось то появление большой фракции пылевидных частиц, то выходило цельное зерно. При этом на минеральном сырье (бой красного кирпича) дробилка работала успешно.

По результатам этих испытаний был сделан вывод: причиной неудачи является вид деформации зерновок - сжатие со сдвигом. Необходимо, чтобы рабочие органы осуществляли лишь простое сжатие зерновок, причем вибрационного характера.

На Рисунке 2 Таблицы 1.6 представлена конструктивно-технологическая схема конусной вибрационной дробилки, которая состоит из бункера 1 с заслонками 2, наружного 3 и внутреннего 4 конусов [93]. Наружный конус 3 связан с корпусом 5, имеющим выгрузной патрубком 6. Внутренний конус 4 подвижно закреплен на валу 7, на этом же валу жестко закреплены два дебаланса 8, крыльчатка 9, шкив клиноременной передачи 10, связанной с валом электродвигателя 11. Процесс работы вибрационной дробилки с упругим валом протекает следующим образом: зерновые компоненты из бункера 1 поступают в зону дробления, находящуюся между наружным 3 и внутренним 4 конусами, где они подвергаются воздействию комплекса динамических сил. Измельченные частицы под действием сил тяжести и потока воздуха направляются в камеру корпуса 5 и удаляются из неё через выгрузной патрубком 6. Внутренний конус 3 совершает вибрационное движение, которое генерирует упругий вал 7 с дебалансом 8, получающие вращение через клиноременную передачу 10 от электродвигателя 11.

Таблица 1.6 - Известные конструктивные реализации вибрационных измельчителей фуражного зерна и их обозначение по морфологической матрице

<p>A3-B5-B1-Г1-Д1-Е2-Ж2-35-И1</p>	<p>A3-B5-B1-Г3-Д1-Е1-Ж2-31-И2-</p>
<p>Рисунок 1</p>	<p>Рисунок 2</p>
	
<p>А. с. № 1540722 (Алтайский ГАУ)</p>	<p>Патент № 2031707 (Казанская ГСХА)</p>
<p>A3-B1-B2-Г3-Д3-Е1-Ж3-32-И2</p>	<p>A1-B2-B2-Г1-Д1-Е1-Ж3-31-И1-</p>
<p>Рисунок 3</p>	<p>Рисунок 4</p>
	
<p>Патент № 2085288 (Алтайский ГАУ)</p>	<p>Патент № 2262984 (Алтайский ГАУ)</p>
<p>A1-B2-B2-Г1-Д1-Е2-Ж2-34-И1</p>	<p>A1-B4-B1-Г1-Д3-Е2-Ж2-33-И1-</p>
<p>Рисунок 5</p>	<p>Рисунок 6</p>
	
<p>Патент №2688424 (ООО «Сибирская технологическая компания»)</p>	<p>Патент №2228221 (НПК «Механобр-Техника»)</p>

Вибрационное движение внутреннего конуса обеспечивает ударно-сдвиговые деформации зерна в зазоре между конусами. Степень измельчения материалов зависит от исходной крупности, силы взаимодействия конусов и ширины калибровочной зоны конусов - зоны параллельности образующих поверхностей конусов в их нижней части, определяющей число ударов на частицу.

Максимальная производительность дробилки в 140... 145 кг/ч достигается при частоте вращения вала 5000 об/мин., зазоре между конусами 1,5 мм, при наибольшем значении величины дебаланса и влажности зерна 10 % [93].

При степени измельчения ($\lambda = 5...6$) получена степень однородности готового продукта 87...95%. Удельная энергоёмкость процесса дробления составила 8.5...9.2 кВт-ч/т.

Такие показатели не дают каких-либо преимуществ данной дробилки перед молотковыми дробилками. Требование частоты вращения дебалансного вала в 5000 об/мин делает эту дробилку практически неприменимой на производстве.

В дробилке Рисунка 3 таблицы 1.6 также осуществляется сжатие зерна с одновременным сдвигом, а недостатки конструкции такие же, как у предыдущей модели [120].

В связи с этим исследователями Алтайского ГАУ принято решение отказаться от разработки конструкций, в которых осуществляется деформации сжатия со сдвигом, а сосредоточиться на устройствах, в которых присутствует лишь сжатие зерновок.

Такой вид деформации был осуществлен в следующем техническом предложении, признанном изобретением [121]. Новая конструкция вибрационно-ударного измельчителя фуражного зерна, состоящая из молота 4 (Таблица 1.6, Рисунок 4), выполненного в виде маятника, основание которого подвешено на оси к прямоугольному корпусу (корзине) 3.

Рабочая часть молота расположена внутри корзины, состоящей из двух рабочих щек 11 и двух боковых стенок 12, в которых выполнены регулировочные отверстия 6. В верхней центральной части молота выполнен разветвляющийся

канал 8, соединяющий ее с двумя камерами измельчения 7, образованными рабочими щеками корпуса и молота.

В качестве вибропривода использован маятниковый дебалансный вибровозбудитель 2, ось которого присоединена к корпусу в точке пересечения плоскостей, проходящих через центр масс измельчителя.

Поддерживающие элементы выполнены в виде тросов 9, на которых подвешена корзина с четырех углов к раме. Это позволяет обеспечить сбалансированную работу установки. Над измельчителем к раме крепится загрузочный бункер 10.

Работа дробилки происходит следующим образом. Маятниковый дебалансный вибровозбудитель генерирует переменную возмущающую силу, создающую колебательные прямолинейные движения корзины с определенной амплитудой. Так как корзина связана с маятником шарнирно, возникает переносная сила инерции, действующая на молот, заставляя его двигаться в противофазе, производя попеременные ударные воздействия в камерах измельчения. Зерновой материал самотеком из бункера поступает через разветвляющийся канал молота в две камеры измельчения.

Находясь между рабочими щеками молота и корзины, зерновки неоднократно подвергаются ударному воздействию с частотой, равной частоте вращения ротора электродвигателя.

Скорость прохождения зерновкой зоны измельчения, а соответственно, и количество ударных воздействий зависят от зазора и высоты камеры измельчения, а также от оборотов электродвигателя. Измельченный материал выпадает из рабочей зоны измельчителя в приемный бункер 7.

Использование в качестве поддерживающих элементов подвесных тросов 9 способствует снижению динамической нагруженности и шума машины. Измельчитель прост по устройству. Измельчение происходит за один проход материала через рабочие органы, при этом обеспечивается требуемая дисперсность готового продукта.

Испытания этой конструкции показали устойчивость технологического процесса, низкую энергоемкость, высокое качество измельченного продукта [84].

Была мала лишь производительность дробилки.

В настоящей диссертационной работе исследуется, кроме прочих, вариант конструкции измельчителя с двумя самосинхронизирующимися вибровозбудителями центробежного типа [122]. Такой привод, в соответствии с основополагающими принципами конструирования технологических вибрационных и вибрационно – ударных машин [25,69,218], позволяет создать энергонасыщенную машину и на этой основе повысить производительность и компактность измельчителя фуражного зерна.

Рабочие органы измельчителя (Рисунок 5 Таблицы 1.6) включают активный элемент в виде корзины 1 с установленными на ней вибровозбудителями 2, а также пассивный элемент 3, представляющий собой массивный маятник 3, кинематически связанный с активным элементом 1 в точке подвеса 4.

Активный элемент 1 может совершать угловые колебания в плоскости чертежа, поскольку снабжен шарнирным подвесом 5. Сверху всей конструкции установлен бункер 6, в который засыпается исходное фуражное зерно.

В процессе измельчения зерно истекает из бункера 6 и попадает в активные зоны между рабочими органами 1 и 3, под воздействием которых исходное зерно измельчается. Степень измельчения зерна регулируется изменением кинетических моментов дебалансов, которыми оснащены центробежные вибровозбудители 2.

Подобные конструкции успешно применяются при дроблении различных горных пород [32].

В целом конструкция данного измельчителя представляет собой симметричную систему с двумя осями симметрии. В таких системах центробежные вибровозбудители всегда самосинхронизируются [25], поэтому можно считать, что активный элемент 1 (корзина) находится под действием суммарной вынуждающей силы двух центробежных вибровозбудителей.

Сильной стороной данного измельчителя, построенного по схеме двойного маятника с двумя самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями, является большое дробящее усилие. Это позволяет

надеяться на повышение производительности устройства, чего не хватает известным вибрационным измельчителям фуражного зерна. Математическое и компьютерное моделирование показывает работоспособность данной конструкции измельчителя [221].

Перспективной для зерна является также разработка НПК «Механобр-Техника»), использующаяся на дроблении горных пород (Рисунок 6 Таблицы 1.6). Рабочие органы этой дробилки совершают не только качательные движения, но и вертикальные прямолинейные, что при соответствующей настройке может привести к ускоренному движению измельчаемого материала вниз, и, как следствие, к повышению производительности.

Практическим выходом нашего анализа морфологической матрицы явились новые технологические схемы вибрационных зерноизмельчителей [192]. Они защищены патентами [121,122,124,125].

В дальнейшем поиск эффективных конструкций измельчителей фуражного зерна с использованием созданной морфологической матрицы будет продолжен. Однако анализ и отбор нужных конструкций теперь будет проходить при дефиците исходной информации, при ее нечеткости и расплывчатости. В этом случае необходимо привлечение знаний экспертов и составление множества Парето.

Методы структурного анализ и синтеза новых технических систем на базе морфологического подхода подробно изложены в работе [132]. Особо следует отметить метод нечеткой многокритериальной оптимизации, предложенный американскими математиками Беллманом и Заде, который успешно апробирован при выборе технологий и оборудования в сельском хозяйстве [199].

1.7 Анализ состояния теоретических и экспериментальных исследований в области вибрационного измельчения зерна

Теоретические и экспериментальные исследования вибрационного измельчения зерна были проведены в Казанской ГСХА и Алтайском ГАУ.

Так, в диссертационной работе О. Ю. Маркина разработана конусная вибрационная дробилка с упругим дебалансным валом, предназначенная для измельчения зерновых материалов [93].

Для динамического анализа дробилки с учетом упругости звеньев в диссертации принято, что внутренний конус совершает колебательное движение в одной плоскости. Подвижный конус представлен в виде ползуна массой m_1 , упругий вал в виде пружины с коэффициентом жесткости k_1 , а зерновой материал, находящийся в зазоре между конусами, является упругой средой с коэффициентом жесткости k_2 .

Ползун, изображенный на Рисунке 1.10, связан со станиной пружинами 1 и 2, может скользить без трения вдоль паза. т.е. совершать поступательное колебательное движение. К ползуну приложена постоянная по величине возмущающая сила P , вектор которой вращается с угловой скоростью ω .

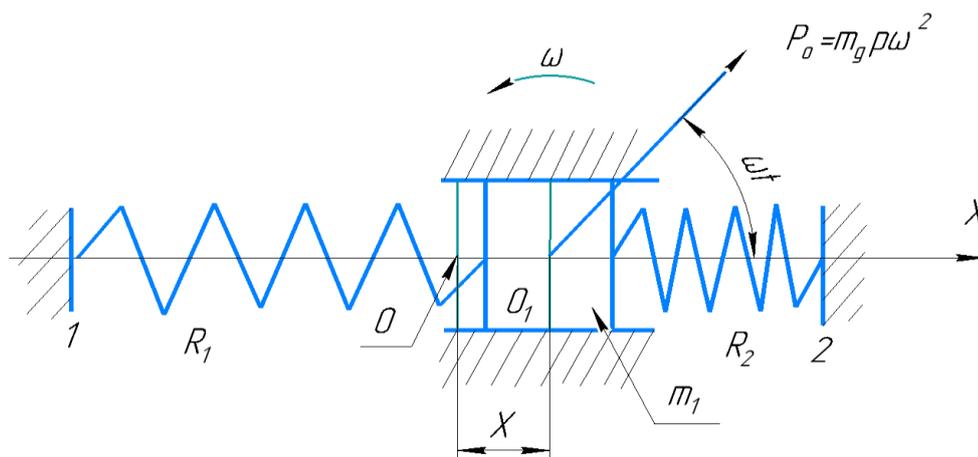


Рисунок 1.10 - Динамическая система дробилки (по О. Ю. Маркину)

В соответствии с этой схемой для анализа динамики дробилки было использовано уравнение вынужденных колебаний без демпфирующего члена. Таким образом, влияние технологической нагрузки на динамические свойства дробилки учтено не было.

На Рисунке 1.11 а представлена графическая зависимость разрушающего усилия от влажности слоя зернового материала (1-ячмень, 2- овес, 3-пшеница, 4-рожь, 5-горох). С увеличением влажности зерна усилие разрушения снижается. На Рисунке 2.11 б изображена зависимость разрушающего усилия от величины деформации. Из графиков видно, что разрушение влажных материалов наступает

при большей деформации, чем у сухих. По данным экспериментов определялись коэффициенты жесткости слоя зерновых материалов, используемые в анализе динамики дробилки.

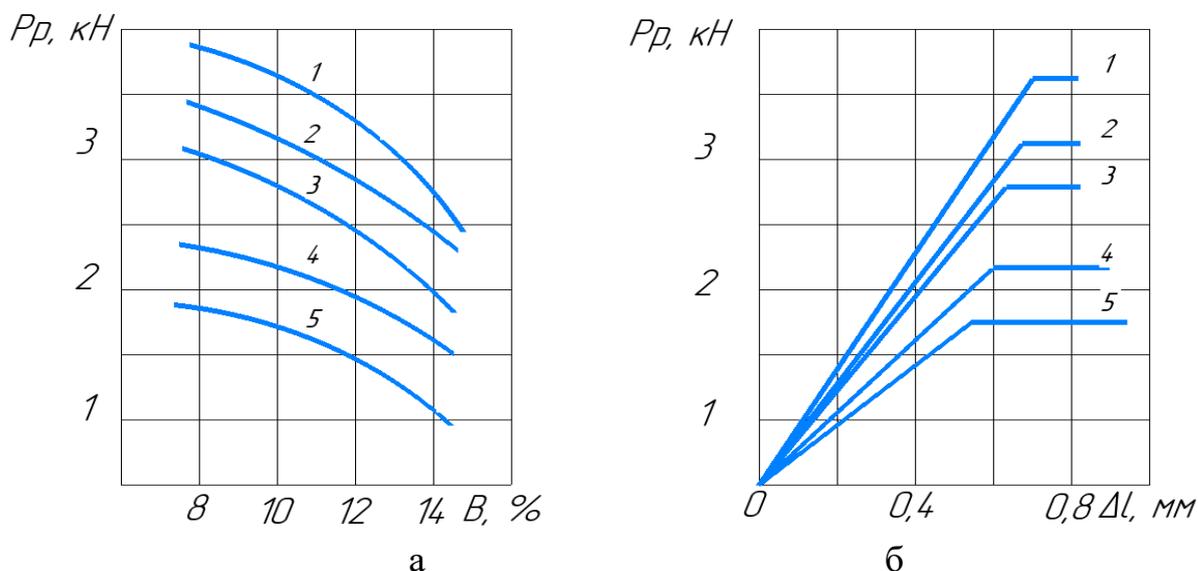


Рисунок 1.11- Зависимости разрушающего усилия от влажности зерна (а) и абсолютной деформации при $B=10\%$ (б)

Исследованиями также установлено, что с увеличением влажности до 12 % производительность дробилки уменьшается. После 5000 мин⁻¹ производительность измельчителя снижается. Снижение производительности вызвано наступлением явления виброкипения зернового материала в зеве дробилки. Зерновой материал выбрасывается внутренним конусом, совершающим высокочастотные колебания.

Работа С. А. Мартянова [94] посвящена, в основном, динамическому анализу и расчету деталей и узлов дробилки, и в технологическом плане интереса не представляет.

Последней в хронологическом порядке является наша диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук [84]. В ней отмечено, что для измельчения зернового материала вибрационные машины до настоящего времени разработаны не были. На это есть ряд причин: во-первых, это малоизученность воздействия вибрации на измельчаемый материал; во-вторых, разнообразие физико-механических и реологических свойств зернового материала; в-третьих, сложность динамических процессов, протекающих в относительно простых по конструкции вибрационных измельчителях.

Используя уравнение Лагранжа второго рода, а также метод граничных условий, оговаривающих состояние системы на границах некоторого заранее выбранного интервала ее движения, были получены законы движения корзины и молота при ударном взаимодействии с учетом конструктивных и технологических факторов. Технологические свойства зерна были учтены при этом при помощи R - коэффициента восстановления нормальной скорости.

При анализе устойчивости периодических режимов движения молота в полости корзины был использован математический метод «припасовывания». В результате припасовывания обнаружены определенные закономерности изменения малых возмущений при числе припасовываемых интервалов, стремящихся к бесконечности. Если величины малых возмущений при этом остаются ограниченными, то соответствующее невозмущенное движение считается устойчивым.

Были определены также критерии подобия рабочего процесса, необходимые для проектирования типоразмерных рядов вибрационно-ударных измельчителей фуражного зерна. С учетом результатов анализа математических моделей, описывающих процесс измельчения зернового материала, были установлены рациональные значения критериев подобия при работе измельчителя на пшенице и ячмене.

Экспериментально полученные данные подтвердили результаты теоретических исследований о влиянии зазора камер измельчения и угловой скорости вращения дебалансов на производительность измельчителя и удельную энергоемкость процесса измельчения.

Решение оптимизационной задачи методом линейной свертки критериев (методом весовых коэффициентов) позволило установить оптимальные значения критериев оптимальности.

Данная докторская диссертация является развитием и углублением проведенных нами предыдущих исследований.

1.8 Общая схема диссертационного исследования

В диссертации разработаны методологическая база исследований рабочего процесса вибрационных измельчителей кормового зерна и теория взаимодействия вибрационных рабочих органов с технологической средой в виде слоя кормового зерна.

Специфика процесса вибрационного измельчения кормового зерна позволяет рассматривать формализованные взаимосвязи процесса, протекающего в рабочем пространстве измельчителя, с особенностями свойств зерновых материалов, вибрационных рабочих органов, конструктивно - режимных параметров, а также их влияние на качественные показатели готового продукта. Методологическая база исследований процесса вибрационного измельчения кормового зерна (Рисунок 1.12) является фундаментом многоступенчатой и многозвенной структуры исследования, которая включает:

- морфологический анализ существующих конструкций вибрационных измельчителей с целью выявления перспективных конструктивных схем;

- исследование реологических свойств кормового зерна и их влияния на процесс измельчения;

- разработку и анализ дифференциальных уравнений движения вибрационных рабочих органов с учетом технологической среды;

- разработку теории измельчения и математической модели процесса на основе рациональной формулы В. П. Горячкина;

- исследование энергетических и качественных показателей процесса, многокритериальная оптимизация параметров вибрационного измельчителя кормового зерна.

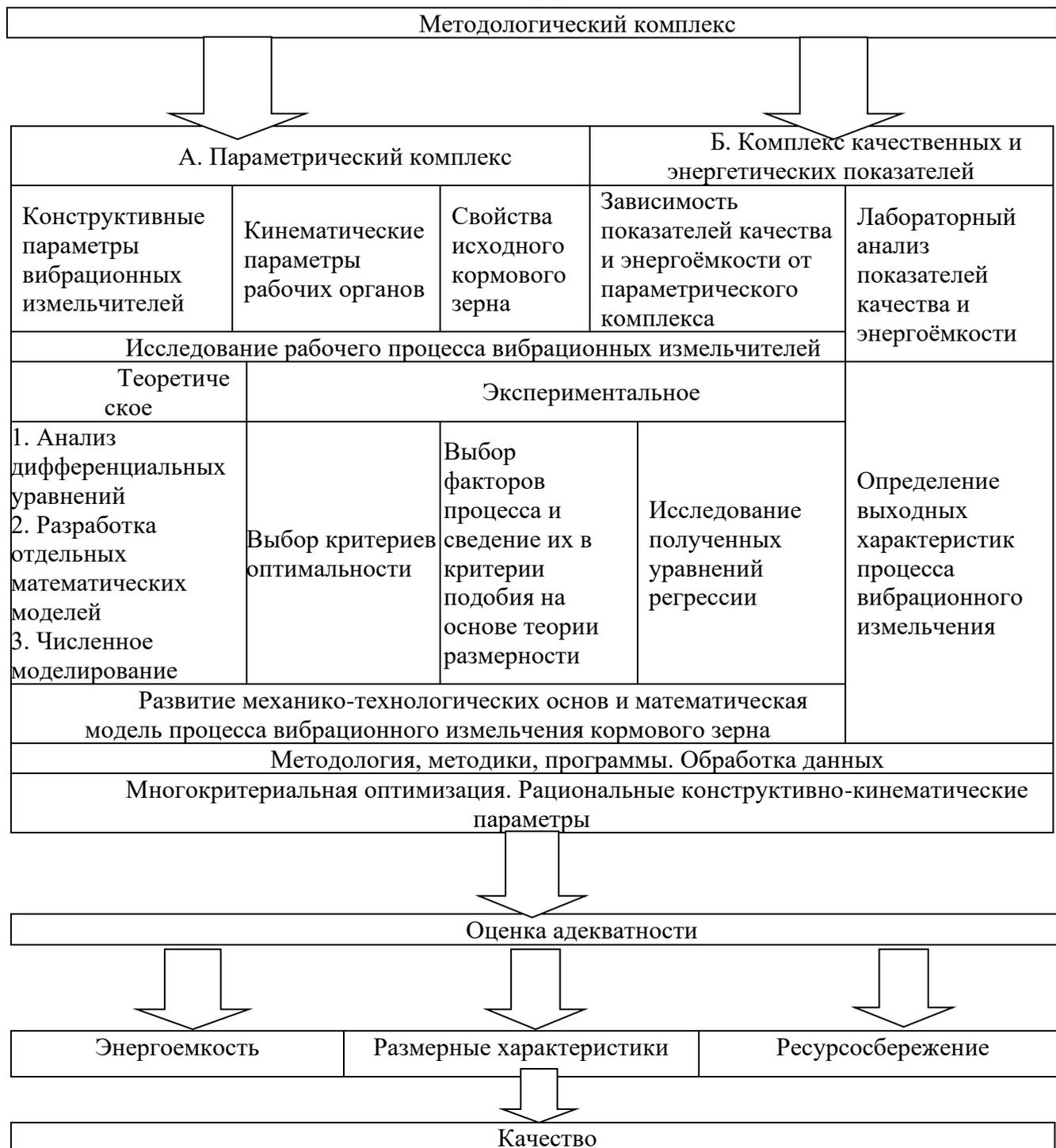


Рисунок 1.12. Методологическая база исследований процесса измельчения кормового зерна вибрационными рабочими органами

Выводы по главе 1

1. Проблемная ситуация в области измельчения фуражного зерна состоит в том, что, с одной стороны, постоянно растут требования к качеству

измельчения зернового сырья, снижению расхода энергии, металла, а с другой стороны, традиционные измельчающие устройства и научные знания в этой области не могут обеспечить дальнейшее коренное совершенствование данного процесса. В связи со сказанным, особую актуальность приобретают вопросы разработки измельчителей вибрационного действия, позволяющих получать, в сравнении с молотковыми дробилками, более однородный состав готового продукта, при минимизации энергоемкости и металлоемкости процесса.

2. В горном деле и строительной промышленности вибрационные дробилки выпускаются серийно и широкомасштабно используются, поэтому стало очевидным, что в режимах сверхтонкого измельчения в них, по сравнению с эксцентриковыми дробилками, удалось снизить удельные энергозатраты на единицу степени дробления в 1.5 раза, а на прирост вновь образованной поверхности в 2 раза. В то же время почти вдвое снижается потребление электроэнергии на 1 т перерабатываемого материала. Однако все эти конструкции не способны обеспечить измельчение фуражного зерна в связи с его уникальными технологическими свойствами. Положительные результаты работы в других отраслях побуждают искать применение вибрационных дробилок и в сельском хозяйстве.

3. Немногочисленные исследования использования вибраций при дроблении зерна пока не привели к созданию измельчителя, в полной мере отвечающего потребностям животноводства. В трудах С. Н. Васильева, О. Ю. Маркина, С. А. Мартянова, И. Я. Федоренко содержатся основы теории измельчения зерна вибрационными рабочими органами, на базировании которой созданы лабораторные образцы вибрационных дробилок. Однако проблема не была полностью изучена и решена. Степень разработанности научных задач оказалась недостаточной, чтобы получить исходные данные для проектирования промышленного образца вибрационного измельчителя фуражного зерна. Небольшой объем теоретических и экспериментальных исследований в области использования вибрационных дробилок не позволяет пока надеяться на широкое применение этих машин в животноводстве. Это диктует необходимость дальнейшего рассмотрения проблемы, исходя из современных методов и

возможностей.

4. Для совокупности (множества) вибрационных измельчителей фуражного зерна составлены морфологическая таблица и морфологическая матрица, включающие около полумиллиона вариантов исполнения данной машины. На основе морфологической матрицы был проведен анализ известных конструкций измельчителей и синтезированы новые устройства, обеспечивающее повышение дробящего усилия и производительности.

5. На основании проведенного обзора сформулирована научная гипотеза (в которой, как аналог, подразумевается процесс измельчения кормового зерна в ныне доминирующей на производстве молотковой дробилке): малая энергоемкость процесса вибрационного разрушения кормового зерна обусловлена рекуперацией упругих деформаций зерновок, многократным воздействием на них нагрузкой ниже критической, слабым трением зерновок друг о друга и рабочие органы, отсутствием генерации сопутствующего воздушного потока.

6. Представленный обзор состояния проблемы позволил также сформулировать цель, задачи и другие положения диссертационного исследования (см. Введение диссертации).

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ

2.1 Механизм разрушения фуражного зерна вибрационными рабочими органами

Наибольшее применение в современном производстве имеют механические способы измельчения [4,9,10,16,20,25,26,28,32,33,57,58]. Необходимая интенсификация процесса измельчения может быть достигнута при использовании рабочих органов вибрационного действия и только на основе глубоких знаний как принципа действия и конструкций соответствующего оборудования, так и особенностей технологического сырья.

Рассмотрим принцип воздействия вибрационных рабочих органов на дробимый материал на примере схем, изображенных на Рисунке. 2.1.

Простейший вибрационный измельчитель имеет две щеки (элемента), образующие камеру измельчения. Рабочие поверхности щек могут быть плоскими (Рисунок 2.1 а) или криволинейными (Рисунок 2.1 б). По крайней мере одна из щек снабжена виброприводом, осуществляющим ее качательное движение. Вторая щека является пассивной и создает, вследствие инерции, противодействие разрушаемым телам. Применение ударно-вибрационного воздействия щек с высокой частотой позволяет разрушать исходный материал за несколько десятков ударов.

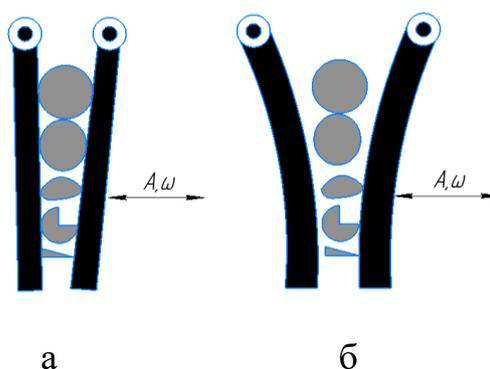


Рисунок 2.1 - Принципиальные схемы вибрационных измельчителей:

а) с плоскими; б) с криволинейными рабочими поверхностями

Определим механизм разрушения кормового зерна, исходя из его технологических свойств и особенностей функционирования вибрационных рабочих органов.

Многочисленные испытания разных материалов при циклическом изменении напряжений позволяют установить следующие основные положения [8,65,72,74,103,130]:

1. Материалы могут разрушаться при напряжениях, значительно меньших предела прочности и даже предела текучести, если только напряжения изменяются достаточное число раз.

2. Существует такое минимальное напряжение (предельное), при котором материал выдерживает, не разрушаясь, практически неограниченно большое число перемен напряжений.

3. Деформационная (малоцикловая) усталость, согласно деформационной теории усталости разрушения, наступает в момент исчерпания ресурса пластичности, вследствие пластической деформации в каждом цикле.

Малоцикловая (деформационная) прочность зависит от пластичности материала. Однако картина разрушения даже для вязкоупругих материалов в этом случае подобна хрупкому разрушению [130]. После некоторого числа циклов на поверхности тела появляется трещина, которая прорастает далее и далее до момента разрушения.

Кормовое зерно состоит из отдельных зерновок, которые обычно представляют собой мучнистые, а не стекловидные тела. Если учесть, что на корм скоту отправляют, чаще всего, щуплое и пораженное вредителями зерно, то зерновки следует считать не упругими, а вязкоупругими телами. Следовательно, необходимо учитывать внутреннее рассеяние энергии при циклическом деформировании зерновок, хотя сам механизм разрушения может быть подобен хрупкому типу.

Мы разделяем процесс вибрационного измельчения на три периода:

- а) инкубационный;
- б) период первичного разрушения зерновки;
- в) процесс доизмельчения осколков (при необходимости).

Во время инкубационного периода, состоящего из нескольких стадий сжатия-разгрузки зерновок, энергия затрачивается на преодоление неупругих сопротивлений, инициирование и рост внутренних трещин. Наиболее важен в энергетическом отношении инкубационный период.

При измельчении зерновки несколькими ударами механизм разрушения подобен малоцикловой усталости, когда при относительно небольшом числе циклов нагружения (в нашем случае вибровоздействий) образуются и растут трещины, обуславливающие разделение тела на части.

Правильный выбор основных параметров измельчителей фуражного зерна должен основываться на глубоком знании процесса разрушения единичных зерновок, на четком представлении реологии их деформирования.

Одноосное сжатие наиболее эффективно для разрушения вследствие больших возможностей для деформаций (при двухосном, а, тем более, трехосном сжатии, материал стремится не к разрушению, а к спрессовыванию), поэтому прием его в качестве основного для процесса разрушения частиц фуражного зерна. Одноосное сжатие с высокой энергией нагружения легче всего обеспечить путем приложения к измельчаемым зерновкам ударно-вибрационной нагрузки [13,32,52,95].

Эти принципы положены в основу функционирования предложенных нами вибрационно-ударных измельчителей фуражного зерна, конструкции которых защищена патентами РФ [121-125].

Характеристиками измельчаемого материала могут быть коэффициенты восстановления скорости целыми зернами R_* и образовавшимися при ударе частицами R_{**} . Следовательно, проводя испытания с такими скоростями удара, при которых часть зерновок разрушается, а другая нет, и определив коэффициенты восстановления скорости R_* и R_{**} , можно сделать определенные выводы о реологических свойствах исходных зерновок.

Рассмотрим результаты экспериментов, проведенных в Алтайском ГАУ на специально сконструированном динамическом нагружателе зерна, в котором неподвижная зерновка нагружалась падающим с некоторой высоты ударником

[121,160]. На Рисунке.2.2 в качестве примера даны зависимости $R = f(v)$ для пшеницы при ее влажности $W = 13,5\%$; $18,5\%$ и $23,5\%$.

Как видно, с увеличением скорости удара (т. е. приложенного напряжения) коэффициенты восстановления скорости ударника R_* и R_{**} снижаются. Монотонные участки зависимостей указывают на скрытое трещинообразование, не приводящее к разделению зерновки на части. Разрыв зависимости $R=f(v)$ – на графике это изображается ступенькой – в физическом смысле является порогом, после которого наступает реальное разрушение зерновки. Это подтверждает правомерность введения R_* и R_{**} , различающихся своими значениями. Для зерна пшеницы влажностью $W=13,5\%$ об R_* есть смысл говорить при скоростях удара до 40 м/с. При бóльших скоростях оправдано введение R_{**} .

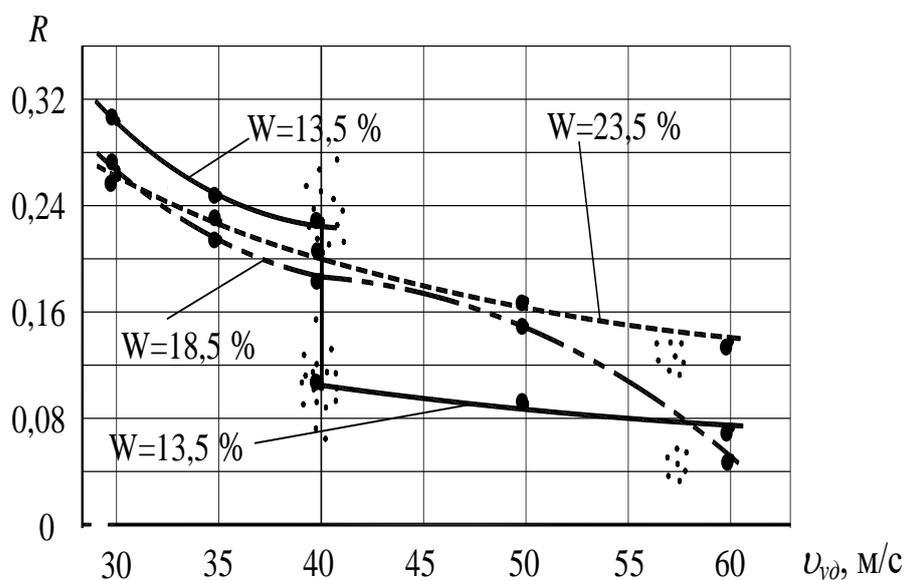


Рисунок 2.2 - Зависимость коэффициента восстановления R от скорости удара $v_{уд}$ и влажности зерна W для пшеницы (опыты Смышляева А. А.)

В то же время для пшеницы влажностью 18,5 и 23,5% отмеченной разрывной характеристики не получено. Это говорит о доминировании при этих влажностях чисто пластических свойств и неэффективности разрушения зерна ударом.

Поэтому энергетический баланс ударного процесса применительно к единичной зерновке в «инкубационном» периоде можно представить в следующем виде [120,201-203]:

$$\frac{mv^2}{2} = A_v + \frac{mv_*^2}{2}$$

где m - масса зерновки;

v, v_* - скорости тела, ударяющего по зерновке, до и после (отскок) удара.

Учитывая, что $v_* = R_*v$, из этого выражения найдем энергию, поглощенную зерновкой при ударе

$$A_v = \frac{mv^2}{2} (1 - R_*^2)$$

Коэффициент поглощения ψ_v найдем как отношение поглощенной энергии A_v к подведенной $0,5mv^2$

$$\psi_v = 1 - R_*^2. \quad (2.1)$$

При ударах по зерновке пшеницы влажностью 13,5% со скоростью ударника около 40 м/с, предшествующей разрушению, поглощается около 95% энергии удара ($\psi_v = 1 - 0,23^2 = 0,947$). На окончательное разделение зерновки на части энергии затрачивается существенно меньше

$$\psi_s = (R_*^2 - (R_*)^2) = 0,23^2 - 0,11^2 = 0,041 \text{ (4,1\%)}. \quad (2.2)$$

Таким образом, «инкубационный» период, когда идет скрытое трещинообразование, очень важен с энергетической точки зрения. Именно он определяет общие затраты на измельчение фуражного зерна.

Аппроксимируем далее зависимость $R=f(v)$, при этом предполагаем, что при $v=0$ значение $R_*=1$.

Указанную зависимость $R=f(v)$ в промежутке от $v=0$ до $v_{разр}$ можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью

$$R(v) = \exp(-\alpha v), \quad (2.3)$$

где α – экспериментально определяемый коэффициент.

Коэффициент α легко определяется по формуле (2.3) и имеющимся экспериментальным данным [124].

Для ячменя $W=11,5\%$ последовательно имеем:

$$0,17 = \exp(-\alpha 75); \quad \ln 0,17 = -\alpha 75; \quad \alpha = -\frac{\ln 0,17}{75} = 0,024 \text{ с/м.}$$

Для пшеницы $W=13,5\%$ подобным образом находим:

$$\alpha = -\frac{\ln 0,23}{40} = 0,037 \text{ с/м.}$$

Поскольку при ударных испытаниях напряжение σ

$$\sigma = \rho v^2, \quad (\text{здесь } \rho - \text{плотность зерновки}) \quad (2.4)$$

то зависимость (2.3) можно представить в ином виде

$$R(\sigma) = \exp(-\alpha \sqrt{\sigma/\rho}), \quad (2.5)$$

В связи с формулами (2.3) и (2.5) можно уточнить выражение для коэффициента поглощения

$$\psi_V(v) = 1 - \exp(-2 \alpha v); \quad (2.6)$$

$$\psi_V(\sigma) = 1 - \exp(-2 \alpha \sqrt{\sigma/\rho}). \quad (2.7)$$

Коэффициент поглощения связан с используемым в теории колебаний понятием логарифмического декремента колебаний δ зависимостью

$$\psi_V = 2\delta. \quad (2.8)$$

Примерный график зависимости (2.7) представлен на Рисунке 2.3. Его сравнение с графиками для строительных и машиностроительных материалов (Рисунок 2.4) указывает на сходство по поглощающим свойствам со строительными материалами, такими как бетон, дерево, резина и т. п.

Зададимся далее вопросом – на что затрачивается энергия в инкубационном периоде, когда нет видимых разрушений зерновки. При этом нам потребуются некоторые понятия теории пластичности [5], которые мы излагаем ниже.

Макроскопическим пределом текучести называют механическую характеристику материала, характеризующую напряжение, при котором деформации продолжают расти без увеличения нагрузки.

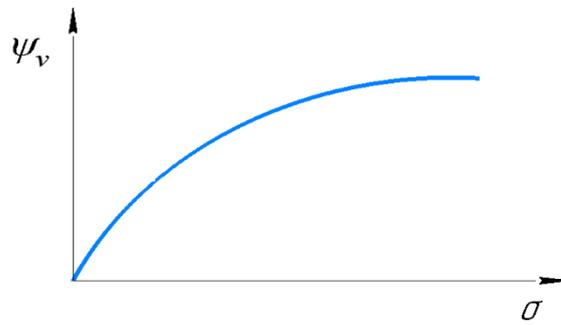


Рисунок 2.3- Примерный вид зависимости $\psi=f(\sigma)$ для зерна

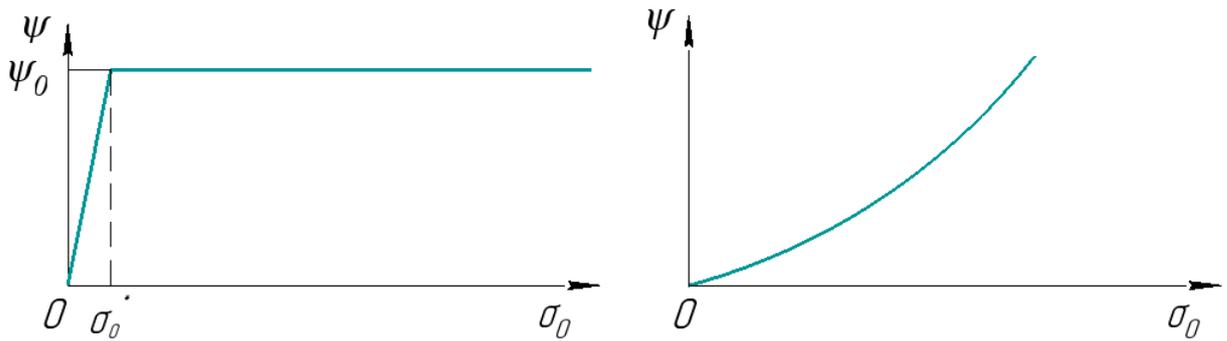


Рисунок 2.4- Примерные зависимости коэффициента поглощения ψ от амплитуды напряжения σ_0 при циклических нагружениях: а) для строительных материалов; б) для машиностроительных материалов[7]

На диаграмме напряжений (Рисунок 2.5а) предел текучести обозначается точкой, в которой начинается практически горизонтальный участок диаграммы, называемый площадкой текучести.

После прохождения предела текучести в материале образца начинают происходить необратимые изменения, появляются значительные пластические деформации.

В случаях, когда на диаграмме напряжений нет выраженной площадки текучести, как это имеет место при деформировании зерновок (см. Рисунок 1.6), определяют так называемый *условный предел текучести* $\sigma_{0,2}$. Это величина напряжений, при которых относительные остаточные деформации равны 0,2%.

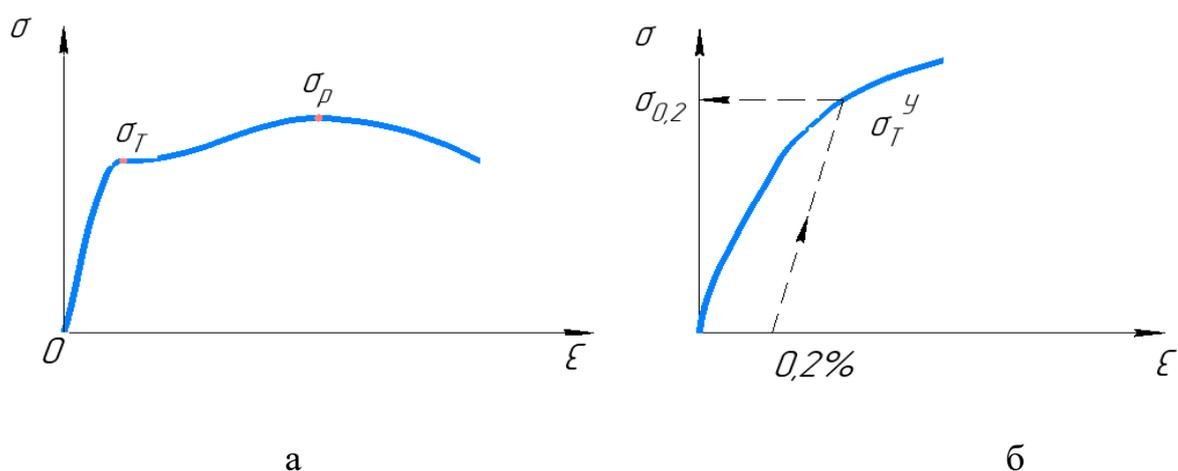


Рисунок 2.5- Макроскопический предел текучести (а) и условный макроскопический предел текучести (б) материала

Для его определения (см. Рисунок 2.5б) вдоль оси ϵ откладывается значение, равное $0,2\%$, откуда проводится луч, параллельный начальному участку диаграммы напряжений. Точка пересечения луча с линией диаграммы есть условный предел текучести для данного материала.

Таким образом, можно констатировать, что при напряжениях

$$\sigma < \sigma_T \quad (2.9)$$

зерновка деформируется упруго, а при

$$\sigma > \sigma_T \quad (2.10)$$

она начинает проявлять и неупругое сопротивление.

Обратимся далее к эпюре деформирования зерновки (на примере гороха, проса, имеющих круглое сечение) вибрационными нагрузками (Рисунок 2.6).

В цикле сжатия, поскольку рабочие поверхности плоские, а зерновки округлые, в последних образуется конус нормальных напряжений Родина (см. гл.1 и рис. 2.6). Распределенная эпюра нормальных напряжений имеет неравномерный характер, что при пластических деформациях приводит к сдвигу отдельных слоев зерновки и появлению микротрещин. Это положительный процесс, поскольку появление любых трещин есть образование новых поверхностей, что и является задачей измельчения.

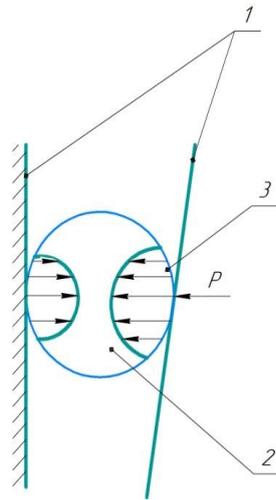


Рисунок 2.6- Сжатие зерновки вибрационными рабочими органами: 1- рабочие органы; 2- зерновка в сечении; 3- эпюра нормальных напряжений σ

Однако в цикле разгрузки зерновки при снятии сжатия поверхности образовавшихся трещин проскальзывают относительно друг друга, при этом появляется сухое трение и непроизводительные затраты энергии. Эти эффекты в принципе известны и носят название микропластичности [65,66,112]. Однако в отношении измельчения зернового материала эти эффекты, насколько нам известно, никогда не рассматривались. Это и обусловило появление нашей научной гипотезы, изложенной во введении.

В гипотезе сказано о рекуперации энергии упругих деформаций зерновки. Здесь речь идет о том, что при отходе подвижной щеки упругая энергия, запасенная в зерновке при ее сжатии, возвращается к виброприводу.

При измельчении зерна ударом влет, как это имеет место в молотковых дробилках, такой рекуперации не происходит, поскольку после короткой фазы удара зерновка и молоток теряют контакт друг с другом. Упругая энергия в этом случае расходуется на послеударные колебания слоев зерновки и ее дополнительный нагрев.

Сказанное позволяет предположить снижение энергозатрат в вибрационном измельчителе по сравнению с молотковыми дробилками.

На основании изложенного рассмотренный выше коэффициент поглощения (см. формулы (2.6) и (2.7)) можно представить состоящим из двух частей

$$\psi_v = \psi_1 + \psi_2, \quad (2.11)$$

где ψ_1 - составляющая коэффициента поглощения, обусловленная появлением микротрещин;

ψ_2 - составляющая коэффициента поглощения, обусловленная появлением сухого трения в микротрещинах.

Такое разделение условно, поскольку неизвестен экспериментальный метод, позволяющий разделить эти величины.

2.2 Реологическая модель единичной частицы фуражного зерна

Рассмотренные выше закономерности позволяют предложить реологическую модель зерновки [222], отражающую ее деформационное поведение и объясняющую диссипацию энергии при циклическом нагружении.

Первым делом выясним, нужно ли включать в будущую реологическую модель инерционный элемент. Очень часто процесс нагружения тел в вибрационных дробилках называют виброударным. Выясним, справедлив ли этот термин в отношении вибрационного измельчения зерна. Для этого сравним динамические режимы работы вибрационных и молотковых дробилок.

У вибрационных дробилок частота воздействия ω рабочих органов на материал никогда не превышает 300 с^{-1} , а амплитуда A - $0,005 \text{ м}$. Следовательно, наибольшая скорость деформирования материала составляет $v = A\omega = 0,005 * 300 = 1,5 \text{ м/с}$. Это существенно меньше, чем у молотковых дробилок (до 100 м/с).

Еще более разительна разница, если применить использующийся в теории удара безразмерный критерий, который характеризует «жесткость удара» и называется числом поврежденности Джонсона [175]. В отношении дробилок будем называть этот критерий коэффициентом жесткости удара

$$\pi = \frac{\rho v^2}{\sigma_T}, \quad (2.12)$$

где ρ – плотность зерновки;

σ_T – динамический предел текучести материала зерновки.

Соотношение этих критериев для молотковых дробилок и вибрационных измельчителей составляет

$$100^2/1,5^2 \approx 2200.$$

Таким образом, процесс деформирования зерновок в вибрационном измельчителе можно характеризовать как квазистатический, а инерционный элемент с полным правом можно не включать в реологическую модель.

Предлагаемая модель содержит два блока (Рисунок 2.7).

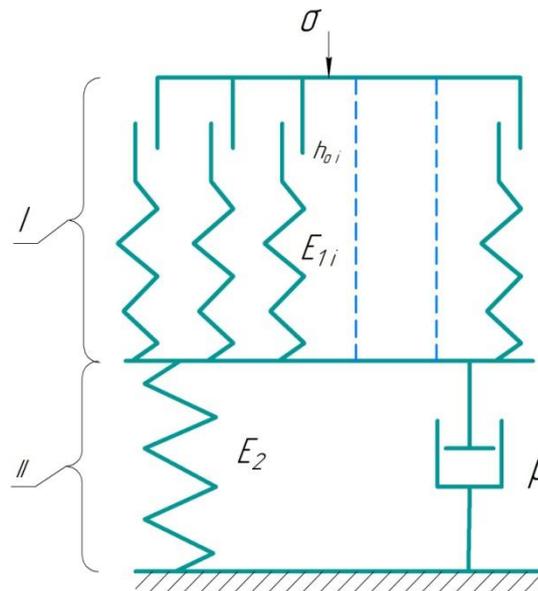


Рисунок 2.7 - Реологическая модель зерновки (обозначения см. в тексте)

В блоке I представлен набор элементов типа сухого трения h_{0i} (т. н. обобщенное тело Сен-Венана), каждый из которых последовательно соединен со своим упругим элементом E_{1i} . Тело Сен-Венана, как известно, моделирует пластические свойства материала. Оно неподатливо при нагрузке ниже предела текучести, после его превышения неограниченно деформируется, причем его сопротивление не зависит от скорости деформирования.

Уравнение состояния для сдвига в i -ом плече можно записать в виде:

$$hi < h_{0i} - \text{нет деформации}; \quad hi > h_{0i} - \text{течение (скольжение)}. \quad (2.13)$$

Следует заметить, что в данной модели используется понятие безразмерного микроскопического предела текучести i -го плеча

$$h_{0i} = \tau_{0i} / E_{1i}, \quad (2.14)$$

где τ_{0i} - предел текучести i -го плеча.

Предел текучести первого звена τ_{01} численно равен пределу текучести σ_T всей зерновки.

Поскольку наша модель содержит набор тел Сен-Венана, то и пределы текучести у них разные ($h_{01} < h_{02} < \dots < h_{0i} < h_{\infty}$, ($i=1 \dots \infty$, см. Рисунок 2.7). Обобщенное тело Сен-Венана, таким образом, отражает тот факт, что зерновка по своим прочностным свойствам неоднородна по объему.

При малой нагрузке, не превышающей h_{01} , обобщенное тело Сен-Венана неподатливо. При $h_{02} > h > h_{01}$ появляется проскальзывание только в первом элементе. При увеличении нагрузки вступают в работу последующие элементы.

Такое проскальзывание возможно, если каждый пластический элемент последовательно соединен с элементом Гука.

Следуя работам [8,66,112], примем, что все упругие элементы одинаковы по модулю жесткости и равны E_1 , а набор микроскопических пределов текучести имеет непрерывный спектр с плотностью распределения $p(h)$. При таком подходе блок I нашей модели превращается в модель Ишлинского [112].

Суммируя усилия во всех плечах модели с вероятностью $p(h)$ встретить то или иное h , напряжения в блоке I можно получить в виде [112]

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 - E_1 \int_0^{\infty} \varepsilon_h p(h) dh; \quad (2.15)$$

$$h \operatorname{sgn}(\dot{\varepsilon}_h) + \varepsilon_h = \varepsilon_1, \quad (2.16)$$

где ε_1 - полная деформация произвольного плеча, одинаковая для всех плеч;

ε_h - пластическая деформация в плече h .

Функция $sgn(\dot{\varepsilon}_h)$ равна +1 при положительной скорости деформации и -1 - при отрицательной. При $\dot{\varepsilon}_h=0$ возможно любое значение этой функции из промежутка (+1,-1).

Известны следующие основные виды растрескивания и смещения поверхности трещины [118]: I — нормальный отрыв (разрыв); II — поперечный сдвиг (или просто сдвиг) III — продольный сдвиг (срез). Очевидно, что блок I реологической модели (см. рис. 2.7) отражает второй тип растрескивания (Рисунок 2.8), который мы считаем основным в зерновке.

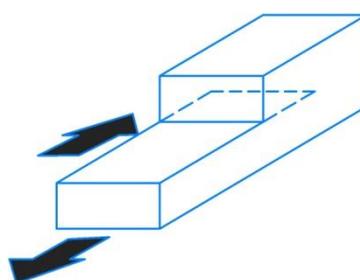


Рисунок- 2.8. Появление и рост трещины по типу поперечного сдвига
(тип II)

Поэтому элементы Сен-Венана отображают в предложенной реологической модели не только пластические деформации, но и, условно, рост трещин при приложении сжимающей нагрузки. Известно, что пластические деформации всегда приводят к появлению и росту трещин [65]. Не все трещины раскрываются при первичном разрушении зерновки, часть трещин остается в осколках.

Именно такой тип возникновения трещин подразумевается в известной гипотезе Родина [136].

Остановимся далее на выборе плотности распределения пределов текучести $p(h)$. Поскольку мы связываем дефекты усталостного разрушения зерновки с элементами Сен-Венана, то естественно обратить внимание на опытную зависимость $R=f(v)$, представленную на Рисунке 2.2. Очевидно, чем меньше R , тем больше дефектов появляется в зерновке при ее деформировании.

В соответствии с этой зависимостью распределение дефектов $F(h)$ можно представить так

$$F(h) = 1 - \exp(-\alpha h). \quad (2.17)$$

Данную зависимость можно аппроксимировать более простой формулой степенного вида

$$F(h) \approx h^\beta, \quad (2.18)$$

где β – коэффициент (некоторая положительная постоянная).

Коэффициент β может быть выражен через экспериментально определенный коэффициент α . Действительно, приравнивая правые части выражений (2.17) и (2.18) получим

$$1 - \exp(-\alpha h) = h^\beta.$$

Логарифмируя правую и левую части последнего выражения, находим

$$\beta = \frac{\ln \{1 - \exp(-\alpha h)\}}{\ln h}. \quad (2.19)$$

Чтобы получить осредненное значение β этого коэффициента, проинтегрируем правую часть в пределах от 0 до h

$$\beta = \int_0^h \frac{\ln \{1 - \exp(-\alpha h)\}}{\ln h} dh.$$

Данный интеграл аналитически не вычисляется. Воспользуемся поэтому численным методом и системой MathCAD. Применим вероятные значения пределов интегрирования от 0 до 0,3 и значение $\alpha = 0,037$ для пшеницы. Вычисления интеграла дают результат: $\beta = 0,82$.

Таким образом, сделаны все обоснования для применимости упрощенной формулы (2.18). Дифференцируя по h это выражение, получим плотность вероятности, которая фигурирует в интеграле (2.15)

$$p(h) = \beta h^{\beta-1}. \quad (2.20)$$

Подставляя это выражение в указанный интеграл, вычисляя его, будем иметь

$$\sigma = E\left(\varepsilon - \frac{\varepsilon^{\beta+1}}{\beta+1}\right). \quad (2.21)$$

По форме полученное выражение является формулой Н. Н. Давиденкова [53,126,127], которая описывает не только кривую нагружения, но и кривую разгрузки материала в цикле (Рисунок 2.9).

Сопоставление вида этой зависимости с имеющимися экспериментальными данными показывает, по крайней мере, хорошее качественное совпадение. Таким образом, наша научная гипотеза находит еще раз свое подтверждение.

Реологическая модель зерновки содержит также упругий E (тело Гука) и вязкий (тело Ньютона) μ элементы (блок II). Однако, судя по имеющимся экспериментальным данным, явления ползучести, обратной ползучести и релаксации напряжений в зерновке развиты слабо и могут проявляться при длительном (до 4-5 минут) воздействии механической нагрузки [104]. Импульсные нагружения при вибрационном измельчении более скоротечны.

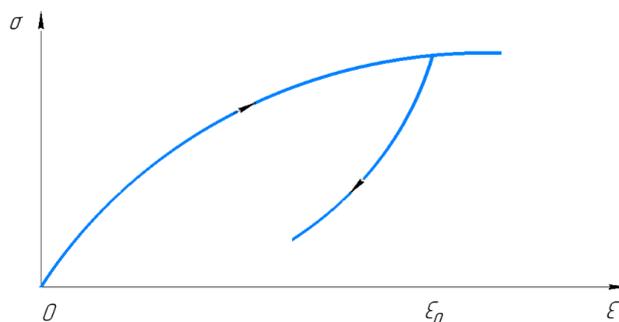


Рисунок 2.9- Кривая петли гистерезиса, описываемая формулой (2.21)

Следовательно, вязкие свойства зерновки не должны существенно сказаться на затратах энергии при ее деформировании в процессе вибрационного разрушения.

Посмотрим теперь, как в целом наша реологическая модель будет реагировать на ее циклические нагружения. Итак, если к модели приложить нагрузку, то прежде всего произойдет мгновенное сжатие пружин E_1 (см. рис. 2.7), далее – постепенное сжатие пружины E_2 и перемещение поршня μ . Если нагрузка не превосходит предела текучести самого слабого звена обобщенного

тела Сен- Венана, то модель демонстрирует практически упругое поведение (на временах, соответствующих вибрационному измельчению). При увеличенной внешней нагрузке происходит проскальзывание в звеньях обобщенного тела Сен- Венана, причем, чем больше нагрузка, тем большее количество звеньев задействовано в проскальзывании. Этим, как раз, имитируется возникновение микротрещин в теле зерновки. Кроме того, подтверждается эффект Велера для зерна, поскольку если нагрузка не превосходит предела текучести самого слабого звена обобщенного тела Сен- Венана, то разрушения не происходит при любом количестве нагружений.

При снятии нагрузки произойдет быстрое расжатие пружин E_1 , а энергия сжатых пружин возвращается к ее источнику. Пружина E_2 благодаря действию поршня μ будет разжиматься очень медленно. Если предварительная нагрузка была большая и было проскальзывание в звеньях обобщенного тела Сен- Венана, то при снятии нагрузки возможно обратное проскальзывание. Этим моделируется микропластичность и непроизводительные затраты энергии, которые должны быть сведены к минимуму.

Часть пар трения Сен- Венана, однако, не проскальзывает в процессе разгрузки. Этим обуславливается несовпадение кривых нагрузки и разгрузки зерновки (см. Рисунок 2.9). При этом в теле зерновки могут оставаться микронапряжения.

На основе предложенной реологической модели (см. Рисунок 2.7) зерновки с феноменологических позиций можно объяснить и большую ее деформативность при действии вибрационной нагрузки. В вибрационной механике хорошо известно такое явление как сглаживание в условиях вибраций характеристики сухого трения, как бы трансформация сухого трения в вязкое [190].

Если в i -том теле Сен- Венана (см. Рисунок 2.7). происходит скольжение пластинок, то по отношению к медленной скорости сдавливания зерновки V , обусловленной сужающейся камерой измельчения, и вибрационным воздействием с максимальной скоростью $A\omega$, будем иметь уменьшенное сопротивление указанного тела [190]

$$\langle h_{oi} \rangle = h_{oi} \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{V}{A\omega}.$$

По механике процесса вибрационного измельчения зерна нетрудно заключить, что $V < A\omega$. Следовательно, всегда сопротивление тела Сен-Венана при вибрациях $\langle h_{oi} \rangle$ меньше, чем при безвибрационном деформировании.

Таким образом, предложенная реологическая модель в целом правильно отражает механические процессы, протекающие в отдельной зерновке при ее деформировании с целью разрушения.

2.3 Выбор профиля рабочей поверхности рабочих органов

Цель исследования данного раздела - определить, исходя из энергетического критерия, рациональный профиль рабочих поверхностей камеры измельчения и число вибровоздействий, потребных для разрушения исходной зерновки.

Будем рассматривать энергетический баланс первичного разрушения единичной зерновки по формуле, напоминающей закон Ребиндера:

$$A = A_V + A_S, \quad (2.22)$$

где A_V – затраты энергии в инкубационном периоде;

A_S - затраты энергии на первичное разделение зерновки на части.

Работу A_V представим как часть максимальной потенциальной энергии U_{max} упругой деформации зерновки, запасенной во время вибрационного сжимающего воздействия:

$$A_V = \psi_v(\sigma) U_{max}, \quad (2.23)$$

где ψ_v – коэффициент рассеяния энергии зерновкой.

Максимальная потенциальная энергия упругой деформации, запасенная в теле объемом V , как известно из теории упругости, равна:

$$U_{max} = \frac{\sigma_*^2 V}{2E},$$

где σ_* – максимальное напряжение в зерновке;

E – ее модуль упругости.

Таким образом, при единичном ударе, достаточном для разрушения зерновки, выражение (2.22) можно записать в виде:

$$A = \psi_V(\sigma_*) \frac{\sigma_*^2 V}{2E} + A_S, \quad (2.24)$$

где σ_* – критическое (достаточное для разрушения) напряжение при одиночном ударе.

Очевидно, что в случае разрушения несколькими ударами можно применять пониженные напряжения, т.е. $\sigma_n < \sigma$. Можно заметить, что σ_n зависит от числа ударов n , т.е. $\sigma_n = f(n)$. Данную функцию для зерна можно представить в виде кривой Вёлера (Рисунок 2.10) [201].

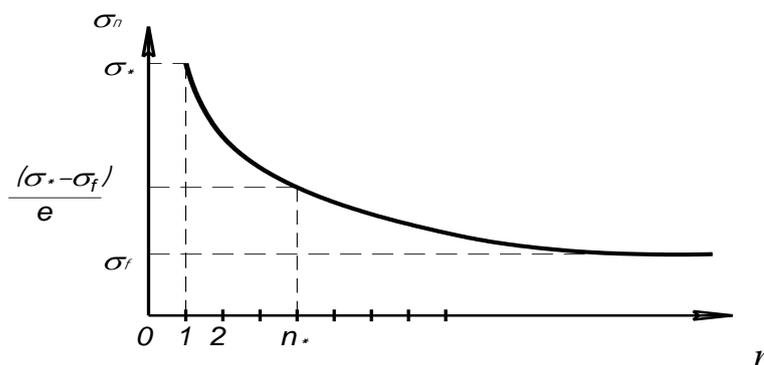


Рисунок 2.10 – Система обозначений для зависимости $\sigma_n = f(n)$ в виде кривой Вёлера

Ее математическая запись для нашего случая имеет вид

$$\sigma_n = \sigma_f + (\sigma_* - \sigma_f) e^{-\frac{n-1}{n_*-1}}, \quad (2.25)$$

где σ_f – предельное напряжение, при действии которого разрушения не происходит при любом числе ударов (предел выносливости);

n_* – характерное число ударов, при котором снижающая часть напряжений $\sigma_* - \sigma_f$ уменьшается в e раз.

Подставляя это выражение в формулу (2.24) пока в одном месте, получим промежуточное выражение для работы, затрачиваемой в инкубационном периоде за n воздействий на зерновку:

$$A = \frac{\psi_V(\sigma_n)V}{2E} n \left[\sigma_f + (\sigma_* - \sigma_f) e^{-\frac{n-1}{n_*-1}} \right] + A_S.$$

где n – число ударов.

Встает вопрос оптимизации числа ударов, исходя из энергетического критерия, т.е.

$$A = n\psi_V(\sigma_n) \frac{\sigma_n^2 V}{2E} + A_s \rightarrow \min, \quad (2.26)$$

σ_n – напряжение, необходимое для разрушения зерновки за n ударов.

Величина A_s для условий работы вибрационных измельчителей является малой (вклад в энергозатраты 4-5%, а сомножитель $(V/2E)$ является практически независимым от числа ударов n и поэтому не влияют на характер изменения общих затрат энергии A . Это изменение будет полностью определяться функцией:

$$F(n) = n\psi_V(\sigma_n) \left[\sigma_f + (\sigma_* - \sigma_f) e^{-\frac{n-1}{n_*-1}} \right]^2. \quad (2.27)$$

Эта формула, однако, применима при однородных по силе воздействиях на измельчаемый материал.

Этот случай рассматривался в работе [191] при анализе работы молотковых и центробежных измельчителей фуражного зерна, поскольку в этих машинах повторные воздействия рабочих органов действительно повторяют по силе предыдущие.

Рассмотрим эти теоретические положения применительно к вибрационному измельчителю [182]. Данная задача усложняется, поскольку нужно учесть нестационарность напряжения σ_n и зависимость коэффициента поглощения от этого напряжения. Последнее определяется формулой (2.7), которую для условий работы вибрационного измельчителя можно переписать так:

$$\Psi_V(\sigma_n) = 1 - \exp(-2 \alpha \sqrt{\sigma_n / \rho}). \quad (2.28)$$

В дальнейшем нижний индекс у символа ψ_V будем опускать.

При анализе исполнения рабочих органов и их воздействия на материал возможны два случая (см. Рисунок 2.1):

1. Напряжение увеличивается от цикла к циклу нагружения по арифметической прогрессии (это соответствует Рисунку 2.1 а - зазор между *прямолинейными* щеками уменьшается сверху-вниз);

2. Напряжение увеличивается по геометрической прогрессии (зазор между *криволинейными* щеками уменьшается также сверху-вниз, см. Рисунок 2.1 б).

Эти задачи можно характеризовать как *нестационарные*, поскольку прилагаемое к зерновке напряжение изменяется от цикла к циклу.

Случай 1. В вибрационных дробилках (см. Рисунок 2.1) воздействие обычно неоднородно и усиливается по мере продвижения материала вниз. Это изменение можно учесть формулой для арифметической прогрессии при линейных рабочих органах

$$\sigma_* = \sigma_1 (1 + k_1 (n - 1)), \quad (2.29)$$

где σ_1 – максимальное напряжение в материале при первом вибровоздействии;

k – разность арифметической прогрессии.

Соответствующая подстановка приводит к выражению

$$F(n) = n\psi(\sigma_n) \left\{ \sigma_f + [\sigma_1 (1 + k_1 (n - 1)) - \sigma_f] \left(e^{-\frac{n-1}{n_*-1}} \right) \right\}^2.$$

Подставляя также вместо $\psi(\sigma_n)$ значение из формулы (2.28) будем иметь

$$F(n) = n(1 - \exp(-2 \alpha \sqrt{\sigma_n/\rho})) \left\{ \sigma_f + [\sigma_1 (1 + k_1 (n - 1)) - \sigma_f] \left(e^{-\frac{n-1}{n_*-1}} \right) \right\}^2.$$

Наконец, расписывая σ_n под радикалом, окончательно получим

$$(1 - \exp\left(-2 \alpha \sqrt{(\sigma_f + [\sigma_1 (1 + k_1 (n - 1)) - \sigma_f] \left(e^{-\frac{n-1}{n_*-1}} \right)) / \rho}\right)) * \left\{ \sigma_f + [\sigma_1 (1 + k_1 (n - 1)) - \sigma_f] \left(e^{-\frac{n-1}{n_*-1}} \right) \right\}^2 \quad (2.30)$$

Эту функцию необходимо минимизировать. Для этого на основе математической модели (2.30) была создана компьютерная модель в программе MathCAD (Приложение А), позволяющая проводить вычислительные эксперименты и визуализировать результаты.

Функция $F(n)$ имеет сложный характер поведения (Рисунок 2.11). В зависимости от значений σ_1 и n_* она может иметь один или два локальных

минимума (в точке $F'(n)=0$ и на левой границе при $n=1$) или иметь только граничный максимум. Для реальных значений параметров процесса вибрационного измельчения фуражного зерна функция $F(n)$ имеет вид, изображенный на упомянутом Рисунке 2.11.

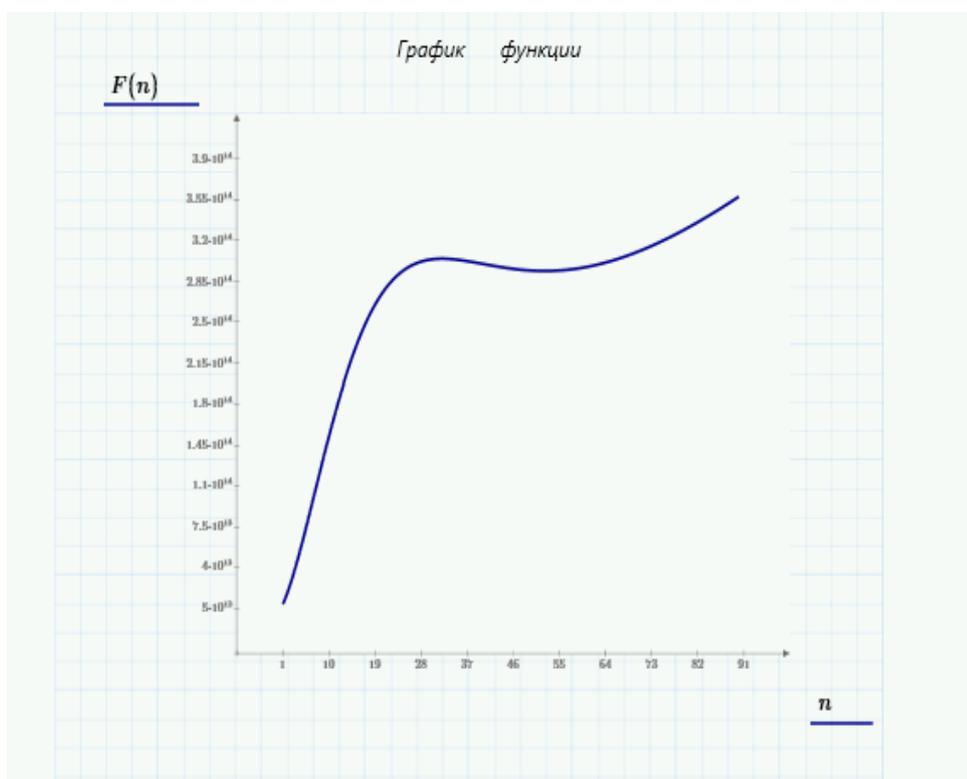


Рисунок 2.11 - Расчетный график функции $F(n)$ при $\sigma_I=3$ МПа, $\sigma_f=2$ МПа, $n_*=15$, $k_I=0,1$, $\rho=1300$ кг/м³, $\alpha=0,037$ с/м (арифметическая прогрессия)

Искомая зависимость имеет локальный минимум при $n=50$, этот минимум легко реализуется в вибрационных измельчителях. Конструкция вибрационного измельчителя как раз и обеспечивает разрушение зерновок за несколько десятков вибровоздействий за то время, когда материал спускается сверху вниз в зоне действия рабочих органов.

Случай 2. Для криволинейных рабочих органов применима геометрическая прогрессия

$$\sigma_* = \sigma_1 (k_2^{n-1}), \quad (2.31)$$

где k_2 - знаменатель геометрической прогрессии.

Оптимизируемая функция имеет в данном случае вид

$$F(n) = n \left\{ 1 - \exp \left(-2 \alpha \sqrt{(\sigma_f + [\sigma_1 k_2^{n-1} - \sigma_f]) \left(e^{-\frac{n-1}{n_*-1}} \right) / \rho} \right) \right\} * \left\{ \sigma_f + [\sigma_1 k_2^{n-1} - \sigma_f] \left(e^{-\frac{n-1}{n_*-1}} \right) \right\}^2 \quad (2.32)$$

Численные эксперименты (Приложение А) показывают, что при любых исходных параметрах функция $F(n)$ имеет монотонно-восходящий вид (Рисунок 2.12) и не имеет минимума.

Сравним далее, используя компьютерные модели, значения функции $F(n)$ в некоторых характерных точках:

- рабочие органы с плоской рабочей поверхностью

$$F(1)=8,74*10^{12}; \quad F(5)=65,41*10^{12}; \quad F(10)=153*10^{12}; \quad F(15)=225,7*10^{12};$$

- рабочие органы с криволинейной рабочей поверхностью

$$F(1)=8,74*10^{12}; \quad F(5)=71,53*10^{12}; \quad F(10)=216,8*10^{12}; \quad F(15)=445*10^{12}.$$

Как видно из этих данных, рабочие органы с плоской рабочей поверхностью отличаются меньшей энергоемкостью в сравнении с рабочими органами с криволинейной рабочей поверхностью, причем это различие усиливается по мере роста числа вибровоздействий, необходимых для разрушения зерновки. Следовательно, предпочтение должно быть отдано рабочим органам с плоской рабочей поверхностью.

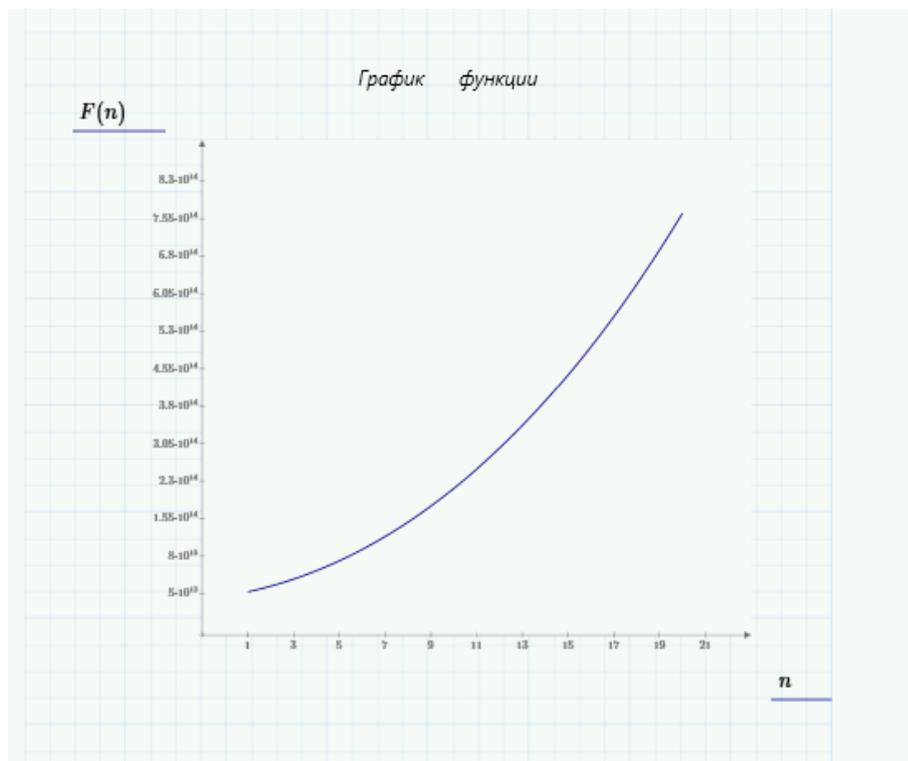


Рисунок - 2.12 - Расчетный график функции $F(n)$ при $\sigma_l=3$ МПа, $\sigma_f=2$ МПа, $n_*=15$, $k_1=0,1$, $\rho=1300$ кг/м³, $\alpha=0,037$ с/м, $k_2=1,1$ (геометрическая прогрессия)

2.4 Расчет основных параметров вибрационного измельчителя фуражного зерна

2.4.1 Обоснование угла захвата измельчаемого материала рабочими органами

Углом захвата α назовем угол между активной и пассивной поверхностями полости измельчения. Этот угол при работе дробилки изменяется вследствие качаний рабочих органов (Рисунок 2.13). Будем отмеривать его при наибольшем сближении рабочих поверхностей.

Величина угла захвата изменяется при регулировках шириной выходной щели. Уменьшение ширины сопровождается увеличением угла захвата, а увеличение ширины – его уменьшением. Следовательно, при увеличении угла захвата должна увеличиваться степень дробления и уменьшаться производительность измельчителя.

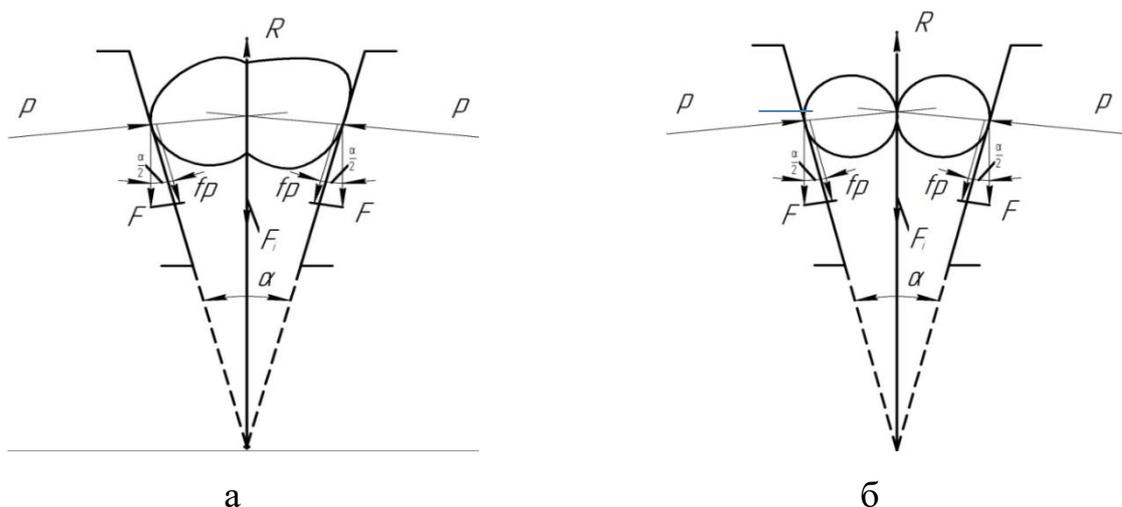


Рисунок 2.13 - Угол захвата рабочими органами вибрационного измельчителя:
а) одного тела; б) слоя в виде двух тел

Проблема обоснования угла захвата рассматривалась ранее применительно к виброщечковым дробилкам на примере одного тела (куска)[16,17,28,32,72,156,158].

Раздавливаемый между щеками кусок находится под действием следующих сил (см. Рисунок 2.13а):

P - давления щек;

fP - сила трения куска по щекам;

f - коэффициент трения скольжения между куском и щеками.

Сила тяжести куска, вследствие ее малости в сравнении с силами P давления щек, не учитывается.

Силу P можно разложить на составляющие: горизонтальную и направленную вверх вертикальную. Вертикальная составляющая стремится вытолкнуть дробимый кусок вверх, заставив его скользить вдоль поверхностей щек.

Следствием такого выталкивания является возникновение сил трения fP , препятствующих выталкиванию куска. Вертикальная составляющая определяется равенством $N = P \sin \alpha$.

Отсюда следует вывод, что угол захвата α не может превышать некоторого

предельного значения. При углах захвата, превышающих этот предел, выталкивающая сила настолько велика, что силы трения куска о поверхности щек становятся недостаточными для удержания его в камере дробления, и он смещается вверх. Дробилка в таких условиях работать не будет.

Предельным углом захвата будет такой угол, при котором выталкивающая сила полностью уравновесится возникающими силами трения. Значение предельного угла захвата, так же, как и значение сил трения, определяется при данном давлении дробящих щек только коэффициентом трения скольжения между кусками дробимого материала и поверхностями щек.

Если α – предельный угол захвата, то кусок находится в равновесии и сумма проекций действующих на него сил на любые координатные оси равняется нулю (см. Рисунок 2.13а):

$$R=2F, \quad (2.33)$$

где $R=2 P \sin (\alpha/2)$ - выталкивающая сила;

$F=fP \cos(\alpha/2)$ – тормозящая сила (проекция силы трения на вертикаль).

После соответствующих приравнений и преобразований находится условие дробления тела:

$$\alpha < 2\varphi, \quad (2.34)$$

где $\varphi = \arctg f$ - угол трения тела о рабочие поверхности измельчителя.

Предельный угол захвата равен двойному углу трения. Угол захвата щечковых дробилок всегда должен быть меньше двойного угла $\alpha < 2\varphi$.

Это условие верно в отношении и разрабатываемого измельчителя, если рассматривать единичное зерно, зажатое между рабочими поверхностями.

Однако в верхних слоях камеры измельчения рабочие органы захватывают слой зерен и сдавливают их. Поэтому условия захвата слоя будут существенно отличаться от рассмотренного случая одного тела.

Рассмотрим, для примера, слой толщиной всего в две частицы (см. Рисунок 2.13б).

Они взаимодействуют между собой силой сдавливания, равной $P \cos(\alpha/2)$. В связи с этим между частицами возникает сила трения

$$F_i = f_i P \cos(\alpha/2),$$

где f_i - коэффициент внутреннего трения.

Именно данная сила трения F_i препятствует выпучиванию частиц вверх под действием силы R .

Приравнивая данные силы

$$2 P \sin (\alpha/2) = f_i P \cos(\alpha/2),$$

найдем предельный угол захвата α

$$\alpha = 2 \operatorname{arctg}(f_i/2). \quad (2.35)$$

Для нормальной работы измельчителя необходимо условие

$$\alpha < 2 \operatorname{arctg}(f_i/2). \quad (2.36)$$

Коэффициент трения скольжения f зерен фуражных культур по стали составляет 0,36...0,40 [205], что соответствует углу трения около 21...24°. Таким образом, угол захвата α может доходить, по условию (2.36), примерно до 42°.

Внутренний коэффициент трения f_i кормовых культур принимает значения 0,47...0,80. Ориентируясь на меньшее значение f_i из условия (2.36) находим $\alpha < 26^\circ$.

Таким образом, второе условие является более жестким, предполагает меньшие значения угла захвата. Именно на это условие следует ориентироваться при проектировании вибрационных измельчителей.

При этом следует иметь в виду, что даже это условие дает завышенные значения предельного угла захвата. Причиной тому является кажущееся снижение внешнего и внутреннего трения в условиях вибровоздействий, а это снижение здесь очень трудно учесть.

2.4.2 Определение рациональной угловой скорости дебалансных валов

При каждом отходе активного рабочего органа дробленый продукт массой m из камеры дробления под действием силы тяжести и центробежной силы выпадает вниз через выходную щель шириной b (Рисунок 2.14).

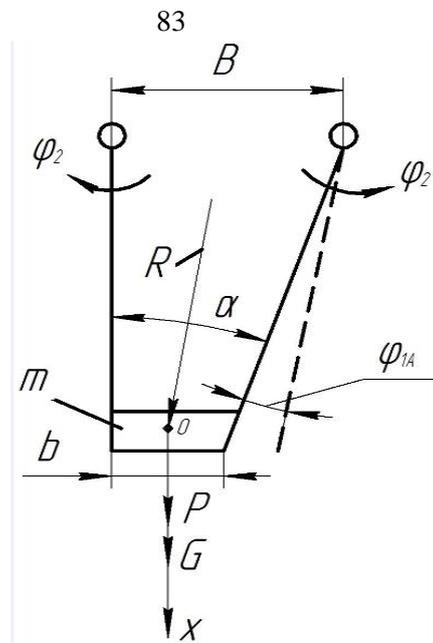


Рисунок 2.14 - К расчету рациональной частоты колебаний рабочего органа и
производительности измельчителя

Центробежная сила появилась потому, что конструктивные особенности исследуемых измельчителей предполагают качание обеих рабочих плоскостей, образующих камеру измельчения. Соответственно, совершает круговые движения и измельчаемый объем материала, что и обуславливает действие указанной силы.

Выпадает материал, занимающий объем призмы, поперечное сечение которой выделено внизу камеры измельчения на Рисунке 2.14.

Итак, на выпадающий слой массой m при прохождении нижнего положения действуют силы:

-сила тяжести

$$G=mg;$$

-центробежная сила

$$P=m R (\varphi_A \omega)^2,$$

где R – радиус качания выпадающего слоя;

φ_A – угловая амплитуда качания выпадающего слоя.

Последнюю величину можно определить как среднеарифметическое угловых амплитуд φ_{A1} и φ_{A2} качающихся рабочих поверхностей

$$\varphi_A = (\varphi_{A1} + \varphi_{A2})/2.$$

Составим далее дифференциальное уравнение движения выпадающего слоя в проекции на вертикальную ось x . Последовательно имеем:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= G + P; \\ m\ddot{x} &= mg + mR(\varphi_A \omega)^2. \\ \ddot{x} &= g + R(\varphi_A \omega)^2. \end{aligned} \quad (2.37)$$

Обозначим $\dot{x} = v$, тогда (5.8) примет вид

$$\frac{dv}{dt} = g + R(\varphi_A \omega)^2.$$

Решая это простейшее дифференциальное уравнение, получим

$$v = (g + R(\varphi_A \omega)^2)t + C,$$

где C - постоянная интегрирования.

Совмещая начало движения слоя с началом отчета времени имеем начальные условия: $t=0$, $v=0$. Подставляя их в последнее выражение, определим, что $C=0$.

Итак, имеем

$$v = (g + R(\varphi_A \omega)^2)t. \quad (2.38)$$

Этому уравнению подчиняется движение слоя примерно за полупериод колебаний рабочих органов. За предыдущий полупериод слой не двигался вниз относительно рабочих органов, поскольку был зажат последними. С учетом этого найдем среднюю скорость v_{cp} выпадающего слоя за весь период колебаний

$$v_{cp} = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^T (g + R(\varphi_A \omega)^2)t dt.$$

Вычисляя интеграл, получим

$$v_{cp} = (g + R(\varphi_A \omega)^2) \frac{T}{8}.$$

Учитывая, что $T=2\pi/\omega$, придем к окончательному выражению

$$v_{cp} = \frac{\pi}{4\omega} (g + R(\varphi_A \omega)^2). \quad (2.39)$$

Раскрывая скобки, данное выражение представим в виде

$$v_{cp} = \frac{\pi g}{4\omega} + \frac{\pi \omega}{4} R \varphi_A^2. \quad (2.40)$$

Из этого выражения заключаем, что частота колебаний двояко влияет на

среднюю скорость движения слоя: первый член показывает обратную пропорциональную зависимость, а второй - прямую пропорциональность. Следовательно, должно существовать оптимальное значение ω , доставляющее экстремум величине $v_{ср}$.

Графическая иллюстрация сказанного приведена на Рисунке 2.15, где показано поведение каждого члена правой части формулы (2.40), для чего введены обозначения

$$z_1(\omega) = \frac{\pi g}{4\omega}; \quad z_2(\omega) = \frac{\pi\omega}{4} R\varphi_A^2.$$

Кривая $z_1(\omega)$, представляющая первый член, является гиперболой. Вторым членом является прямая пропорциональная зависимость. Потому в интересующей нас области изменения $v_{ср}(\omega)$ наблюдаем классический экстремум-минимум. Его и будем отыскивать, поскольку вне его скорость выпуска слоя повышается, а это отрицательно сказывается на самом процессе измельчения.

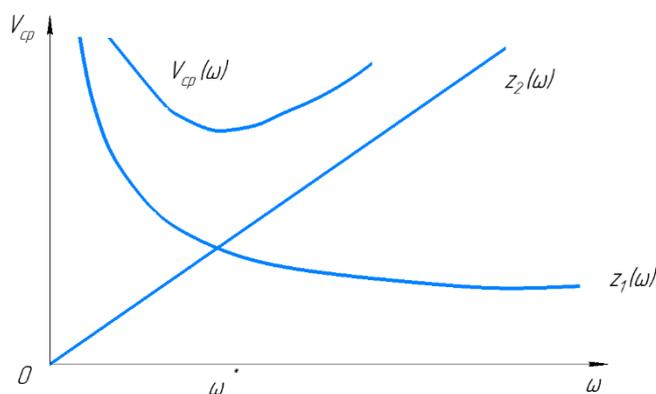


Рисунок 2.15 – Графическое нахождение экстремума функции $v_{ср} = v_{ср}(\omega)$

Для аналитического отыскания экстремума дифференцируем выражение (2.40)

$$\frac{dv_{ср}}{d\omega} = -\frac{\pi g}{4\omega^2} + \frac{\pi}{4} R\varphi_A^2. \quad (2.41)$$

Оптимальное значение ω находим из уравнения

$$-\frac{g}{\omega^2} + R\varphi_A^2 = 0. \quad (2.42)$$

Последнее условие можно записать и так

$$\frac{g}{\omega^2 R \varphi_A^2} = 1. \quad (2.43)$$

Таким образом, экстремуму отвечает равенство ускорений слоя от силы тяжести и центробежной силы. По- иному, экстремум наступает при равенстве силы тяжести и центробежной силы. Условие (2.43) может быть соблюдено изменением ω , R или φ_A . Если же принять R и φ_A постоянными, то экстремальное значение ω_* принимает значение

$$\omega_* = \sqrt{\frac{g}{R \varphi_A}}. \quad (2.44)$$

Если же теперь подвергнуть (2.41) повторному дифференцированию, то получим выражение для второй производной

$$\frac{dv_{cp}^2}{d^2 \omega} = \frac{2g}{\omega^3} > 0.$$

Положительность второй производной указывает на то, что в точке ω_* действительно располагается минимум.

Проверим реальность полученных результатов для ω_* . Пусть, для установившегося процесса имеем: $\varphi_{A1}=0,01$ и $\varphi_{A2}=0,03$. Следовательно, расчет по формуле

$$\varphi_A = (\varphi_{A1} + \varphi_{A2})/2$$

дает результат $\varphi_A=0,02$.

Примем конструктивный параметр R равным 0,6 м.

Подставляя эти данные в формулу (2.44), получим результат $\omega_* = 202 \text{ с}^{-1}$. Это весьма близко к тем рекомендациям, которые выдавались ранее другими авторами по результатам экспериментальных исследований [99].

Хотя наш результат (2.44) получен строгим математическим методом, но исходные предпосылки были приближенными. В частности, они не учитывали трение выпускаемого материала о рабочие органы. Поэтому результат (2.44) следует все-таки назвать рациональным, а не оптимальным [196,197].

2.4.3 Определение производительности измельчителя

Массовая производительность дробилки Q определяется по формуле

$$Q = k_1 b L v_{cp} \rho N, \quad (2.45)$$

где Q – производительность дробилки, кг/с;

k_1 – эмпирический коэффициент, отражающий роль неучтенных факторов, по результатам наших экспериментов $k_1 = 0,85-0,90$;

b – ширина выходной щели при наибольшем сближении рабочих органов, м;

L – длина выходной щели, м;

ρ – плотность материала, кг/м³;

N – число полостей измельчения, шт (для нашего измельчителя $N = 2$).

Формула (2.45) не учитывает влияние на производительность измельчителя некоторых свойств дробимого материала, так как она получена в основном из геометрических представлений. Несмотря на это, формула позволяет представить себе действие основных механических факторов, определяющих производительность дробилки. Введение же поправочного коэффициента k_1 позволяет надеяться на повышение точности инженерных расчетов в части определения производительности измельчителя.

Выводы по главе 2

1. Определен механизм измельчения кормовых зерен в виде малоциклового усталости, основанный на учете технологических свойства сырья и функционировании вибрационных рабочих органов. Рассмотрен энергетический баланс процесса измельчения фуражного зерна применительно к единичной зерновке. Сделан вывод, что «инкубационный» период, когда идет скрытое трещинообразование в зерновке, очень важен с энергетической точки зрения. Именно он определяет общие затраты на измельчение фуражного зерна. Механико-технологические объяснение этого факта дано при помощи

реологической модели зерновки. Модель включает набор элементов Сен-Венана, упругие и вязкие элементы.

2. Установлено, что рабочие органы вибрационного измельчителя должны быть выполнены по схеме, соответствующей прямолинейным рабочим органам, а зазор между ними - уменьшаться по мере продвижения дробимого материала вниз. Эта схема обеспечивает простое конструктивное исполнение вибрационных рабочих органов, дробление зерновки за несколько вибрационных воздействий и, как следствие, высокую производительность машины. Эти исследования положены в основу предложенных конструкций измельчителей зернового материала.

3. Приведен расчет основных параметров вибрационного измельчителя кормового зерна, учитывающий его особенности. В частности, дано обоснование угла захвата измельчаемого материала рабочими органами, а также определена производительность измельчителя.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВИБРАЦИОННЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДОЙ В ВИДЕ СЛОЯ КОРМОВОГО ЗЕРНА

3.1 Общая постановка задачи выбора динамической системы измельчителя на основе многокритериального подхода

Известно, что, несмотря на относительную конструктивную простоту, технологические вибрационные машины представляют собой сложные динамические системы с сильными взаимодействиями между рабочим органом и технологической средой. В ходе протекания технологического процесса в зоне указанного взаимодействия происходит перенос импульса, энергии, массы. Весь процесс в целом протекает в машине с конкретной динамической конфигурацией и конкретными геометрическими характеристиками.

В процессе своей работы вибрационная машина приводит в движение технологическую среду, деформирует ее и изменяет ее состояние. В свою очередь, обрабатываемая среда, сопротивляясь вибрационному воздействию, изменяет динамическое поведение машины, которое можно с достаточно высокой точностью исследовать теоретически и экспериментально и по изменению геометрии движения тел, составляющих машину, дать количественную и качественную характеристику вибрационного процесса, а также осредненных свойств обрабатываемых материалов [159].

Изменение параметров любого из элементов машины ведет к изменению свойств всей системы в целом. Для того, чтобы грамотно проектировать и успешно эксплуатировать вибрационные измельчающие машины, необходимо четко представлять, как происходит данное взаимодействие, как меняются динамические характеристики при изменении технологических параметров и свойств обрабатываемой среды, какие параметры движения машин необходимо контролировать и какими способами их нужно измерять.

Цель данного раздела - определение силового взаимодействия вибрационных измельчителей с технологической средой путем оценки

амплитудо-фазо-частотных характеристик и установление наиболее рациональных динамических режимов работы машины.

Использование той или иной динамической модели связано с тем, насколько упрощается, схематизируется реальная система или процесс. В каждом конкретном случае модель выбирается исходя из задачи исследования (какие параметры требуется определить и влияние каких факторов отразить), а также из требований к точности модели. Необходимо также всегда соизмерять точность и подробность модели с точностью исходной информации. Если исходные данные, нужные для расчетов, известны приближенно, то, очевидно, нет смысла использовать подробную и сложную модель. Простые модели эффективны также и тогда, когда требуется получить грубую оценку исходных параметров или качественно исследовать явление [144].

В отличие от дробилок, используемых в горном деле, предложенные нами измельчители для кормового зерна (см. Главу 1) представляют двухмассные и трехмассные системы. Такие конструкции позволяют увеличить производительность этих машин, использовать новые динамические эффекты, в частности антирезонанс. Это диктует необходимость применять в качестве расчетных схем вибрационных измельчителей механические колебательные системы с несколькими степенями свободы с развитой структурой связей, отражающих особенности динамических взаимодействий элементов и специфику возникающих форм динамических режимов. Это еще более усложняет описание динамики данного вида вибрационных технологических машин.

Анализ всей совокупности информации по вибрационным измельчителям, разработанным в различных отраслях хозяйства, позволяет сформулировать основные требования к динамическим системам этих машин.

Система должна:

1. Обеспечивать вибрации точек рабочих органов по определенным законам, задаваемым исходя из технологических соображений. Данная задача еще называется задачей синтеза вибрационного поля упругих систем. Ее формализация приводит к функционалу.

$$J_1 = \int \int [\psi(x, y) - \psi^*(x, y)]^2 dx dy \rightarrow \min, \quad (3.1)$$

где $\psi(x, z)$ – идеальная (технологически требуемая), $\psi^*(x, z)$ – реальная траектория колебаний точек корпуса виброизмельчителя.

Таким образом, функционал J_1 отражает близость идеальной и реальной траекторий центра масс корпуса смесителя.

2. Осуществлять самосинхронизацию вибровозбудителей (в случае парного вибропривода), что сводится обычно к выполнению условия [21]:

$$L^* = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} L dt = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} (T - \Pi) dt \rightarrow \min, \quad (3.2)$$

где T, Π – кинетическая и потенциальная энергия тел механической системы.

Иными словами, устойчивые синхронные движения дебалансных валов вибровозбудителя отвечают минимуму осредненного за период Лагранжиана L^* движущихся частей измельчителя.

3. Обеспечивать минимальную амплитуду несущей системы измельчителя, на которой установлены вибровозбудители, т. е.

$$A_n \rightarrow \min. \quad (3.3)$$

Это требование обусловлено снижением инерционных нагрузок на дебалансный привод.

4. Обеспечивать максимальную амплитуду рабочего органа измельчителя, на котором не установлены вибровозбудители, т. е.

$$A_p \rightarrow \max. \quad (3.4)$$

Пункты 3 и 4 могут быть выполнены при использовании двухмассной динамической системы измельчителя в антирезонансном режиме работы.

5. Отвечать критерию компактности вибропривода, т.е. функционалу

$$J_2 = \frac{AxVxC}{A_0xB_0xC_0} \rightarrow \min, \quad (3.5)$$

где A, B, C – габаритные размеры измельчителя при наличии системы вибровозбуждения;

A_0, B_0, C_0 – то же, при отсутствии системы.

6. Обеспечивать отсутствие паразитных колебаний.

Для решения рассматриваемых задач рационального выбора конструкции измельчителя по введенным критериям необходимо построить набор математических моделей для исследования динамики различных конструкций этих машин.

3.2 Динамические свойства зернового измельчителя с маятниковым вибровозбудителем

Исследуемая конструкция вибрационного измельчителя приведена на Рисунке 4 Таблицы 1.6 и защищена патентом РФ №2354446 [121].

Исследование начнем с разработки расчетной схемы нашего объекта.

Расчетная схема используется при проектировании нового объекта, когда необходимо заранее теоретически определить его характеристики (для колебательной системы - амплитудно-частотные или фазово-частотные характеристики и др.). В свою очередь расчетная схема нужна и для оценки его динамического поведения, возможностей и соответствия новым условиям функционирования. Схематизация объекта совершенно необходима, так как решение задачи с полным учетом всех свойств реального объекта осуществить практически невозможно.

Предлагаемая нами плоская расчетная схема вибрационного измельчителя (Рисунок 3.1) представляет собой как бы вид сверху и содержит рабочие органы в виде внешнего 1 и внутреннего 2 тел, приводимых в движение посредством дебалансного привода 3 маятникового типа.

Внутренние плоскости тела 1 и плоскости тела 2 образуют рабочие поверхности, между которыми сжимается и измельчается зерновой материал. Слой кормового зерна обладает упругостью и диссипацией, отображаемых элементами с коэффициентом эквивалентной жесткости c и коэффициентом эквивалентной вязкости b (см. Рисунок 3.1.).

Вся механическая система рабочих органов закреплена с помощью вертикальных подвесок, на которых она совершает малые вынужденные колебания. Поэтому «упругость» пружин c_0 близка к нулю. Подшипниковый узел

вала дебаланса подвижен, закреплен также в мягких пружинах, роль которых исполняет упругая муфта, соединяющая валы электродвигателя и вибровозбудителя.

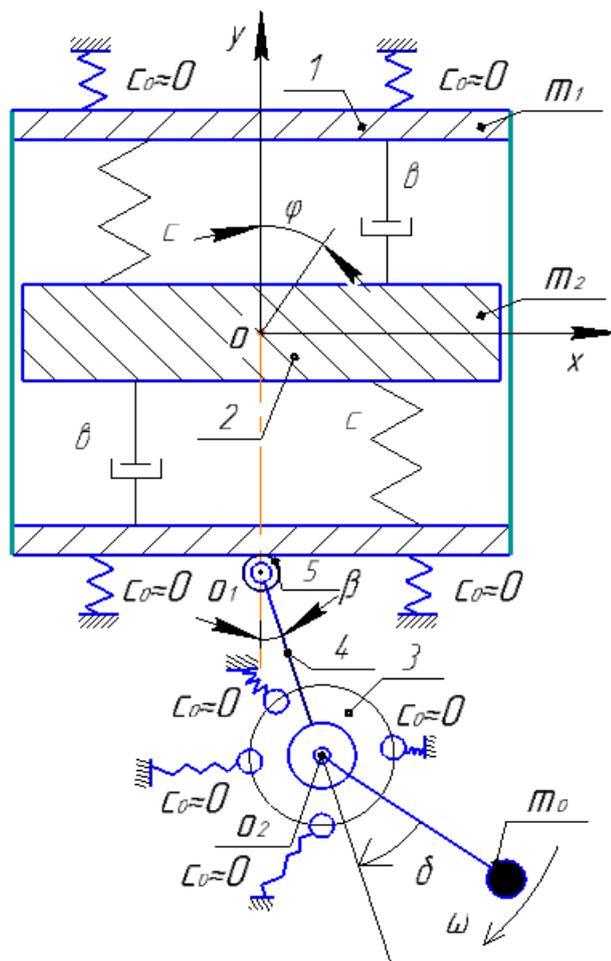


Рисунок 3.1 - Двухмассная расчетная динамическая схема вибрационного измельчителя с маятниковым вибровозбудителем

Подшипниковый узел 3 при помощи шатуна 4 и шарнира 5 соединен с системой тел 1 и 2. Шатун с подшипниковым узлом и дебалансом образуют маятник, который качается вокруг точки O_1 .

Данная механическая система является центрированной, поскольку при среднем положении маятника центр масс O системы тел 1 и 2 и ось вращения дебаланса лежат на одной прямой [30]. При этом равнодействующая упругих и диссипативных сил кормового слоя проходит через центр масс O .

Для качественного проведения технологического процесса и устранения непроизводительных затрат энергии необходимо, чтобы колебания были

прямолинейными и совершались вдоль оси y . При этом паразитные колебания вдоль оси x и угловые вокруг центра масс O весьма нежелательны.

Для выяснения этих условий составим дифференциальные уравнения движений системы в целом и ее элементов. При этом массу шатуна учитывать не будем. Координаты тел 1 и 2 в направлении оси y обозначим как y_1 и y_2 , их массу как m_1 и m_2 . Угол колебаний системы вокруг центра масс O обозначим как φ , а угол отклонения маятника от центральной линии как β .

Массу дебаланса примем равной m_0 , ее эксцентриситет относительно точки O_1 обозначим как ε .

Пусть вал дебаланса вращается равномерно по закону

$$\delta = \omega t. \quad (3.6)$$

Составление уравнений движения системы измельчителя и ее элементов проведем по методике И. И. Быховского [30].

Искомые уравнения имеют вид:

$$M\ddot{x} + m_0 l\ddot{\beta} + (m_1 + m_0)h\ddot{\varphi} = m_0 \varepsilon \omega^2 \cos \omega t; \quad (3.7)$$

$$M\ddot{y}_1 + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + c(y_1 - y_2) = m_0 \varepsilon \omega^2 \sin \omega t; \quad (3.8)$$

$$m_2\ddot{y}_1 - b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) - c(y_1 - y_2) = 0; \quad (3.9)$$

$$[I_1 + (Mh^2)]\ddot{\varphi} + b_1\dot{\varphi} + c_1\varphi + m_0 lh\ddot{\beta} = m_0 \varepsilon \omega^2 h \sin \omega t; \quad (3.10)$$

$$[I_2 + (m_0 l^2)]\ddot{\beta} + b_1\dot{\beta} + c_1\beta + m_0 l\ddot{x} + m_0 lh\ddot{\varphi} = m_0 \varepsilon \omega^2 l \sin \omega t, \quad (3.11)$$

где $M = m_1 + m_2 + m_0$;

l - расстояние O_1O_2 от оси шарнира маятника до оси вращения дебаланса;

h - расстояние OO_1 от центра масс совокупности тел 1 и 2 до оси шарнира маятника;

I_1 -центральный момент инерции системы тел 1 и 2;

b_1 – коэффициент углового сопротивления шарнира O_1 ;

c_1 - коэффициент угловой жесткости шарнира O_1 ;

I_2 – центральный момент инерции маятника.

Систему уравнений (3.7)...(3.11) можно записать в виде двух систем, поскольку они независимы по входящим в них переменным.

Первая система имеет вид

$$M\ddot{x} + m_0 l\ddot{\beta} + (m_1 + m_0)h\ddot{\varphi} = m_0 \varepsilon \omega^2 \cos \omega t; \quad (3.12)$$

$$[I_1 + (Mh^2)]\ddot{\varphi} + b_1 \dot{\varphi} + c_1 \varphi + m_0 lh\ddot{\beta} = m_0 \varepsilon \omega^2 h \sin \omega t; \quad (3.13)$$

$$[I_2 + (m_0 l^2)]\ddot{\beta} + b_1 \dot{\beta} + c_1 \beta + m_0 l\ddot{x} + m_0 lh\ddot{\varphi} = m_0 \varepsilon \omega^2 l \sin \omega t. \quad (3.14)$$

Вторая система отражает две степени свободы рабочих органов:

$$M\ddot{y}_1 + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + c(y_1 - y_2) = m_0 \varepsilon \omega^2 \sin \omega t; \quad (3.15)$$

$$m_2 \ddot{y}_1 - b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) - c(y_1 - y_2) = 0. \quad (3.16)$$

Для данного типа вибрационного измельчителя кормового зерна, как уже говорилось, необходимо, чтобы

$$x \equiv 0; \varphi \equiv 0. \quad (3.17)$$

Подстановка этих условий в первую систему не превращает каждое из входящих в нее уравнений в тождество. Следовательно, паразитных колебаний в данном измельчителе избежать не удастся. Это важнейший для нас вывод, которым и ограничимся при исследовании системы (3.12)- (3.14).

Изучим более подробно свойства системы (3.15)- (3.16). Данная система уравнений моделирует вынужденные колебания двухмассной системы рабочих органов измельчителя, когда вынуждающая сила приложена к первому телу. Эта система линейна. Подобные системы хорошо изучены [115], а решения известны и носят синусоидальный характер. Главная особенность этих систем-наличие двух резонансов и одного антирезонанса.

Поскольку мы приняли жесткость поддерживающих элементов c_0 близкой к нулю, то в нашей расчетной модели первый резонанс отсутствует (или, по-иному, совпадает с $\omega = 0$).

Резонансные частоты можно найти из выражения [194]:

$$(c_0 + c - m_1 \omega^2)(c - m_2 \omega^2) - c^2 = 0. \quad (3.18)$$

Поскольку у нас $c_0 = 0$, то выражение для отыскания частоты возбуждения p для реализации второго резонанса примет вид

$$(c - m_1 \omega^2)(c - m_2 \omega^2) - c^2 = 0. \quad (3.19)$$

Откуда

$$p = \sqrt{c/M^*}, \quad (3.20)$$

где $M^* = \frac{m_1 * m_2}{m_1 + m_2}$.

Условие антирезонанса, когда тело 1 (см. Рисунок 3.1), на которое действует вынуждающая сила, почти не колеблется, имеет вид [194]

$$\omega^* = \sqrt{\frac{c}{m_2}}. \quad (3.21)$$

При антирезонансе энергично раскачивается тело 2, что также способствует эффективному измельчению зерна в зазорах между телами 1 и 2.

Таким образом, данная динамическая схема измельчителя обеспечивает как режим резонанса рабочих органов, так и режим антирезонанса. Главный же негативный фактор данной динамической схемы вибрационного измельчителя – наличие паразитных колебаний рабочих органов. Далее рассмотрены динамические схемы виброизмельчителей для кормового зерна, в которых устранены паразитные колебания.

3.3 Анализ динамических эффектов в измельчителе с двумя самосинхронизирующимися вибровозбудителями на основе плоской расчетной схемы

В данном разделе исследуется вариант конструкции измельчителя с двумя самосинхронизирующимися вибровозбудителями центробежного типа. Самосинхронизация механических вибровозбудителей состоит в том, что два или более неуравновешенных ротора, приводимых в движение асинхронными двигателями, на неподвижном основании имеют разные скорости вращения ω_1 и ω_2 . Установленные же на общем подвижном основании, они вращаются с одинаковой средней скоростью ω .

Исследуемая конструкция вибрационного измельчителя приведена в Таблице. 1.7 (Рисунок 5) и защищена патентом РФ №2688424 [122].

Синхронизация - фундаментальное нелинейное явление, имеющее приложения во многих областях естествознания: физике, электронике, химии, биологии и т. д. [21,22]. Картина наблюдаемых эффектов в задачах

синхронизации может быть богатой и разнообразной. В значительной степени она зависит от типа динамики подвергаемой воздействию системы.

Значительная часть вибрационных технологических установок оснащена электромеханическими вибровозбудителями, выполненными на основе несбалансированных роторов (дебалансов), приводимых во вращение электроприводом. В настоящее время в большинстве электромеханических виброустановок используются устаревшие электроприводы и неэффективные алгоритмы управления, как правило, осуществляющие выдачу сигналов на запуск и поддержание скорости вращения дебалансов на заданном уровне. При этом виброустановки имеют низкое качество регулирования режимов работы, что в большинстве случаев снижает эффективность их функционирования. Одним из путей повышения эффективности работы виброустановок является разработка самосинхронизирующихся систем, позволяющих получить более широкий спектр колебаний по максимальному количеству координат, и разработка замкнутых систем электропривода, основанных на более совершенных алгоритмах управления [218].

Математические модели целесообразно представлять в виде динамических структурных схем, что обеспечивает физическую наглядность, а также удобство их анализа и синтеза как расчетно-аналитическими, так и компьютерными методами.

Исследование динамики вибрационного измельчителя проведем в два этапа. На первом из них рассмотрим упрощенную плоскую схему (Рисунок 3.2), введение которой оправдано малыми колебаниями системы в вертикальном направлении. На втором этапе в последующих разделах рассмотрим более полную компьютерную модель с другой расчетной схемой. Такой подход дает исчерпывающую информацию о динамических свойствах данной конструкции вибрационного измельчителя.

Вернемся к расчетной схеме, изображенной на Рисунке 3.2. Модель состоит из несущей системы 1, внутри которой расположена подвижная щека 2. К несущей системе прикреплены два одинаковых дебалансных вибровозбудителя 3, имеющих привод от асинхронных электродвигателей. Внутренние поверхности

несущей системы 1 и поверхности щеки 2 образуют рабочие поверхности измельчителя. Свойства измельчаемого материала отображают упругие c и вязкие b элементы. При этом элемент b в эквивалентном виде представляет все диссипативные потери в слое измельчаемого материала. Поскольку несущая система совершает малые колебания на подвесках, то считаем, что жесткость поддерживающих элементов c_0 близка к нулю.

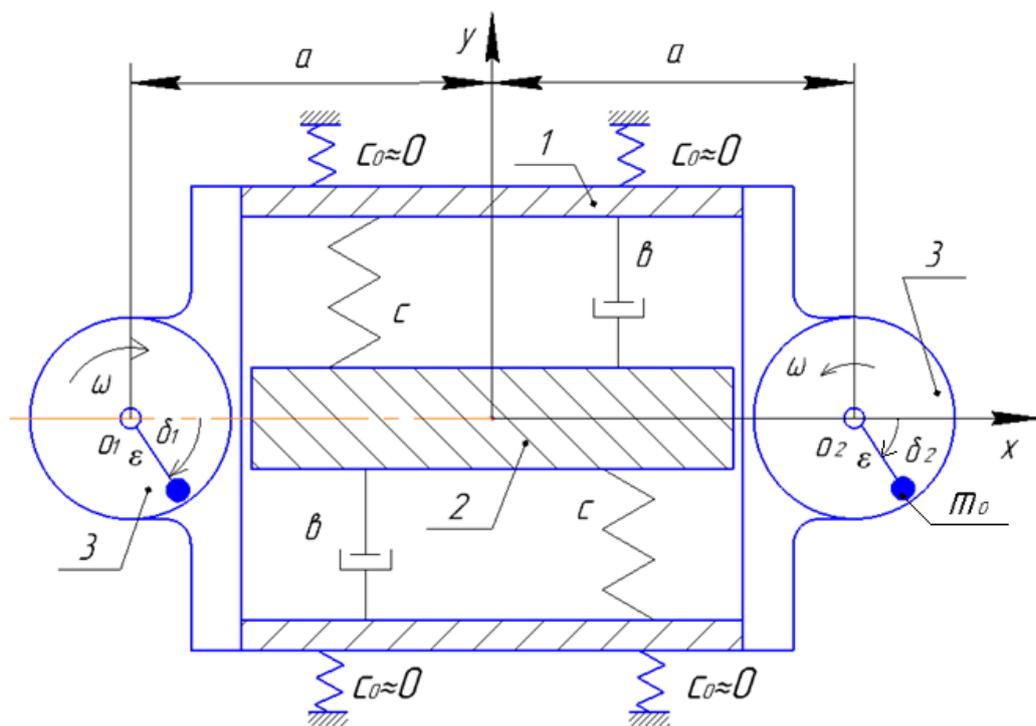


Рисунок 3.2. Расчетная динамическая схема вибрационного измельчителя с двумя самосинхронизирующимися вибровозбудителями, двухмассная

Перемещения тел 1 и 2 описываются координатами x и y их центров масс, отсчитываемых от их положения равновесия. Положения дебалансов описываются углами δ_1 и δ_2 , отсчитываемых от оси x . Угловые колебания всей системы относительно центра масс характеризуется углом φ .

В целом рассматриваемая расчетная модель является симметричной и центрированной, что упрощает самосинхронизацию вибровозбудителей.

В первом приближении считаем, что роторы вращаются равномерно по закону

$$\delta_1 = q_1 \omega t; \quad \delta_2 = q_2 (\omega t + \alpha), \quad (3.22)$$

где q_1 и q_2 – условные величины, характеризующие направления вращения дебалансных валов;

α – фазовый сдвиг между вращениями дебалансов.

Уравнения колебаний системы и отдельных элементов измельчителя имеют вид

$$M\ddot{x} = \Phi_0 [q_1 \cos \omega t + q_2 \cos (\omega t + \alpha)]; \quad (3.23)$$

$$I\ddot{\varphi} = \Phi_0 a [q_1 \sin \omega t - q_2 \sin (\omega t + \alpha)]; \quad (3.24)$$

$$M_1 \ddot{y}_1 + c(y_1 - y_2) + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = -\Phi_0 [q_1 \sin \omega t + q_2 \sin (\omega t + \alpha)]; \quad (3.25)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 - c(y_1 - y_2) - b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = 0, \quad (3.26)$$

где $M = m_1 + m_2 + 2m_0$;

$$M_1 = m_1 + 2m_0;$$

$$\Phi_0 = m_0 \varepsilon \omega^2;$$

a – расстояние от центра масс системы до осей вращения дебалансов;

I – момент инерции системы относительно центра ее масс.

Теория и практика [21,22] показывают, что возможны два режима синхронизации:

- 1) $\alpha \approx 0$ (синфазное вращение валов дебалансов);
- 2) $\alpha \approx \pi$ (противфазное вращение валов дебалансов).

В обоих случаях нас интересует встречное вращение дебалансов, при котором

$$q_1 = 1; q_2 = -1. \quad (3.27)$$

Исследуем первый режим синхронизации с $\alpha \approx 0$. Подставляя это условие, а также значения (3.21) в уравнения (3.17)...(3.20), будем иметь

$$M\ddot{x} = 2\Phi_0 \cos \omega t; \quad (3.28)$$

$$I\ddot{\varphi} = 2\Phi_0 a \sin \omega t; \quad (3.29)$$

$$M_1 \ddot{y}_1 + c(y_1 - y_2) + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = 0; \quad (3.30)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 - c(y_1 - y_2) - b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = 0. \quad (3.31)$$

Как следует из этих уравнений, данный режим синхронизации для вибрационного измельчителя явно не подходит, поскольку исчезает

вынуждающая сила по направлению оси y . В то же время возникают паразитные колебания вдоль оси x , а также угловые вокруг центра масс.

Поэтому рассмотрим далее режим противофазной синхронизации, для которой $\alpha \approx \pi$.

Для этого подставим в исходные уравнения (3.17)...(3.20) следующие значения параметров: $\alpha = \pi$, $q_1 = 1$; $q_2 = -1$. Тогда получим:

$$M\ddot{x} = 0; \quad (3.32)$$

$$I\ddot{\varphi} = 0; \quad (3.33)$$

$$M_1 \ddot{y}_1 + c(y_1 - y_2) + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = -2\Phi_0 \sin \omega t; \quad (3.34)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 - c(y_1 - y_2) - b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = 0. \quad (3.35)$$

Этот случай отвечает технологическим требованиям процесса измельчения, поскольку имеем только поступательные движения рабочих органов вдоль оси y , в том числе взаимные. Какие-либо паразитные колебания отсутствуют.

Следует обратить внимание на то, что система (3.28)...(3.29) является линейной моделью колебаний двухмассной системы, при которой гармоническая сила приложена к одной из масс (в данном случае к M_1).

Известно, что реально реализуется тот вид синхронизации, который устойчив. Устойчивость интересующего нас решения проверял И. И. Блехман [21]. Им показано, что при $c_0 \approx 0$ и неучете вязкого элемента противофазное вращение дебалансов с $\alpha \approx \pi$ наблюдается в диапазоне частот возбуждения ω

$$0 < \omega < p, \quad (3.36)$$

где $p = \sqrt{c/M^*}$,

$$M^* = \frac{m_1 * m_2}{m_1 + m_2}. \quad (3.37)$$

Желательно, чтобы антирезонанс тела 1 (см. Рисунок 3.2), который интересен с технологической точки зрения, лежал в диапазоне $0 \dots p$. Антирезонанс, как известно, может наступить при частоте возбуждения, равной парциальной частоте второго тела

$$\omega^* = \sqrt{\frac{c}{m_2}}. \quad (3.38)$$

Таким образом, условием попадания антирезонанса в указанный диапазон (3.30) становится неравенство

$$\frac{m_1 * m_2}{m_1 + m_2} < m_2.$$

Или, окончательно

$$\frac{m_1}{m_1 + m_2} < 1. \quad (3.39)$$

Последнее условие выполняется автоматически, и, следовательно, антирезонанс в системе может быть реализован.

Кроме антирезонанса нас интересует второй резонанс. Казалось бы, поскольку он наступает при $\omega \approx p$, его нельзя использовать, ибо исчезнет противофазная синхронизация. Однако Шишкин Е. В. и Казаков С. В. показали [209-212], что при учете вязкого трения в системе диапазон (3.36) расширяется за пределы p . Это гарантирует, что требуемая нам самосинхронизация вибровозбудителей в этом режиме не исчезнет, что является главным условием стабильной работы измельчителя.

3.4 Особенности динамики виброщекового измельчителя

Разработанная нами конструкция виброщекового измельчителя для кормового зерна защищена патентами РФ №№ 2759864, 2787723. Его динамическая схема составлена по методике [232] и представлена на Рисунке 3.3.

Схема включает две активные (вибрирующие) щеки 1 и 2, совершающие в рабочем режиме синхронизованные, симметричные относительно поперечной оси машины, угловые колебания. Средняя щека 3 не имеет вибропривода, поэтому ее можно назвать пассивной. Рама измельчителя идеализируется в виде мягко амортизированного абсолютно жесткого невесомого стержня 4. Любая из щек может поворачиваться в своем шарнире, расположенном в верхней части. Таким образом, каждая из щек представляет собой физический маятник. Шарниры расположены на расстоянии a друг от друга. Центры тяжести всех щек в положении статического равновесия лежат на вертикалях, проходящих через центры шарниров, и расположены на расстоянии l_1 от центров своих шарниров.

Считаем, что пружины рамы являются очень мягкими, поэтому их жесткость близка к нулю.

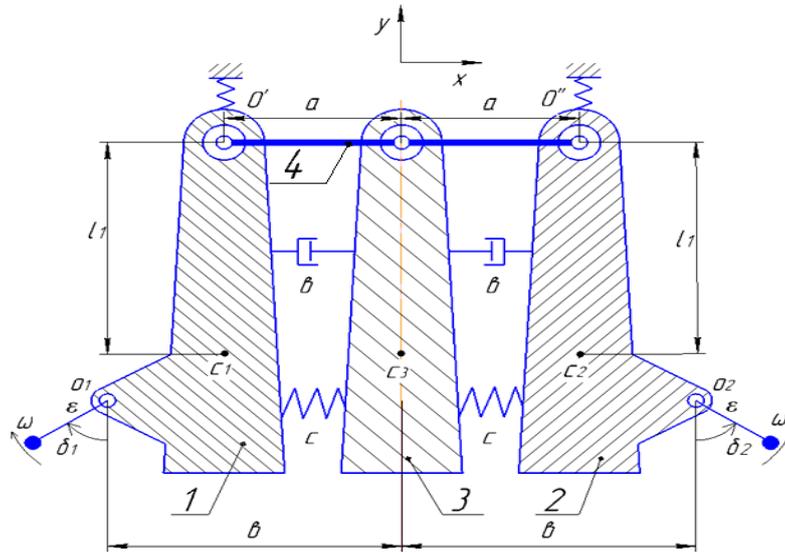


Рисунок 3.3. Расчетная динамическая схема виброщекового измельчителя с двумя самосинхронизирующимися вибровозбудителями, трехмассная

В сходственных точках щек O_1 и O_2 , удаленных на расстояние l_2 от осей шарниров, расположены центры вращений одинаковых дебалансных (инерционных) вибровозбудителей.

Измельчаемый материал поступает сверху в зазоры между активными и пассивной щеками. Вязкоупругие свойства технологической нагрузки моделируются вязкими и упругими элементами b и c . В качестве обобщенных координат всей системы измельчителя примем горизонтальные x и вертикальные y смещения центра шарнира средней щеки 3, абсолютный поворот φ стержня 4, а также повороты щек φ_1 , φ_2 и φ_3 , отсчитываемые от вертикали. Считаем, что дебалансы щек вращаются равномерно с одинаковой угловой скоростью, но в противоположных направлениях, по законам

$$\delta_1 = \omega t; \delta_2 = \omega t + \alpha, \quad (3.40)$$

где ω – угловые скорости дебалансов;

α – сдвиг по фазе вращений дебалансов.

Углы начала отсчета поворотов дебалансов видны из рисунка.

Уравнения малых колебаний всей системы измельчителя, а также всех трех щек при синхронных колебаниях вибровозбудителей с произвольной фазировкой α имеют вид:

$$M\ddot{x} + Ml_1(\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_3) = m_0\varepsilon\omega^2[\sin\omega t - \sin(\omega t + \alpha)]; \quad (3.41)$$

$$M\ddot{y} = m_0\varepsilon\omega^2[\cos\omega t + \cos(\omega t + \alpha)]; \quad (3.42)$$

$$Ma^2\ddot{\varphi} = -m_0\varepsilon\omega^2 a[\cos\omega t - \cos(\omega t + \alpha)]; \quad (3.43)$$

$$(I + ml_1^2)\ddot{\varphi}_1 + ml_1\ddot{x} + mgl_1\varphi_1 + b(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3)l_1^2 + c(\varphi_1 - \varphi_3)l_1^2 = m_0\varepsilon\omega^2 l_2 \sin\omega t; \quad (3.44)$$

$$(I + ml_1^2)\ddot{\varphi}_2 + ml_1\ddot{x} + mgl_1\varphi_2 + b(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)l_1^2 + c(\varphi_2 - \varphi_3)l_1^2 = -m_0\varepsilon\omega^2 l_2 \sin(\omega t + \alpha); \quad (3.45)$$

$$(I_3 + m_3 l_1^2)\ddot{\varphi}_3 + ml_1\ddot{x} + mgl_1\varphi_3 + b(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 - 2\dot{\varphi}_3)l_1^2 + c(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\varphi_3)l_1^2 = 0, \quad (3.46)$$

где M – общая масса узлов измельчителя, участвующая в колебательных движениях;

$m = m_1 = m_2$ – масса каждой активной щеки с дебалансом;

m_3 – масса пассивной щеки;

$I = I_1 = I_2$ – центральный момент инерции каждой активной щеки с дебалансами;

I_3 – центральный момент инерции активной щеки;

m_0, ε – масса дебаланса и ее эксцентриситет;

α – фазовый угол, характеризующий движение дебалансов.

Полученная математическая модель включает дифференциальные уравнения возвратно-поступательных движений всей системы измельчителя (3.41)...(3.42). Уравнение (3.43) моделирует угловые колебания рамы в плоскости чертежа. Наконец, уравнения (3.44)...(3.45) характеризуют вынужденные качания активных щек вокруг своих точек подвеса. Уравнение (3.46) описывает возможные угловые колебания пассивной щеки.

Первое, что нужно выяснить по математической модели (3.41)...(3.46), – возможность самосинхронизации вибровозбудителей, установленных на

активных щеках. Здесь представлен редкий случай, когда вибровозбудители установлены не на общей несущей системе, а на двух отдельных несущих системах (щеках), не имеющих непосредственной жесткой связи между собой.

Из рисунка можно уяснить, что в данном измельчителе нужна такая самосинхронизация вибровозбудителей, при которой щеки синхронно бы сдавливали материал в зазорах между активными и пассивной щеками, и также синхронно отходили в стороны для освобождения от измельченного материала. При принятых началах отсчета углового перемещения дебалансов (см. Рисунок 3.3) видно, что нам нужны синхронно-синфазные вращения дебалансов, при которых

$$\alpha = 0, \quad (3.47)$$

а углы $\delta_1 = -\delta_2$.

Подставляя значение (3.47) в уравнения (3.41)...(3.46), будем иметь

$$M\ddot{x} + Ml_1(\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_3) = 0; \quad (3.48)$$

$$M\ddot{y} = 2m_0\varepsilon\omega^2 \cos\omega t; \quad (3.49)$$

$$Ma^2\ddot{\varphi} = 0; \quad (3.50)$$

$$(I + ml_1^2)\ddot{\varphi}_1 + ml_1\ddot{x} + mgl_1\varphi_1 + b(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3)l_1^2 + c(\varphi_1 - \varphi_3)l_1^2 = m_0\varepsilon\omega^2 l_2 \sin\omega t; \quad (3.51)$$

$$(I + ml_1^2)\ddot{\varphi}_2 + ml_1\ddot{x} + mgl_1\varphi_2 + b(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)l_1^2 + c(\varphi_2 - \varphi_3)l_1^2 = -m_0\varepsilon\omega^2 l_2 \sin \omega t; \quad (3.52)$$

$$(I_3 + m_3 l_1^2)\ddot{\varphi}_3 + ml_1\ddot{x} + mgl_1\varphi_3 + b(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 - 2\dot{\varphi}_3)l_1^2 + c(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\varphi_3)l_1^2 = 0. \quad (3.53)$$

Рассмотрим сначала дифференциальные уравнения (3.51) и (3.52). При сложении правых и левых частей этих уравнений получается в правой части 0. Следовательно должны быть идентичны и левые части, т. е. силы в системе двух активных щек взаимно уравновешиваются при данном режиме самосинхронизации. Как следствие, $\varphi_3 = 0$. Следовательно, приходим к выводу, что при рассматриваемом режиме самосинхронизации вибровозбудителей средняя (пассивная) щека должна быть неподвижной в отношении ее угловых колебаний вокруг точки подвеса.

С учетом этой информации, а также условия $\varphi_1 = -\varphi_2$, из уравнения (3.48) будем иметь

$$M\ddot{x} = 0; x=0. \quad (3.54)$$

Таким образом, горизонтальных поступательных колебаний всей системы при данном режиме синхронизации быть не должно.

Закон вертикальных прямолинейных колебаний всей системы измельчителя следует из уравнения (3.49)

$$\ddot{y} = (2m_0\varepsilon/M)\cos\omega t. \quad (3.55)$$

Уравнения же качаний активных щек (3.51)...(3.52), с учетом $\ddot{x} = 0$ и $\varphi_3 = 0$, примут вид

$$(I + ml_1^2)\ddot{\varphi}_1 + mgl_1\varphi_1 + b\dot{\varphi}_1 l_1^2 + c\varphi_1 l_1^2 = \Phi_0 l_2 \sin(\omega t); \quad (3.56)$$

$$(I + ml_1^2)\ddot{\varphi}_2 + mgl_1\varphi_2 + b\dot{\varphi}_2 l_1^2 + c\varphi_2 l_1^2 = -\Phi_0 l_2 \sin(\omega t); \quad (3.57)$$

где $\Phi_0 = m_0\varepsilon\omega^2$.

После приведения подобных членов в этих уравнениях получим

$$(I + ml_1^2)\ddot{\varphi}_1 + l_1(mg + cl_1)\varphi_1 + b\dot{\varphi}_1 l_1^2 = \Phi_0 l_2 \sin\omega t; \quad (3.58)$$

$$(I + ml_1^2)\ddot{\varphi}_2 + l_1(mg + cl_1)\varphi_2 + b\dot{\varphi}_2 l_1^2 = -\Phi_0 l_2 \sin(\omega t); \quad (3.59)$$

Приведем эти уравнения к стандартному виду

$$\ddot{\varphi}_1 + 2n\dot{\varphi}_1 + \omega_0^2 \varphi_1 = Q_0 \sin\omega t; \quad (3.60)$$

$$\ddot{\varphi}_2 + 2n\dot{\varphi}_2 + \omega_0^2 \varphi_2 = -Q_0 \sin\omega t, \quad (3.61)$$

$$\text{где } 2n = \frac{bl_1^2}{I + ml_1^2}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{(mg + cl_1)l_1}{I + ml_1^2}}; \quad Q_0 = \frac{\Phi_0 l_2}{I + ml_1^2}. \quad (3.62)$$

Уравнения (3.60)...(3.61) представляют обычные линейные модели вынужденных колебаний, решения которых хорошо известны и приведены в любых учебниках по теории колебаний. Таким образом, каждая из активных щек в первом приближении совершает синусоидальные угловые колебания вокруг своего шарнира, что и требуется по технологическим соображениям. При этом размах колебаний одинаков у обеих щек, а их движения синхронизированы.

Кроме того, вся система измельчителя, в том числе и щеки, совершает вертикальные прямолинейные колебания. Совокупность перечисленных

движений для щек очень полезна, поскольку вся система измельчителя приходит в нижнее положение при зажатых щеках. При подъеме же системы щеки разжимаются, при этом измельченный материал остается в нижнем положении. Это способствует его быстрой эвакуации из камер измельчителя и предотвращает переизмельчение зерна.

Теория и практика синхронизации [21,22] показывают, что в данном случае может быть еще один вид синхронизации – противофазный, при котором

$$\alpha = \pi. \quad (3.63)$$

Подстановка значения $\alpha = \pi$ в начальные уравнения (3.41) – (3.46) приводит к результату:

$$M\ddot{x} + Ml_1(\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_3) = 2m_0\varepsilon\omega^2 \sin\omega t; \quad (3.64)$$

$$M\ddot{y} = 0; \quad (3.65)$$

$$Ma^2\ddot{\varphi} = -2m_0\varepsilon\omega^2 \cos\omega t; \quad (3.66)$$

$$(I + ml_1^2)\ddot{\varphi}_1 + ml_1\ddot{x} + mgl_1\varphi_1 + b(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3)l_1^2 + c(\varphi_1 - \varphi_3)l_1^2 = m_0\varepsilon\omega^2 l_2 \sin\omega t; \quad (3.67)$$

$$(I + ml_1^2)\ddot{\varphi}_2 + ml_1\ddot{x} + mgl_1\varphi_2 + b(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)l_1^2 + c(\varphi_2 - \varphi_3)l_1^2 = m_0\varepsilon\omega^2 l_2 \sin \omega t; \quad (3.68)$$

$$(I_3 + m_3 l_1^2)\ddot{\varphi}_3 + ml_1\ddot{x} + mgl_1\varphi_3 + b(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 - 2\dot{\varphi}_3)l_1^2 + c(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\varphi_3)l_1^2 = 0. \quad (3.69)$$

Как видно из данных уравнений, режим противофазной синхронизации совершенно непригоден для осуществления технологического процесса. Так, активные щеки колеблются в одной фазе, т. е. у них нет взаимных, относительно друг друга, колебаний. Следовательно, практически нет сжатия материала, подлежащего измельчению. Это сжатие можно повысить за счет увеличения инерционности средней пассивной щеки. Но есть еще негативные факторы данного режима синхронизации, обусловленные трудностями с выгрузкой из рабочих камер измельченного материала. В данном случае нет движений щек вдоль оси y , способствующих выгрузке, зато появились движения вдоль оси x , препятствующих выгрузке. Кроме этого, наблюдаются поворотные паразитные колебания всей системы.

Поэтому синфазный режим синхронизации из технологических соображений безусловно предпочтительнее противофазного. Однако в динамических системах реализуется тот режим синхронизации, который устойчив. Поэтому нужно доказать устойчивость требуемого режима синхронизации, и неустойчивость другого режима.

Для этого воспользуемся интегральным критерием устойчивости синхронных движений [21,22]. Он формулируется следующим образом: устойчивые синхронные движения отвечают минимуму усредненного за период колебаний Лагранжиана L механической системы.

Математическая формулировка этого критерия может быть записана следующим образом

$$L^* = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} L dt = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} (T - \Pi) dt \rightarrow \min,$$

где T , Π – кинетическая и потенциальная энергия тел механической системы.

Сформулируем в самом общем виде эти усредненные Лагранжианы для режимов фазной L_1^* и противофазной L_2^* синхронизации вибровозбудителей измельчителя:

$$L_1^* = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \left(\frac{M\dot{y}^2}{2} + \frac{I\dot{\varphi}_1^2}{2} + \frac{I\dot{\varphi}_2^2}{2} - \frac{c_\varphi(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} \right) dt;$$

$$L_2^* = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \left(\frac{M\dot{x}^2}{2} + \frac{I\dot{\varphi}_1^2}{2} + \frac{I\dot{\varphi}_2^2}{2} + \frac{I_3\dot{\varphi}_3^2}{2} + \frac{Ma^2\dot{\varphi}^2}{2} - \frac{c_\varphi(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} \right) dt,$$

Поскольку в режиме 2 имеются поворотные колебания всей системы измельчителя, то кинетическая энергия здесь увеличена за счет членов $I_3\dot{\varphi}_3^2/2$ и $Ma^2\dot{\varphi}^2/2$. В то же время последний член с потенциальной энергией здесь должен быть меньше, что мы уже обсуждали.

Следовательно, приходим к выводу, что $L_1^* < L_2^*$. Это означает, что устойчив необходимый для нас по технологическим соображениям синфазный режим. В пользу устойчивости именно данного режима говорит опыт разработки вибрационных измельчителей в горном деле: если измельчитель представляет симметричную динамическую систему (а у нас таковая и есть), то такой режим синхронизации обязательно существует и устойчив [24,25].

Таким образом, динамическая схема данного измельчителя вполне работоспособна, а требуемая синхронизация вибровозбудителей устанавливается автоматически. Виден и недостаток данной динамической схемы измельчителя: дебалансы вибровозбудителей закреплены на вибрирующих щеках и поэтому их подшипники подвержены большим динамическим нагрузкам. В остальном же эта динамическая схема отвечает требованиям, перечисленным во введении к данной статье.

3.5 Выбор рациональной динамической схемы вибрационного измельчителя кормового зерна

По критериям, введенным в подразделе 3.1, были проанализированы динамические свойства предложенных нами вибрационных измельчителей кормового зерна [87].

На основе проведенных динамических исследований трех конструкций вибрационного измельчителя кормового зерна заполнили Таблицу 3.1, в которой представлены итоговые результаты этих исследований. Таблица интуитивно понятна. Однако по критерию 5 поясняем, что представленные цифровые данные показывают, во сколько раз габаритные размеры измельчителя, при наличии системы вибровозбуждения, больше, чем при ее отсутствии.

Отбор рационального варианта динамической схемы проведем на основе использования известного принципа Эджворта-Парето. Согласно этому принципу, всякий выбираемый вариант должен быть Парето-оптимальным [196].

В основу этого метода положены две известные аксиомы, предполагающие бинарное сравнение альтернативных вариантов.

Аксиома Парето. Если оценка одного из двух вариантов не хуже оценки второго варианта (т.е. \geq) по всем компонентам, причем по крайней мере по одной из них – строго лучше (т.е. $>$), то первый вариант предпочтительнее второго.

Аксиома исключения. Вариант, не выбираемый в какой-либо паре, не должен оказаться среди выбранных из всего исходного множества возможных вариантов.

Таблица 3.1 - Исходные данные для отбора рациональной динамической схемы вибрационного измельчителя (обозначения в таблице: « + »-требование обеспечивается, « - »-требование не обеспечивается)

Отличительный признак динамической схемы измельчителя Перечень требований к динамической схеме измельчителя	С маятниковым вибровозбудителем- вариант исполнения а	С двумя самосинхронизирующимися вибровозбудителями-вариант исполнения б	С двумя вибрирующими щеками- вариант исполнения в
1. Обеспечивать вибрации точек рабочих органов по определенным законам	+	+	+
2. Осуществлять самосинхронизацию вибровозбудителей	Самосинхронизация невозможна, поскольку применен один вибровозбудитель	+	+
3. Обеспечивать минимальную амплитуду несущей системы измельчителя,	+	+	-
4. Обеспечивать максимальную амплитуду рабочего органа измельчителя, на	+	+	+
5. Отвечать критерию компактности вибропривода	2,0	1,4	1,7
6. Обеспечивать отсутствие паразитных колебаний.	-	+	+

При выполнении аксиомы Парето и аксиомы исключения формируется Парето – оптимальное множество вариантов.

На основе этих принципов сравним варианты исполнения 1 и 2 (см. Таблицу 3.1). Первый вариант уступает второму по компактности, поскольку его маятниковый вибровозбудитель увеличивает габариты машины в 2 раза, в то время как синхронизированный привод второго варианта всего лишь на 40%.

Также рабочие органы первого варианта, кроме технологически необходимых поступательных вибраций, совершают паразитные угловые колебания, что с неизбежностью требует дополнительных энергозатрат.

Поэтому в бинарном сравнении вариантов 1 и 2 мы должны отдать предпочтение варианту 2.

Далее сравним варианты 2 и 3. Здесь также видно превосходство варианта 2. Динамическая система этого измельчителя может работать в режиме антирезонанса, что обеспечивает минимальные колебания несущей системы, на которой смонтированы вибровозбудители. Следовательно, в этом случае уменьшены инерционные нагрузки на вибропривод, что увеличивает его срок службы. Да и сам вибропривод варианта 2 является более компактным. Поэтому и в этом бинарном сравнении лучшим является опять же вариант 2.

В целом при сравнении всех трех вариантов мы должны безоговорочно отдать предпочтение варианту 2. Он является предпочтительным и в смысле Парето, ибо переход к любому другому варианту неизбежно ухудшает один из критериев оптимальности.

Мы относительно легко справились с задачей отбора, поскольку вариант 2 не уступил другим вариантам ни по одному показателю, а по некоторым критериям превзошел их.

Таким образом, для дальнейших исследований и конструктивной проработки необходимо использовать вибрационный измельчитель кормового зерна с динамической схемой, построенной по варианту б (см. Рисунок 5 Таблицы 1.7). Она предполагает двойной самосинхронизированный вибропривод и режим антирезонанса рабочих органов.

3.6 Компьютерное и физическое моделирование динамики зернового измельчителя с самосинхронизирующимися вибровозбудителями

В связи с тем, что динамическая схема измельчителя с парой самосинхронизирующихся вибровозбудителей и антирезонансом рабочих органов была отобрана как перспективная, потребовались дополнительные подтверждения

ее функционирования. Усложним расчетную схему измельчителя, отобразив маятниковые колебания рабочих органов (Рисунок 3.4)

В нашем случае направления вращения роторов противоположные ($q_1 q_2 = -1$), а разность начальных фаз составляет $\alpha_2 - \alpha_1 \sim \pi$. Это соответствует устойчивому противофазному вращению, приводящему к прямолинейным поступательным гармоническим колебаниям перпендикулярно плоскости, в которой лежат оси вращения роторов [210,211].

В целом конструкция данного измельчителя представляет собой симметричную систему с двумя осями симметрии. В таких системах центробежные вибровозбудители всегда самосинхронизируются [210,211], поэтому можно считать, что активный элемент 1 (корзина) находится под действием суммарной вынуждающей силы двух центробежных вибровозбудителей (см. Рисунок 3.4)

$$\Phi = 2\Phi_0 \sin \omega t, \quad (3.70)$$

где $\Phi_0 = m_0 \varepsilon \omega^2$ - центробежная сила одного вибровозбудителя (m_0, ε, ω - масса, эксцентриситет дебаланса и угловая скорость дебалансного вала).

Расчетную динамическую схему вибрационного измельчителя представим в виде двойного маятника (см. Рисунок 3.4). Первый маятник, подвешенный в точке O_1 , составляет невесомая пластина 1 с жестко прикрепленным к ней активным элементом (корзиной) 2. Второй (пассивный) маятник образует массивная пластина 3, закрепленная в точке подвеса O_2 . Вся конструкция в целом и маятники в отдельности могут совершать угловые колебания в плоскости чертежа.

Измельчаемое фуражное зерно – относительно мягкий материал, демонстрирующий упругие и неупругие свойства. Рабочими органами вибрационного измельчителя обрабатывается слой такого материала, механические и реологические свойства которого отличаются от свойств отдельной зерновки. В частности, в порах слоя постоянно циркулирует воздух, следуя за движением активной поверхности.

Это придает слою дополнительные вязкие свойства. Поэтому слой фуражного зерна, подвергаемый сжатию и измельчению в зазоре рабочих органов 2 и 3, моделируем в виде упругих и вязких элементов (см. рисунок 2.14). При этом вязкие элементы моделируют все диссипативные свойства слоя, в том числе обусловленные микропластичностью и образованием трещин в зерновках.

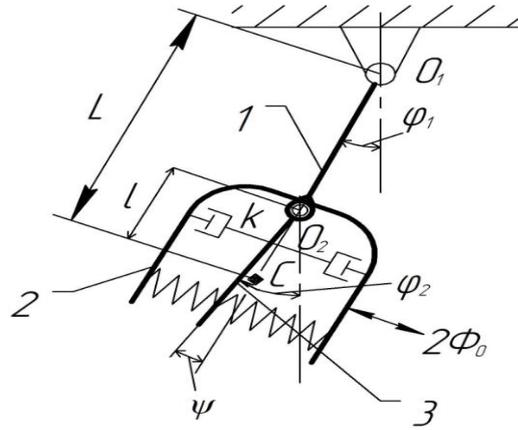


Рисунок 3.4- Расчетная схема угловых колебаний рабочих органов измельчителя

Перейдем к составлению дифференциальных уравнений. Будем при этом считать, что центры тяжести маятников в состоянии покоя совпадают, т.е. что $O_1 C_1 \approx O_1 C_2 \approx O_1 C \approx L$ (см. рис. 3.4).

Уравнение вынужденных колебаний первого (внешнего) маятника запишем в виде

$$I_1 \ddot{\varphi}_1 + b(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2)L + c(\varphi_1 - \varphi_2)L + MgL \sin \varphi_1 = 2L\Phi_0 \sin \omega t, \quad (3.71)$$

где I_1 - момент инерции системы относительно точки O_1 ;

$M = m_1 + m_2 + 2m_0$ - суммарная масса первого и второго маятников, а также двух дебалансов;

b, c - коэффициенты, отражающие вязкие и упругие свойства зернового слоя.

Как видно, в уравнении (3.71) учтены сила упругости P_y зернового слоя

$$P_y = c\psi = c(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (3.72)$$

а также сила вязкого сопротивления этого слоя

$$P_b = b\dot{\psi} = b(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2). \quad (3.73)$$

Эти силы характеризуют технологические свойства измельчаемого фуражного зерна.

Источником вынужденных колебаний второго маятника, кроме сил, передающихся через зерновой слой, являются колебания его точки подвеса O_2 , возбуждаемые первым маятником. Иначе говоря, колебания второго маятника обязаны и переносной силе инерции

$$J_E = -m_2(\ddot{x}\cos\varphi_2 + \ddot{y}\sin\varphi_2) \quad (3.74)$$

где \ddot{x} и \ddot{y} - ускорения переносного движения, действующие, соответственно, по горизонтали и вертикали.

С учетом сказанного, дифференциальное уравнение угловых колебаний второго маятника относительно точки O_2 запишем в виде

$$\begin{aligned} I_2\ddot{\varphi}_2 + b(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1)l + c(\varphi_2 - \varphi_1) + m_2glsin\varphi_2 = \\ = -m_2l(\ddot{x}\cos\varphi_2 + \ddot{y}\sin\varphi_2). \end{aligned} \quad (3.75)$$

В связи с малостью колебаний имеем:

$$\sin\varphi_1 \approx \varphi_1; \sin\varphi_2 \approx \varphi_2; \cos\varphi_2 \approx 1; \ddot{y} \approx 0;$$

$$\ddot{x} = (L - l)\ddot{\varphi}_1.$$

Тогда уравнения (3.71) и (3.75) предстанут в упрощенном виде (учтем также, что $\Phi_0 = m_0\varepsilon\omega^2$)

$$\begin{aligned} I_1\ddot{\varphi}_1 + bL(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + cL(\varphi_1 - \varphi_2) + MgL\varphi_1 = 2m_D \cdot \varepsilon \cdot \omega^2 L \cdot \\ \sin\omega t; \end{aligned} \quad (3.76)$$

$$\begin{aligned} I_2\ddot{\varphi}_2 + bL(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) + cl(\varphi_2 - \varphi_1) + m_2gL\varphi_2 = -m_2l(L - \\ l)\ddot{\varphi}_1. \end{aligned} \quad (3.77)$$

Разделив все члены первого уравнения на I_1 , с второго на I_2 , будем иметь

$$\left\{ \ddot{\varphi}_1 + 2n_1(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + \omega_{12}^2(\varphi_1 - \varphi_2) + \omega_{01}^2\varphi_1 = K_1 \cdot \omega^2 \sin\omega t; \right. \quad (3.78)$$

$$\left. \ddot{\varphi}_2 + 2n_2(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) + \omega_{21}^2(\varphi_2 - \varphi_1) + \omega_{02}^2\varphi_2 = -K_2\ddot{\varphi}_1, \right. \quad (3.79)$$

где $n_1 = \frac{bL}{2I_1}; n_2 = \frac{bl}{2I_2}; \omega_{01} = \sqrt{\frac{MgL}{I_1}}; \omega_{02} = \sqrt{\frac{cL}{I_2}}; \omega_{12} = \sqrt{\frac{cL}{I_1}};$

$$\omega_{21} = \sqrt{\frac{cl}{I_2}}; K_1 = \frac{2m_0 \cdot \varepsilon \cdot L}{I_1}; K_2 = \frac{m_2l(L-l)}{I_2}.$$

Величины ω_{12} и ω_{21} имеют размерность угловой частоты колебаний. Они выражают парциальные добавки, обусловленные упругостью зернового слоя, к парциальным частотам ω_{01} и ω_{02} свободных колебаний маятников в поле силы тяжести.

Уравнения (3.78) и (3.79) представляют собой математическую модель колебаний рабочих органов измельчителя с учетом технологической нагрузки. Эти уравнения в принципе могут быть решены для стационарного случая аналитическим методом, но приводят к громоздким выражениям. В связи со сказанным, более предпочтительным является численный метод решения, который позволяет, кроме прочего, проанализировать процессы установления колебаний.

Численный метод был реализован в программе *MathCAD* (Приложение Б). Полученная компьютерная модель позволила провести вычислительные эксперименты, показавшие работоспособность данной динамической схемы измельчителя.

На рис. 3.5 показаны угловые перемещение рабочих органов $\varphi_1 \equiv \varphi 1$ и $\varphi_2 \equiv \varphi 2$, а также угол их взаимных колебаний $\psi = \varphi_1 - \varphi_2 \equiv \varphi 1 - \varphi 2$. При этом использованы предполагаемые параметры процесса измельчения: $\omega = 150\text{с}^{-1}$; $\omega_{01} = 5,0$; $\omega_{02} = 2,0$; $\omega_{12} = 2,6$; $\omega_{21} = 4,5$; $n_1 = 0,67$; $n_2 = 2,0$; $K_1 = 0,033$; $K_2 = 0,500$.

Как видно из рис. 3.5, размахи взаимных колебаний рабочих органов превосходят размахи активного и пассивного маятников в отдельности. Это говорит о том, что колебания рабочих органов происходят в противофазе, т.е. при сдвиге фаз $\delta \rightarrow \pi$. При этом реализуется зарезонансный режим колебаний, в связи с чем система при разгоне, когда возбуждающие частоты малы, проходит через резонансы, характеризуемые большими размахами колебаний обоих маятников.

Очевидно, что при конструктивном исполнении измельчителя необходимо предусмотреть регулируемые дебалансы, реализующие плавное увеличение их статического момента и возбуждающей силы по мере разгона электропривода.

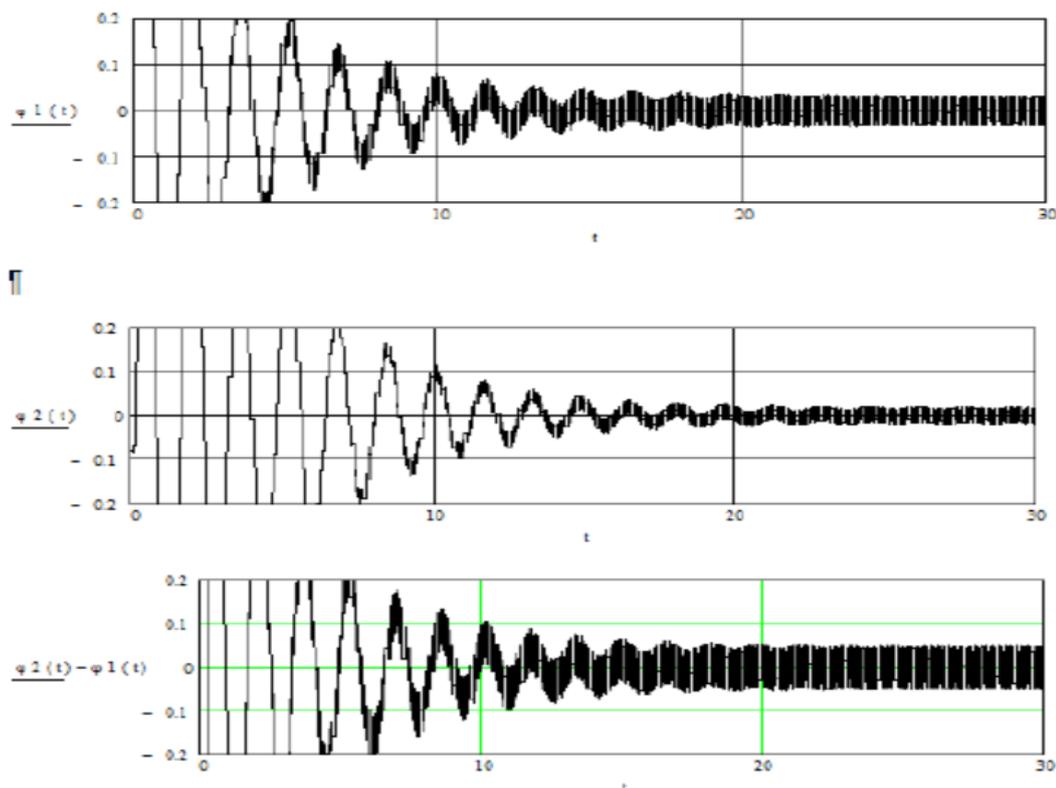


Рисунок 3.5 - Угловые колебания (в радианах) активного φ_1 , пассивного φ_2 маятников и их взаимные угловые перемещения $\psi = \varphi_2 - \varphi_1$

Еще более эффективным может быть режим работы измельчителя при осуществлении антирезонанса в системе. Этот режим в данной конструкции означает, что тяжелая корзина с прикрепленными вибровозбудителями (первый маятник, см. Рисунки 3.6 и 3.7) совершает очень малые колебания, а пассивный элемент (маятник 2), наоборот, - очень большие. Вычислительный эксперимент показывает возможность осуществления такого режима

Видно, что размахи внутреннего маятника примерно в 4-5 раз превышают размахи внешнего маятника. Для процесса дробления существенное значение имеет взаимное перемещение маятников. Оно достигает значения 0,2 рад (см. рис. 3.6в) и может ограничиваться зазором между маятниками.

Для более полного изучения закономерностей антирезонанса в данной динамической системе проведем вычислительный эксперимент с целью построения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) активного и пассивного маятников, а также их взаимных перемещений.

Для вычислительного эксперимента использовали прежнюю компьютерную модель, основанную на решении дифференциальных уравнений движения элементов измельчителя (Приложение В).

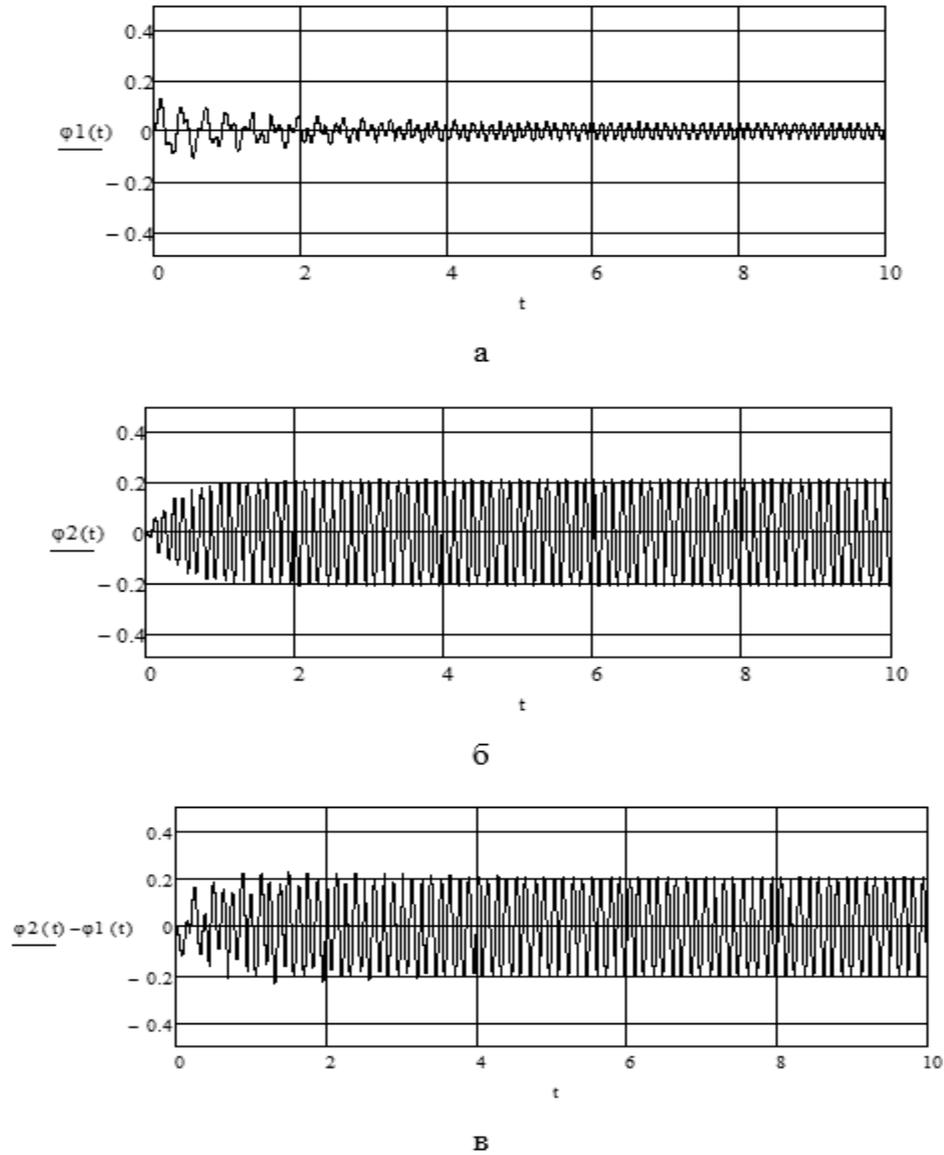


Рисунок 3.6 Угловые колебания (в радианах) активного φ_1 , пассивного φ_2 маятников и их взаимные угловые перемещения $\psi = \varphi_2 - \varphi_1$ при антирезонансе

В процессе эксперимента изменяли лишь частоту внешнего воздействия, остальные параметры оставались прежними, т. е. отыскивались функции

$$\varphi_1 = \varphi_1(\omega), \quad \varphi_2 = \varphi_2(\omega), \quad \psi = \varphi_2 - \varphi_1 = \psi(\omega).$$

Частота ω принимала значения в промежутке $0 \text{--} 70 \text{ с}^{-1}$ через каждые 10 с^{-1} . Полученные результаты были сначала представлены в виде полигонов распределения соответствующих угловых амплитуд колебаний в функции частоты (рис. 3.7).

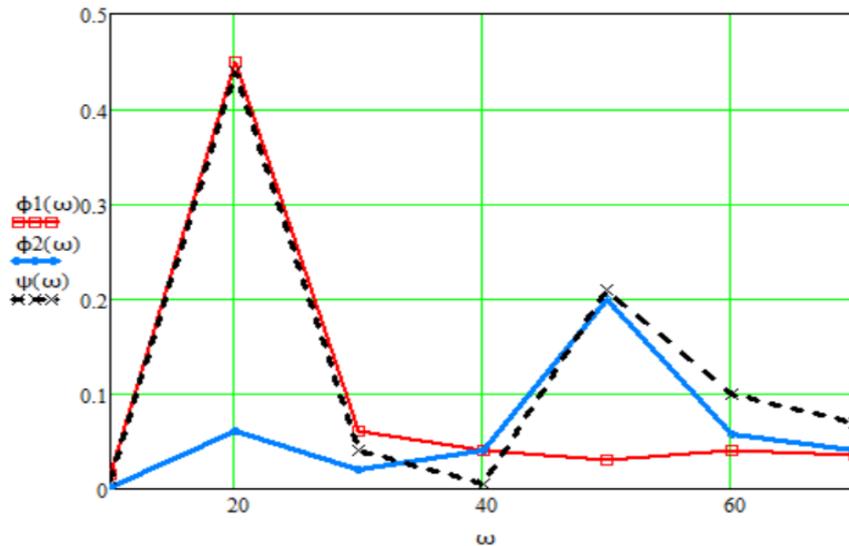
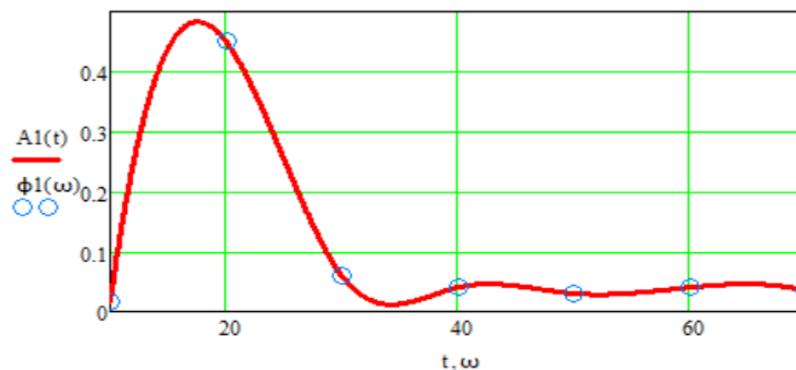


Рисунок 3.7 - Полигоны распределения амплитуд угловых колебаний (рад) активного φ_1 , пассивного φ_2 маятников и их взаимные угловые перемещения

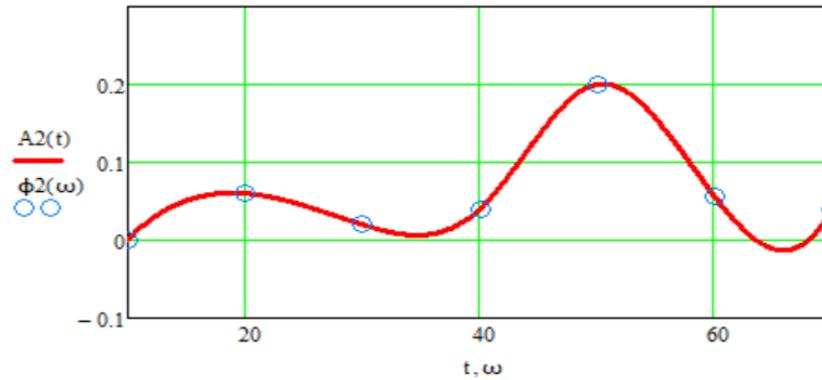
$$\psi = \varphi_2 - \varphi_1 \text{ при антирезонансе}$$

В последующем каждый из графиков рассматривался отдельно (Рисунок 3.8), а соединение численно полученных точек проводили при помощи компьютерных функций *cspline* и *inter* кубической сплайн-интерполяции, которые применяются совместно [71].

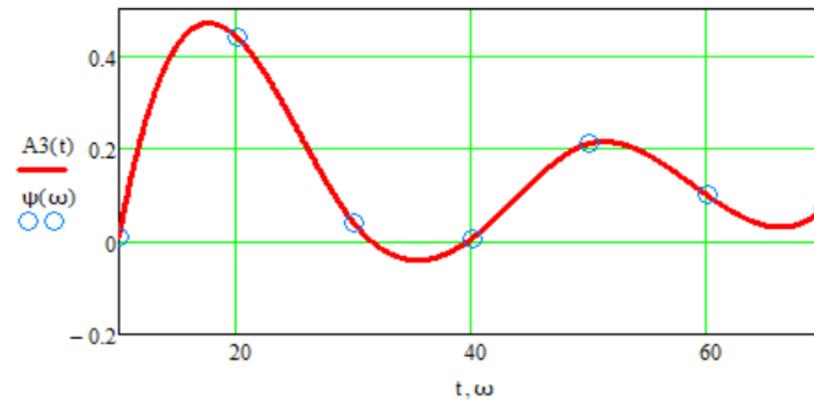
В исследуемом диапазоне частот активный маятник имеет резонанс при его собственной частоте качаний $\omega_{01} = 20$ и антирезонанс при собственной частоте пассивного маятника $\omega_{02} = 50$. Как видно, режим резонанса является очень напряженным для активного маятника, поскольку раскачивать нужно массивное тело, содержащее вибровозбудители.



а



б



в

Рисунок 3.8.- Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) активного (а) и пассивного маятников (б), а также их взаимных перемещений (в)

При антирезонансе интенсивно раскачивается пассивный маятник, а активный маятник имеет минимальные колебания с амплитудой около 0,05 рад. Взаимные относительные колебания, от которых и зависит процесс измельчения, сохраняют большую величину 0,2 рад.

Таким образом, приходим к выводу, что в колебательной системе измельчителя необходимо поддерживать режим антирезонанса.

На основе полученных закономерностей вибрационного измельчения фуражного зерна предложена методика расчета основных технологических показателей измельчающей машины вибрационного типа (Приложение Г).

В связи со сказанным возникла необходимость опытной проверки выдвинутых нами предположений. В режиме антирезонанса проверяли синхронное вращение дебалансов на экспериментальном образце вибрационного

измельчител кормового зерна. Верхние крышки вибровозбудителей были сняты (Рисунок 3.9) и во время работы проводили фотосъемку положения дебалансов.

Анализ фотоснимков показал стабильную самосинхронизацию вибровозбудителей, хотя фазировка дебалансных валов отличалась от теоретических 180° и составляла $168-170^\circ$. Это отклонение не влияет на технологический процесс измельчения. Следовательно, первоначальная гипотеза о совместном проявлении эффектов самосинхронизации вибровозбудителей и антирезонанса рабочих органов нашла свое теоретическое и экспериментальное подтверждение.

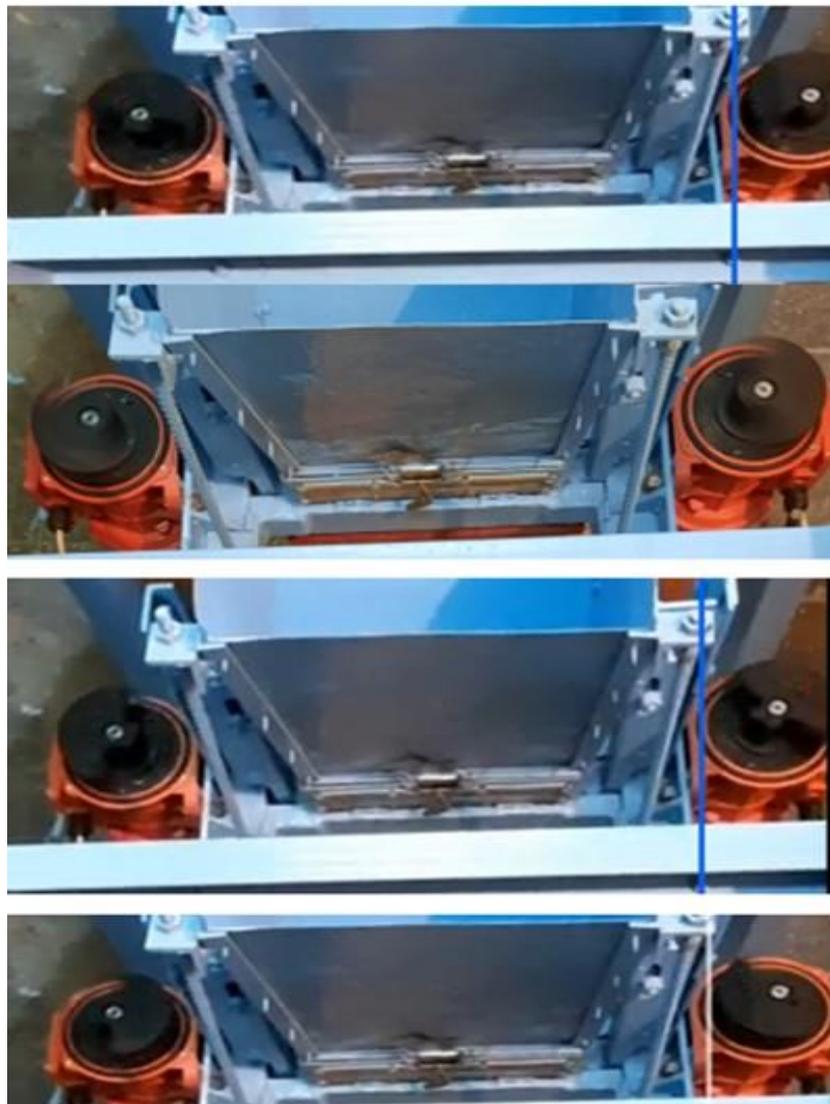


Рисунок 3.9 Взаимное положение дебалансных валов измельчителя в случайные моменты времени (вид сверху, крышки дебалансных валов вибровозбудителей сняты)

Выводы по главе 3

1. Анализ всей совокупности информации по вибрационным измельчителям, разработанным в различных отраслях хозяйства, позволил сформулировать основные требования к динамическим системам этих машин. К основным требованиям относятся:

- Обеспечивать вибрации точек рабочих органов по определенным законам;
- Осуществлять самосинхронизацию вибровозбудителей;
- Обеспечивать минимальную амплитуду несущей системы измельчителя;
- Обеспечивать максимальную амплитуду рабочего органа измельчителя;
- Отвечать критерию компактности вибропривода;
- Обеспечивать отсутствие паразитных колебаний.

Получены математические модели динамики вибрационных измельчителей кормового зерна, учитывающие их конструктивные особенности и взаимодействие рабочих органов с технологической средой.

3. В результате сравнения трех динамических схем измельчителей кормового зерна по введенным критериям был отобран вариант измельчителя с динамической схемой, построенной по варианту, предусматривающему двойной самосинхронизированный вибропривод и режим антирезонанса рабочих органов. Эффект антирезонанса в данном устраняет главный недостаток вибрационных технологических машин – быстрый выход из строя вибровозбудителей и других узлов устройства.

4. Теоретически и экспериментально установлено, что в механической системе данного вибрационного измельчителя кормового зерна одновременно проявляются два технически противоречивых динамических эффекта: антирезонанс двухмассной системы и самосинхронизация неуравновешенных роторов. В целом математическое моделирование и вычислительные эксперименты показывают работоспособность данной динамической схемы измельчителя с получением достаточных размахов колебаний рабочих органов. Вращения роторов вибровозбудителей носят синхронно-противофазный характер,

что положительно сказывается на функционировании измельчителя. Анализ фотоснимков показал стабильную самосинхронизацию вибровозбудителей, хотя фазировка дебалансных валов отличалась от теоретических 180° и составляла $168-170^\circ$. Это отклонение не влияет на технологический процесс измельчения.

4 МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КОРМОВОГО ЗЕРНА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

4.1 Оценка гранулометрического состава дерти, образуемой при измельчении кормового зерна

Существующие регламентирующие документы предписывают оценивать качество работы измельчителей по средневзвешенному размеру частиц полученной дерти (модулю размола) и коэффициенту вариации модуля размола [44,111,161]. Действительно, по этим показателям можно сравнивать измельчители между собой и выявлять лучшие из них. Однако в этом случае физиологические потребности вида животного учитываются лишь косвенно.

Согласно регламентирующему документу [161] и зоотехническим требованиям [105,108,128], установлены следующие требования на крупность (средневзвешенный размер частиц) зерновой дерти:

- свиньи откормочные – 0...1 мм;
- КРС - 1...2 мм;
- птица – 2...3 мм.

Однако существующие измельчители дают широкий спектр размеров частиц дерти, захватывающей, как правило, все три указанных диапазона размола. В связи с этим возникает проблема оптимизации гранулометрического состава получаемой дерти для определенных видов животных и выбор способов снижения разбросов частиц по размерам при измельчении кормового зерна [195].

Пусть мы провели ситовой анализ дерти, полученной на определенном режиме работы некоторого измельчителя, получили экспериментальные полигоны распределения частиц, подобрали аналитическую функцию плотности вероятности $f(x)$ и функцию распределения $F(x)$ (см. Рисунок 4.1).

Фактически любой вид распределения указывает на то, что полученная дерть имеет размеры от нуля и до размера исходных зерновок. Для животных же, напомним еще раз, требуется определенный интервал размеров частиц (x_1, x_2) .

Интервал (x_1, x_2) можно также записать в виде (x_1, kx_1) , где $k=x_2/x_1$.

Вероятность P того, что размер x частиц дерти примет значение, принадлежащее интервалу (x_1, x_2) составит

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx = F(x_2) - F(x_1). \quad (4.1)$$

Геометрически указанную вероятность можно истолковать как площадь заштрихованной на Рисунке 4.1 фигуры.

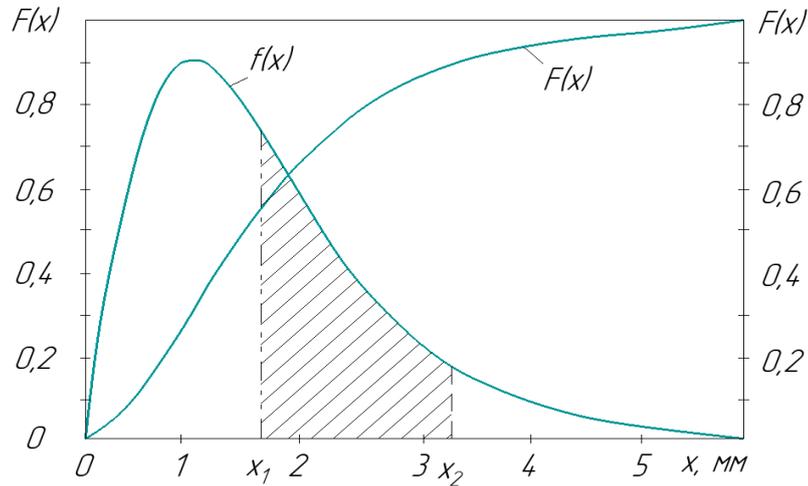


Рисунок 4.1-Теоретическое распределение размеров x частиц дерти

Соответственно вероятность получения: мелкого (для данного вида животных) размола

$$P(x < x_1) = \int_0^{x_1} f(x)dx, \quad (4.2)$$

крупного (для данного вида животных) размола

$$P(x > x_2) = \int_{x_2}^{\infty} f(x)dx. \quad (4.3)$$

Как видно из Рисунка 4.1, в нужную зону $(x_1 < x < x_2)$ попадает лишь некоторая часть размола. Размеры частиц $(0, x_1)$ представляют переизмельченный продукт, (x_2, ∞) – недоизмельченный. Мелкий размол ведет к перерасходу энергии измельчителем, крупный – не усваивается животными. И в том и в другом случае производство несет потери. Традиционный путь улучшения размольной характеристики – настроить измельчители таким образом, чтобы пик функции распределения находился в интервале (x_1, x_2) . Это мало спасает положение, поскольку недоизмельченный и переизмельченный продукт остаются. Тем не менее определим аналитически наибольшую вероятность попадания размера

частиц x , как случайной величины, в интервал (x_1, x_2) , вычислив производную dP/dx и приравняв ее нулю, т.е.

$$\frac{dP}{dx} = F'(x_2) - F'(x_1) = 0. \quad (4.4)$$

В работе [200] предложен весьма тонкий подход к решению задачи оптимизации гранулометрического состава дерти и связан с введением экономических показателей. Для этого задаются удельные (в расчете на 1 кг дерти) потери от переизмельчения зерна (повышенные затраты энергии, недополучение продукции от животных) C_1 (руб/кг), измельчения согласно зоотехническим требованиям C_2 (руб/кг), недоизмельчения зерна (потраченная зря электроэнергия на измельчение и фуражное зерно, которое не усвоилось животными) C_3 (руб/кг).

Имея перечисленные показатели потерь, можно подсчитать общие средние потери W , которые будут равны сумме всех потерь, умноженных на вероятность их получения, т.е.

$$W = C_1 \int_0^{x_1} f(x)dx + C_2 \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx + C_3 \int_{x_2}^{\infty} f(x)dx. \quad (4.5)$$

Логично предположить, что $C_2=0$, тогда функцию цели можно записать в виде

$$W = C_1 \int_0^{x_1} f(x)dx + C_3 \int_{x_2}^{\infty} f(x)dx \rightarrow \min \quad (4.6)$$

Таким образом, в качестве критерия оптимальности принят показатель W – общие средние потери от нарушения зоотехнических требований на размер частиц дерти.

Такой подход абсолютно верен с точки зрения математики и экономики, но нереален при практических расчетах, поскольку неизвестны, и вряд ли когда-то будут выявлены, удельные стоимости $C_1...C_3$. К тому же, вследствие нестабильности экономической ситуации, должны постоянно вноситься инфляционные поправки.

Поэтому нами предлагается упрощение данной методики, при этом стоимостные показатели не привлекаются. Пригодность конкретного измельчителя для определенного вида животных предлагается оценивать по

выражению

$$\xi = \frac{\int_{x_1}^{x_2} f(x) dx}{\int_0^{\infty} f(x) dx}. \quad (4.7)$$

В данном выражении отражены свойства измельчителя с присущей ему функцией плотности вероятности $f(x)$ размеров получаемых частиц и потребности животного по диапазону размера частиц (x_1, x_2).

Поскольку интеграл в знаменателе численно равен единице, то последнее выражение можно упростить

$$\xi = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx. \quad (4.9)$$

Величину ξ можно назвать *коэффициентом соответствия* данного измельчителя или его режима настройки зоотехническим требованиям (для определенного вида животных).

При разработке измельчителей и отработке режимов их работы должна ставиться оптимизационная задача

$$\xi = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \rightarrow \max. \quad (4.10)$$

Величина ξ изменяется в пределах от 0 до 1, при этом полное несоответствие измельчителя оценивается 0, полное соответствие – 1. Для реальных измельчителей коэффициент ξ принимает некоторые промежуточные значения

Отличие предлагаемой методики от официальной состоит в определении закона распределения частиц получаемой дерти и его параметров, а также в подсчете коэффициента соответствия ξ . При этом какие-либо дополнительные экспериментальные исследования не привлекаются.

4.2 Сравнение энергетических показателей измельчителей кормового зерна на основе рациональной формулы В. П. Горячкина

Эта трехчленная формула первоначально была предложена В. П. Горячкиным для плугов и в простейшем виде такова [41-43]:

$$P = fG + kab + \varepsilon abv^2. \quad (4.11)$$

Горизонтальную составляющую P сопротивления плуга при вспашке В. П. Горячкин назвал тяговым сопротивлением, G – вес плуга; коэффициент пропорциональности f назван коэффициентом трения плуга о почву (значение коэффициента f зависит от типа почв, их агрофона, конструкции плугов и находится в пределах 0,4... 1,0). Силу fG определяют протаскиванием плуга в открытой борозде; a и b – глубина и ширина пласта.

Второе слагаемое- kab - вызвано сопротивлением подрезанию, разрушению и укладыванию пласта в борозду. Действие этой составляющей общего сопротивления считается полезным. Коэффициент k оценивает удельное сопротивление почвы.

Третье слагаемое в формуле (1) - εabv^2 - скоростное сопротивление, зависящее от кинетической энергии, сообщаемой почвенному пласту (v – скорость пахотного агрегата). Эта составляющая не оказывает существенного влияния на полезное деформирование почвы. Коэффициент ε скоростного сопротивления зависит от типа почв, геометрических форм рабочих поверхностей плужных корпусов.

Всякого рода процесс, связанный с деформацией среды, может быть расчленен, по В. П. Горячкину, на три части: а) мертвое сопротивление; б) деформация среды; с) перемещение частиц.

Соответственно этому В. П. Горячкин дал расширенную трактовку своей формулы:

а) первый член формулы характеризует постоянное сопротивление, независимое от скорости, например, для плуга трение от веса о дно борозды, трение от прижима резца к металлу, трение стенок парохода и аэроплана о поверхность воды и воздуха, трение колес и сопротивление дороги для автомобиля и т.п.;

б) второй член выражает сопротивление деформации среды: почвы, металла, воды и воздуха; во всех случаях это сопротивление пропорционально квадрату линейного размера, например, площади поперечного сечения пласта или стружки, лобовой поверхности автомобиля, аэроплана или парохода;

в) третий член выражает изменение живой силы частиц среды, т.е. почвы, воды и воздуха.

В применении к различным случаям каждый из трех вышеуказанных случаев может иметь преобладающее значение по сравнению с другими; например, для судов, аэропланов, резцов, вентиляторов и т. п., по-видимому, последний член по своему значению преобладает над другими. В применении же к плугам, как оказывается, наибольшее значение имеет второй член, затем первый. А третий – сравнительно невелик.

В качестве теоретической основы для изучения технологического процесса и определения энергетических показателей измельчителей кормов А. П. Макаров в 1964 году применил именно рациональную формулу В. П. Горячкина [91].

Для анализа измельчения фуражного зерна в молотковых дробилках А.П. Макаров использовал формулу общего вида:

$$A = A_{xx} + A_{np} + A_v, \quad (4.12)$$

где A - общая работа машины;

A_{xx} – энергия, затрачиваемая на холостой ход рабочих органов, т.е. энергия, затрачиваемая на преодоление вредных сопротивлений;

A_{np} - энергия, затрачиваемая на процесс измельчения материала;

A_v - энергия, затрачиваемая на отбрасывание материала со скоростью v .

Первый член A_{xx} выражает работу на преодоление вредных сопротивлений (холостой ход) рабочих органов. Вредные сопротивления вызываются в основном двумя причинами: трением в подшипниках и сопротивлением воздуха. При наличии передаточных механизмов (ременная и цепная передачи, карданный вал, гибкая муфта и т.п.) определяются также их вредные сопротивления с учетом передаваемой мощности.

Второй член формулы (4.12) A_{np} выражает энергию, затрачиваемую на измельчение фуражного зерна.

Третий член формулы (4.12) A_v выражает кинетическую энергию, затрачиваемую на ускорение материала в процессе измельчения, и определяется расчетным путем.

По оценке академика В. И. Сыроватки, в результате исследований А. П. Макаровым предложена новая теоретическая основа с использованием теории разрушения материала клином и рациональной формулы В.П.Горячкина для расчета основных параметров кормодробилок [167].

Макаров А. П. изыскал величины для расчета трех энергосоставляющих рассматриваемого процесса. Результаты анализа исследований показали, что можно снизить до минимума первую и третью составляющие рациональной формулы В.П.Горячкина, а всю энергию расходовать на вторую составляющую-полезную работу измельчения. Это позволяет снизить удельные затраты энергии и металлоемкость в 1,5-2,0 раза [167].

Расчет удельных затрат энергии до изготовления машины стало правилом для конструкторов, потому что экономит материальные ресурсы и время на создание новой техники.

Нами предлагается иная трактовка использования формулы Горячкина для перечня сил, действующих на рабочие органы при измельчении кормового зерна, а именно:

$$P = F_a + kabv + \varepsilon abv^2, \quad (4.13)$$

где $F_a = \mu v^2$ – равнодействующая сил аэродинамического характера, действующих при движении рабочих органов со скоростью v (μ – коэффициент пропорциональности);

a, b – размеры загрузки измельчителя (для молотковой дробилки - это размеры воздушно-продуктового слоя, для вибрационного измельчителя это средние размеры поперечного сечения камеры измельчения);

k – коэффициент, характеризующий силовую составляющую, направленную непосредственно на измельчение зерна (зависит от технологических свойств зерна и конструктивных особенностей измельчителя).

Первый член в виде аэродинамического, а не сухого трения объясняется тем, что технологическая среда в камере измельчения представляет собой поток дисперсной смеси, включающей несущую среду (воздух), и распределенных в нее частиц зерновой дерти. По крайней мере это верно для молотковых дробилок и вибрационных измельчителей. Рабочие органы последних генерируют

осциллирующий воздушный поток, который в некоторой степени также расжижает совокупность твердых частиц. Известно, что поток дисперсной смеси обладает аэродинамическими свойствами, хотя присутствие твердых частиц, в зависимости от их концентрации, вносит некоторые поправки в эти свойства [81,90,97]. Рабочие органы и создают эти дисперсные потоки, и вынуждены с ними взаимодействовать, затрачивая энергию.

Второй член формулы (4.13) отражает силы, возникающие непосредственно при измельчении фуражного зерна.

Присутствие третьего члена здесь обусловлено тем, что в полость измельчения зерно поступает практически с нулевой скоростью, а затем, например, в молотковой дробилке, разгоняется до скорости циркуляции воздушно-продуктового слоя.

Если умножить левую и правую части формулы (4.13) на скорость рабочего органа v , то получим энергетический баланс измельчающей машины в виде мощностей

$$N = (\mu v^2)v + kab v^2 + \varepsilon abv,^3 \quad (4.14)$$

где N – мощность, развиваемая приводом измельчителя (за исключением мощности на преодоление потерь в подшипниках и передаточных устройствах).

Из выражения (4.134) следует, что первый и третий члены обусловлены сопутствующими эффектами процесса измельчения, и именно здесь кроются резервы энергосбережения при измельчении зерна.

После приведения подобных членов предыдущую формулу можно представить и в таком виде

$$N = (\mu + \varepsilon ab)v^3 + kabv^2, \quad (4.15)$$

Данное выражение в полной мере справедливо для молотковых дробилок и вибрационных измельчителей. Квадратичность второго члена для молотковых дробилок доказал сам В. П. Горячкин в своей работе «Графическое изображение уравнений удара» [41, с. 495].

Для вибрационных рабочих органов квадратичность второго члена этой формулы доказывается следующим. Дело в том, что вибрационный рабочий орган

отдает энергию рабочей среде также импульсами (квантами). При рабочем ходе щеки, т. е. при сжатии рабочей среды, кинетическая энергия щеки переходит в потенциальную энергию сжатого слоя. В процессе холостого хода щеки, т. е. при расширении слоя, часть энергии сжатого слоя рекуперировывает, возвращается к источнику энергии, а часть диссипирует, рассеивается, что обусловлено образованием трещин и новых поверхностей. Последнее и определяет разрушение рабочей среды.

В свете сказанного, именно начальная кинетическая энергия (а она, как известно, пропорциональна квадрату скорости) щеки определяет процесс измельчения зерна. Таким образом, налицо аналогия с действием молотка на зерновку в молотковых дробилках. Однако есть и отличия. Во-первых, в вибрационных измельчителях напряжения в зерновке создаются, в основном, за счет сил сжатия, в молотковой дробилке они формируются за счет инерционности самой зерновки.

Во-вторых, при вибрационном воздействии возможна рекуперация части потенциальной энергии зернового слоя, а в молотковых дробилках такая рекуперация отсутствует. В этом видится положительное свойство вибрационных измельчителей.

Таким образом, для вибрационных измельчителей имеем право записать

$$N = (\mu + \varepsilon ab)(A\omega)^3 + kab(A\omega)^2, \quad (4.16)$$

Сравним далее процессы измельчения в молотковом и вибрационных измельчителях по первому члену выражения (4.16). Пусть энергозатраты на собственно измельчение будут одинаковы в обоих типах измельчителей.. Определимся с порядком скоростей рабочих органов. У молотковых дробилок скорости молотков v_m составляют не менее 70 м/с. Для вибрационных измельчителей амплитуды колебаний A не превышают 0,005 м, частоты ω - 300 м/с. Максимальные виброскорости v_v , поэтому, не превосходят величины $A\omega=0.005*300=1,5$ м/с. Таким образом, скорости рабочих органов молотковых дробилок примерно в

$$v_m/v_v=70/1,5 \approx 47$$

раз превышают скорости вибрационных рабочих органов.

Еще более разительно соотношение кубов этих скоростей, фигурирующих в первом члене обсуждаемой формулы (1.13)

$$v_m^3 / v_6^3 = 70^3 / 1,53 \approx 102400.$$

На основании этих цифровых данных и анализа формулы В. П. Горячкина для зернодробилок (4.16) делаем вывод, что по сравнению с молотковыми дробилками в вибрационных измельчителях ничтожно малы аэродинамические и инерционные составляющие энергозатрат, обусловленные воздействием на обрабатываемый зерновой слой. Следовательно, в целом, технологический процесс измельчения кормового зерна в вибрационных машинах должен характеризоваться пониженными энергозатратами.

Разделим, далее, правую и левую части выражения (4.16) на $Q\lambda$, где Q – производительность измельчающей машины, λ – степень измельчения. Тогда в левой части будем иметь показатель энергоемкости \mathcal{E} процесса с учетом достигнутой степени измельчения λ . В целом же получили рабочую формулу для расчета показателя энергоемкости процесса измельчения

$$\mathcal{E} = \frac{1}{Q\lambda} [(\mu + \varepsilon ab)v^3 + kabv^2]. \quad (4.17)$$

Конкретно для вибрационного измельчителя формула примет вид

$$\mathcal{E} = \frac{1}{Q\lambda} [(\mu + \varepsilon ab)(A\omega)^3 + kab(A\omega)^2].$$

С учетом малости члена $(\mu + \varepsilon ab)(A\omega)^3$ последнюю формулу можно упростить

$$\mathcal{E} = \frac{kab}{Q\lambda} A^2 \omega^2. \quad (4.18)$$

В этой формуле только один подгоночный коэффициент, в этом ее положительное свойство. Но она должна быть проверена экспериментально.

4.3 Оценка эффективности однократного механического воздействия по слою зерна при его измельчении

Практически во всех работах, посвященных измельчению кормового зерна, рассматривается динамическое взаимодействие с рабочим органом всего лишь

одной зерновки (частицы). Между тем и в молотковых, и в ударно – центробежных дробилках рабочие органы соударяются со слоем зерновок. Такая картина наблюдается также в вибрационных измельчителях. При этом динамическое воздействие испытывают не только зерновки, непосредственно контактирующие с рабочим органом, но и зерновки, получающие ударные импульсы от соседних зерновок. Поэтому правильнее рассматривать воздействие рабочего органа не на одну, а совокупность (слой) частиц.

Если слой зерна поместить в контейнер и подвергнуть нагружению, то можно получить диаграмму, примерный вид которой приведен на Рисунке 4.2 [61]. Как видно из этого рисунка, процесс деформирования зерна имеет три различных по своей природе фазы. В первой фазе преобладают упругие деформации, развитие которых приближенно подчиняется закону Гука. Во второй фазе имеют место в основном пластические деформации, при которых в теле зерновок происходит развитие трещин. Эти две фазы в точности предсказываются предложенной нами реологической моделью зерновки, изображенной на Рисунке 2.7.

Третья фаза характерна для условий помещения зерновки или слоя зерновок в контейнер, при этом происходит прессование частиц разрушившихся зерновок. Поэтому в третьей фазе наблюдается значительный рост усилий при небольших линейных перемещениях прессуемого слоя. Третья фаза наблюдается только в специально поставленных опытах и отсутствует в работе измельчающих машин.

Такое развитие деформаций слоя характерно для статических и динамических испытаний зернового слоя, однако встает проблема соотнесения их к статическим или динамическим нагружениям.

Если снова обратиться к кривой нагружения зернового слоя (см. Рисунок 4.2), то можно выделить две характерные точки A и B . Точка A определяет собой предел текучести σ_T слоя, а точка B – предел прочности σ_{II} (в работах по измельчению зерна последний термин чаще называют разрушающим напряжением). При динамическом нагружении слоя текущее напряжение σ в слое складывается из двух составляющих

$$\sigma = \sigma_u + \sigma_y, \quad (4.19)$$

где σ_u – напряжение от инерционного сопротивления слоя;

σ_y – напряжение от наличия упора, под которым может подразумеваться твердый рабочий орган или другие слои измельчаемого материала.

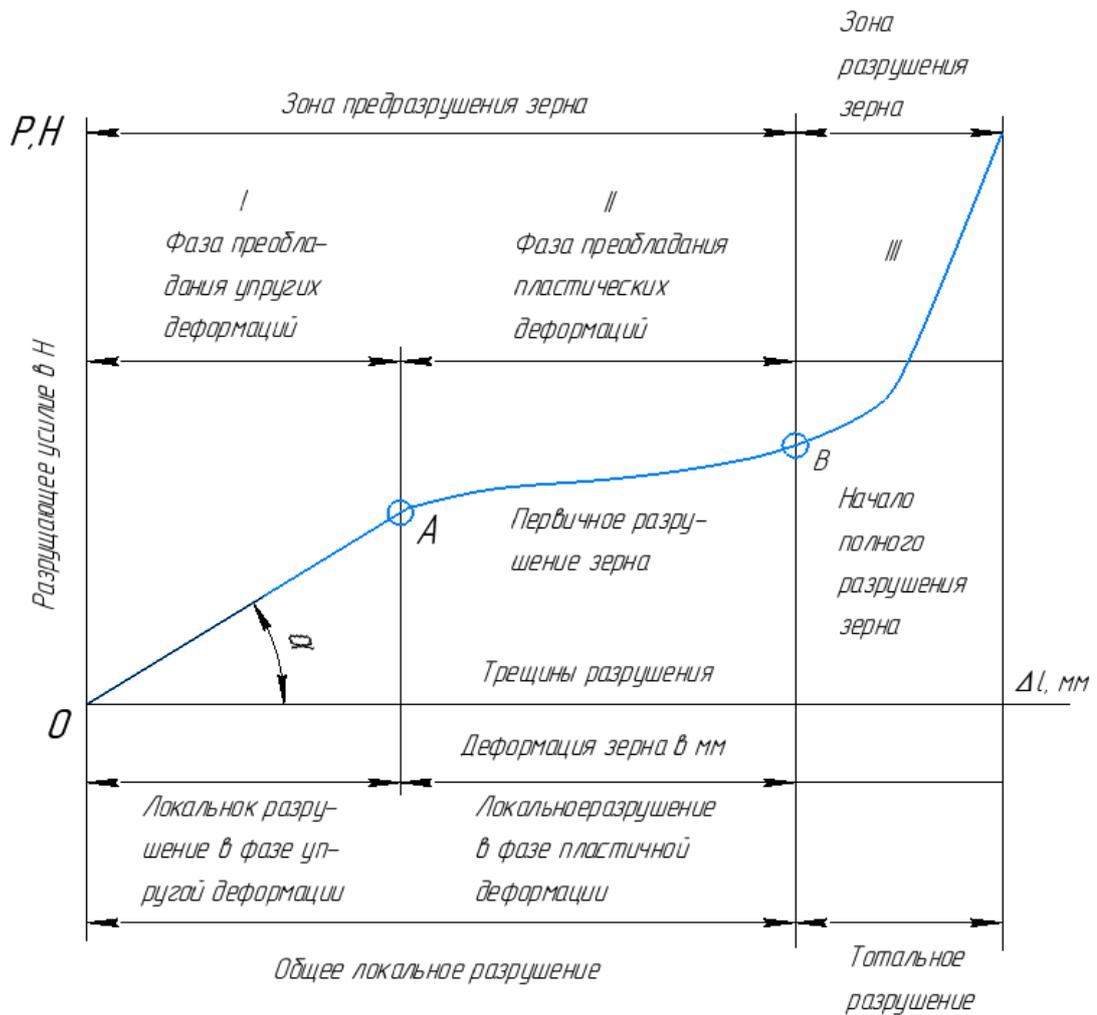


Рисунок 4.2 – Характеристическая кривая процесса разрушения зерна при деформации сжатия (по В. Л. Злочевскому)

Напряжение от инерционного сопротивления слоя можно найти по известной формуле

$$\sigma_u = \rho v^2, \quad (4.20)$$

где ρ – плотность слоя;

v – скорость нагружения слоя.

После этих предварительных положений сформулируем условия отнесения нагружения слоя к статическому или динамическому типу:

$$\rho v^2 < \sigma_T - \text{статическое нагружение}; \quad (4.21)$$

$$\sigma_{II} > \rho v^2 > \sigma_T - \text{динамическое нагружение}; \quad (4.22)$$

$$\rho v^2 > \sigma_{II} - \text{супердинамическое нагружение}. \quad (4.23)$$

Случаи равенства отдельных показателей должны рассматриваться отдельно и по ним выносятся вердикт лицом, принимающим решение.

Мы постулировали применение выше приведенных условий для слоя зерна, хотя они могут с успехом применяться и для отдельных зерновок.

Пользуясь введенными критериями, определимся, к какому типу относится вибрационное нагружение отдельных зерновок в реальных измельчителях. Для этого воспользуемся характеристиками зерна ячменя [97]: $\rho = 1300 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_T = 9-10 \text{ МПа}$; $\sigma_{II} = 12-14 \text{ МПа}$. Максимальные скорости нагружения $v = A\omega$ в вибрационных измельчителях не превышают, как мы подсчитывали ранее, 1.5 м/с . Поэтому имеем: $\rho v^2 = 1300 * 1.5^2 = 2,93 \text{ кПа}$. Это на три порядка меньше, чем предел текучести. Следовательно, выполняется условие (4.21), и мы должны отнести нагружение зерна в вибрационных измельчителях к статическому типу, хотя сама измельчающая машина работает в динамическом режиме.

Для сравнения, подсчитаем этот же показатель для молотковых дробилок, у которых скорости молотков v достигают $80-100 \text{ м/с}$ [97]. Для скорости $v = 90 \text{ м/с}$ имеем: $\rho v^2 = 1300 * 90^2 = 10,53 \text{ МПа}$. Тут выполняется условие (4.21), следовательно нагружение зерна в молотковых дробилках является динамическим.

Применение условий (4.21) - (4.23) для слоя попробуем подтвердить экспериментально. Кроме того, задача: какая должна быть толщина слоя при вибрационном измельчении – не поддается теоретическому решению. Остается экспериментальный путь. Поэтому эту экспериментальную задачу мы должны решать вкупе с выяснением роли скоростного и сжимающего факторов в общей картине разрушения слоя зерновок.

Простейшим представлением измельчения кормового зерна в слое является схема, приведенная на Рисунке 4.3.

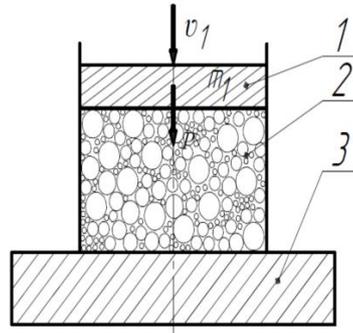


Рисунок 4.3 - Стесненный слой, подвергнутый воздействию ударной силы P : 1 – штемпель (ударник); 2 – слой кормового зерна; 3 – массивное основание

Эта схема обращенного удара близка по картине деформационного состояния слоя зерна в работе ударных измельчительных машин и может дать некоторые ответы на взаимодействие рабочих органов и слоя зерна в других типах дробилок. Что же касается вибрационных измельчителей, то ударник 1 имитирует действие активной щеки, основание 3-упор в виде пассивной щеки.

Если ударник 1 (см. Рисунок 4.2) начинает деформировать слой, имея скорость v_1 , то развиваемую силу воздействия на слой зерна можно оценить по формуле

$$P = \frac{m_1 v_1}{\Delta t},$$

где m_1 , v_1 – масса и скорость ударника;

Δt – время удара.

Напряженно-деформированное состояние отдельных зерновок, находящихся в слое, характеризуется, по аналогии с зернистыми композитами [36], напряжениями σ^* и деформациями ε^* , определенными осреднением по объему соответствующих величин

$$\sigma^* = \frac{1}{V} \int_V \sigma(x, y, z) dV \quad (4.24)$$

$$\varepsilon^* = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon(x, y, z) dV \quad (4.25)$$

где V - объем зерновки;

x, y, z - декартовы координаты.

Картина напряженно – деформированного состояния отдельных зерновок, находящихся в слое, может быть различной и зависит, в первую очередь, от условий их соприкосновения с «твердыми» поверхностями ударника и упора или «мягкими» поверхностями соседних зерновок.

Чтобы зерновка в слое разрушилась, необходимо, чтобы было выполнено условие

$$\sigma^* > [\sigma_{\Pi}]; \quad (4.26)$$

где $[\sigma_{\Pi}]$ - разрушающее значение напряжения.

Поле напряжений и поле деформаций в слое очень трудно рассчитать. Имеющиеся теоретические исследования по данному вопросу касаются динамического поведения всего слоя как макрообъема, и не дают ответа о динамических процессах, происходящих внутри слоя [36,77]. Поэтому остается экспериментальный путь.

Для проведения экспериментальных исследований была изготовлена специальная ударная установка (Рисунок 4.4). Направляющая ударника выполнена в виде трубы 4 с прорезанной в ней продольной щелью, в которой перемещается метка, нанесенная на ударник. Величину отскока h_2 ударника фиксировали как раз по перемещению метки при помощи скоростной киносъемки.

При ударе ударником массой m_1 , опускаемым с высоты h_1 с нулевой начальной скоростью, по слою кормового зерна массой m_2 имеем следующие закономерности:

- 1) запас потенциальной энергии Π_1 ударника в момент его опускания

$$\Pi_1 = m_1 g h_1, \quad (4.27)$$

где g - ускорение свободного падения;

h_1 - расстояние от нижнего обреза ударника до верхнего уровня зернового слоя (это же расстояние проходит центр тяжести ударника от момента его опускания и до касания кормового слоя);

- 2) скорость ударника в момент касания зернового слоя

$$v_1 = \sqrt{2gh_1}; \quad (4.28)$$

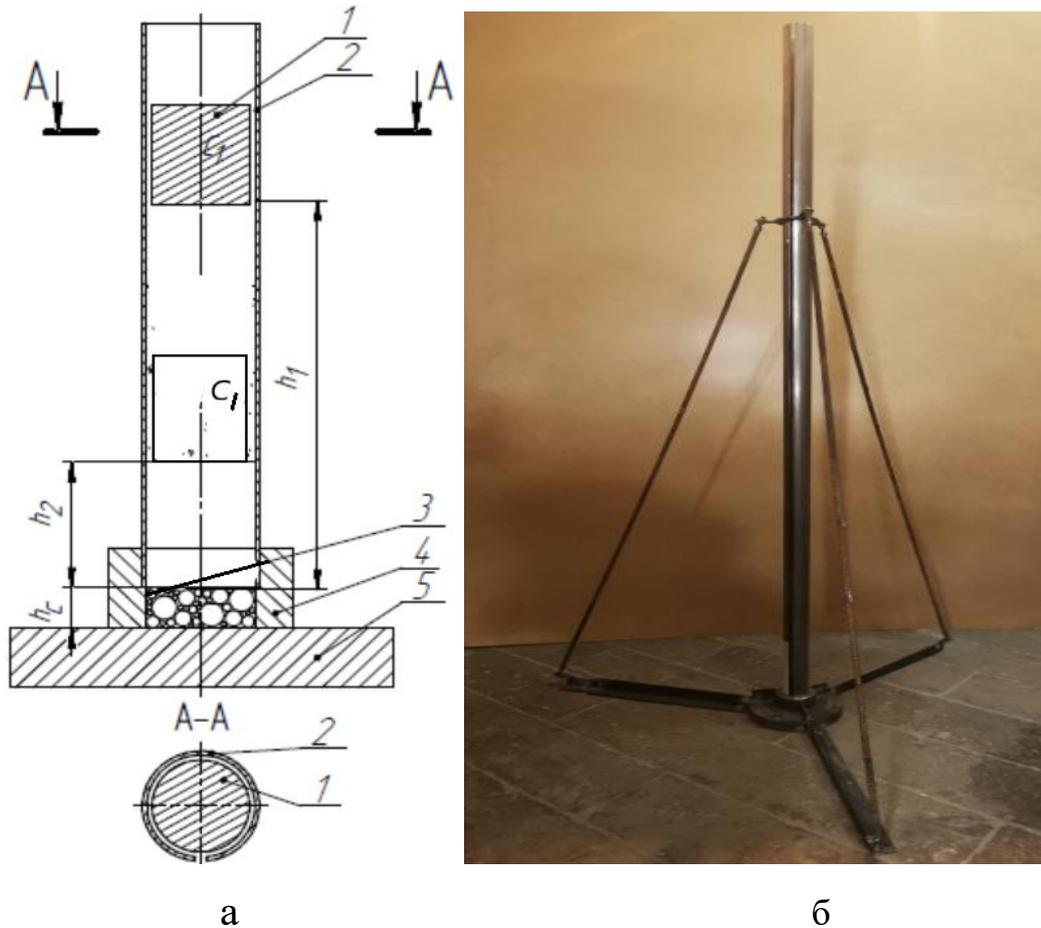


Рисунок 4.4 - Схема (а) и фото (б) установки для ударного разрушения слоя кормового зерна: 1 – ударник, 2 – направляющая ударника, 3 – слой кормового материала, 4 – обойма, 5 – массивное основание

3) скорость ударника в момент обратного движения (отскока, возникающего за счет упругих свойств слоя)

$$v_2 = \sqrt{2gh_2}; \quad (4.29)$$

где h_2 - высота подскока ударника при обратном движении;

4) запас потенциальной энергии Π_2 ударника в верхней точке отскока

$$\Pi_2 = m_1 g h_2; \quad (4.30)$$

5) потерянная в слое энергия $\Delta\Pi$

$$\Delta\Pi = \Pi_1 - \Pi_2 = m_1 g (h_1 - h_2); \quad (4.31)$$

6) эффективность η однократного удара

$$\eta = \frac{\Delta\Pi}{\Pi_1} = \frac{\Pi_1 - \Pi_2}{\Pi_1} = 1 - \frac{\Pi_2}{\Pi_1} = 1 - \frac{h_2}{h_1}. \quad (4.32)$$

Чтобы наглядно представить процессы, происходящие в слое при ударе по нему, вернемся к реологической модели единичной зерновки (см. Рисунок 2.7). Применим эту модель для всего слоя. Моделирование одной и той же моделью единичной зерновки и слоя таких зерновок отражает автомодельность обсуждаемых свойств.

В слое дополнительную роль может играть воздух, защемленный в порах. Однако его сжатие и перекачки внутри слоя моделируются прежними элементами E_2 и μ .

В блоке I представлен набор элементов типа сухого трения h_{0i} (т.н. обобщенное тело Сен-Венана), каждый из которых последовательно соединен со своим упругим элементом E_{1i} . Тело Сен-Венана, как известно, моделирует пластические свойства материала. Оно неподатливо при нагрузке ниже предела текучести, после его превышения неограниченно деформируется. Обобщенное тело Сен-Венана моделирует, таким образом, разрушение составляющих слой отдельных зерновок.

С учетом данных пояснений, очевидно, что критерий эффективности (4.28) действительно может служить мерой разрушения (повреждаемости) частиц в слое. Чем больше η , тем эффективнее протекает процесс измельчения зерновок в слое.

В качестве факторов процесса измельчения кормового зерна однократным ударом по слою предлагаются следующие:

- 1) число монослоев n в слое (монослой – это слой толщиной в одну зерновку);
- 2) скорость удара v_1 , изменяемая в эксперименте величиной h_1 , (см. формулу(4.28));
- 3) энергия одиночного удара, изменяемая в эксперименте посредством m_1 (см. выражение (4.27)).

Реально существует функция f , имеющая вид

$$\eta = f(n, v_1, \Pi_1).$$

Параллельно влияние этих же факторов на процесс измельчения оценивали относительным количеством массы разрушенных зерен ξ

$$\xi = (m_2^*/m_2)100\%, \quad (4.33)$$

где m_2^* - масса поврежденных зерен (по массе) в слое после удара.

Величину ξ определяли при помощи ситового анализа.

С учетом применения планирования эксперимента проведем переобозначение величин: $\eta \sim y_1$; $\xi = y_2$; $n \sim x_1$; $v_1 \sim x_2$; $\Pi_1 \sim x_3$.

Тогда, например, для показателя y_1

$$y_1 = f(x_1, x_2, x_3).$$

Для оценки этой функции экспериментально ищем ее в виде полинома 2 – ой степени

$$y_1(x_i, b_i) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^n b_{ij} x_i x_j, \quad (4.34)$$

где y_1 - критерий оптимальности;

x_1, x_2, \dots, x_n - переменные (факторы) процесса в количестве n ;

b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} - коэффициенты, вычисленные на основе обработки экспериментальных данных.

Уровни и кодированные значения факторов приведены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Уровни и кодированные значения факторов

Факторы	$A(x_1) \sim n$ - число монослоев	$B(x_2) \sim v_1$ - скорость удара, м/с	$C(x_3) \sim \Pi_1$ – энергия удара, Дж
Нижний уровень ($X_i = -1$)	1	4,4	29,0
Основной уровень ($X_i = 0$)	3	5,2	58,5
Верхний уровень ($X_i = +1$)	5	6,0	88,0

По значениям факторов x_2 и x_3 условия опыта ближе к вибрационным измельчителям, чем к молотковым дробилкам.

Для оценки данных коэффициентов по результатам экспериментов использовали план Бокса-Бенкена второго порядка для трех факторов.

Материалом для исследования служил кормовой горох влажностью 12,9%, откалиброванный в размер $7 < d < 8$ мм. Горох был выбран потому, что возможно четкое укладывание зерновок в 1-3 монослоя.

План эксперимента, сгенерированный программой *Mathcad 15*, показан в Таблице 4.2. В этой же таблице показаны выходы модели y_1 и y_2 .

Таблица 4.2-Матрица планирования Бокса-Бенкена для 3-х факторов (А, В, С)

boxbehnken(3) =

	0	1	2	3	4	y_1	y_2
0	«Run»	«Block»	«A»(x_1)	«B»(x_2)	«C»(x_3)		
1	1	1	-1	-1	0	0,98	97,4
2	2	1	1	-1	0	0,96	60,2
3	3	1	-1	1	0	0,98	92,4
4	4	1	1	1	0	0,96	60,9
5	5	1	-1	0	-1	0,98	73,2
6	6	1	1	0	-1	0,96	56,9
7	7	1	-1	0	1	0,99	94,4
8	8	1	1	0	1	0,96	57,3
9	9	1	0	-1	-1	0,97	61,8
10	10	1	0	1	-1	0,98	59,5
11	11	1	0	-1	1	0,96	62,8
12	12	1	0	1	1	0,98	73,6
13	13	1	0	0	0	0,97	63,5
14	14	1	0	0	0	0,97	66,6
15	15	1	0	0	0	0,97	60,4

Показатель эффективности $y_1 \sim \eta$ оказался очень высоким – 0.96...0.99, что согласуется с теоретическими расчетами, приведенными в статье [3]. Полученные показатели y_1 позволяют утверждать, что практически вся энергия удара поглощается слоем зерна при его деформировании и разрушении. Часть энергии уходит на образование внутренних трещин в зернах гороха, которые не приводят к их разрушению.

В то же время показатель эффективности y_1 оказался совершенно неинформативным в плане построения уравнения регрессии. Для этих целей использовали второй показатель $y_2 \sim \xi$ – показатель относительного количества массы разрушенных зерновок.

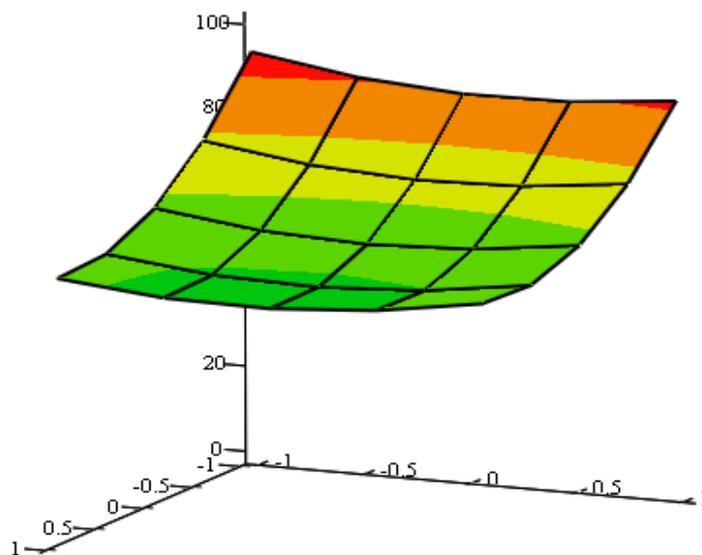
Использование встроенной функции *polyfitc* программы *Mathcad 15* позволило рассчитать коэффициенты регрессии и получить адекватное уравнение (коэффициент детерминации $R^2=0,92$). В кодированных значениях переменных оно имеет вид

$$y_2 = 63,5 - 15,3X_1 + 4,6X_3 + 1,4X_1X_2 - 5,2X_1X_3 + 3,3X_2X_3 + 10,1X_1^2 + 4,1X_2^2 - 3,2X_3^2. \quad (4.35)$$

Наибольшее влияние на процесс разрушения имеет фактор X_1 – число элементарных слоев в зерновом слое. Об этом говорят большие значения коэффициентов при линейном и квадратичном членах этого фактора.

Визуализация этого уравнения приведена на Рисунке 4.5, построенном при помощи программы *Mathcad*. Эта программа по умолчанию строит трехмерные графики таким образом, что по вертикальной оси всегда представлен выход модели. По оси, идущей вправо от начала координат, откладывается фактор с малым индексом, влево от начала координат – фактор с большим индексом.

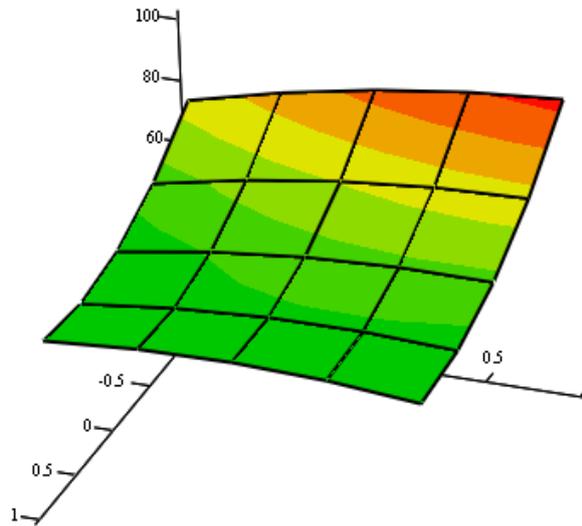
$$y_2(X_1, X_2) := 63.5 - 15.3 \cdot X_1 + 1.4 \cdot X_1 \cdot X_2 + 10.1 \cdot X_1^2 + 4.1 \cdot X_2^2$$



y2

а

$$y_2(X_1, X_3) := 63.5 - 15.3 \cdot X_1 + 4.6 \cdot X_3 - 5.2 \cdot X_1 \cdot X_3 + 10.1 \cdot X_1^2 - 3.2 \cdot X_3^2$$

y₂

б

Рисунок 4.5 - Поверхности отклика: а) при $X_3=0=const$; б) при $X_2=0=const$

Видно, что зависимости носят нелинейный характер по всем трем факторам.

Численная оптимизация изучаемого процесса по максимуму разрушенных зерновок в слое, проведенная при помощи функции *minimize* программы *Mathcad 15*, дает граничные значения факторов (Рисунок 4.6).

$$y_2(X_1, X_2, X_3) := 63.5 - 15.3 \cdot X_1 + 4.6 \cdot X_3 + 1.4 \cdot X_1 \cdot X_2 - 5.2 \cdot X_1 \cdot X_3 + 3.3 \cdot X_2 \cdot X_3 + 10.1 \cdot X_1^2 + 4.1 \cdot X_2^2 - 3.2 \cdot X_3^2$$

$$X_1 := 1 \quad X_2 := 0 \quad X_3 := -1$$

Given

$$-1 \leq X_1 \leq 1 \quad -1 \leq X_2 \leq 1 \quad -1 \leq X_3 \leq 1$$

$$\text{ext} := \text{maximize}(y_2, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$y_2(-1, -1, 1) = 97.7$$

Рисунок 4.6 - Программа и решение задачи оптимизации процесса измельчения зерна в слое однократным ударом

Процесс измельчения зерна ударом по данной схеме нужно вести так, чтобы толщина слоя составляла один размер зерна ($X1=-1$), скорость удара была минимальной ($X2=-1$), а энергия удара, наоборот, максимальной ($X3=1$). Количество разрушенных зерновок при этом составляет 97,7%. И это несмотря на то, что максимальное напряжение в слое от его инерции не превысило, как показывают расчеты, 36 кПа. Очевидно, что это ниже предела текучести гороха, т. е. можно считать нагружение слоя статическим.

Из изложенного следует, что:

- при ударе по стесненному слою зернового материала эффективность использования подведенной энергии составляет величину 0,96...0,99. Это существенно выше, чем при ударе влет в молотковых дробилках, где этот показатель составляет 0,84...0,91 [97].

- Для достижения наибольшего эффекта разрушения зерна необходимо, чтобы толщина слоя составляла один размер зерна, скорость удара была по возможности минимальной, а энергия удара, наоборот, - максимальной.

Такие условия могут быть обеспечены в вибрационном измельчителе.

4.4 Моделирование процесса вибрационного измельчения кормового зерна на основе теории размерности и подобия

Для правильной постановки и обработки экспериментов, результаты которых позволяли бы установить общие закономерности и могли бы быть приложенными к случаям, в которых эксперимент не производился непосредственно, необходимо вникать в сущность изучаемого вопроса, давать общий качественный анализ, а величины, характеризующие процесс, представлять в безразмерной форме. В постановке опытов и вообще для практики очень важно правильно выбрать безразмерные параметры, число которых должно быть минимальным. Возможность такого предварительного качественно-теоретического анализа и выбора системы определяющих безразмерных параметров даёт теория размерности и подобия. Она может быть приложена к

рассмотрению весьма сложных явлений и значительно облегчает обработку экспериментов [2,81,90,153,155].

Из предыдущих наших исследований следует, что энергоемкость процесса измельчения \mathcal{E} как критерия оптимальности в самом общем виде может быть записана в виде следующего функционального уравнения

$$\mathcal{E} = \varphi_1(A, \omega, \rho, Q, \sigma_{\pi}, I, b, d, l), \quad (4.36)$$

где A – амплитуда колебаний активной щеки по нижнему ее обрезу;

ω – угловая частота колебаний;

ρ – плотность материала зерновки;

Q – производительность измельчителя;

σ_{π} – предел прочности материала зерновки.

I – момент инерции пассивной щеки относительно оси качания;

b, l – размеры выпускной щели измельчителя в статическом положении

(Рисунок 4.7);

d – размер зерновки.

Зависимости, которая связала бы воедино все эти величины, получено не было, что объясняется сложностью рассматриваемого процесса.

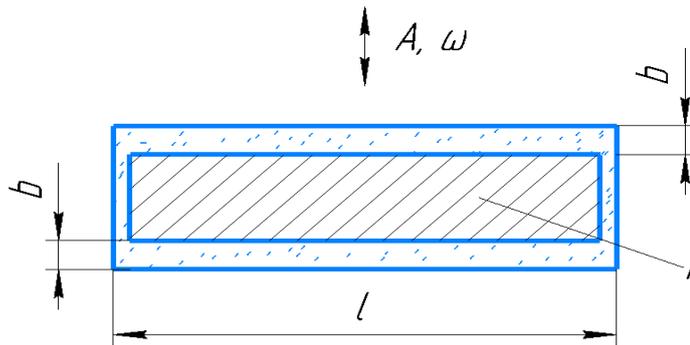


Рисунок 4.7- Сечение по нижнему обрезу рабочих органов

Аналогично, для ограничений имеем

$$M = \varphi_2(A, \omega, \rho, Q, \sigma_{\pi}, I, b, d, l); \quad (4.37)$$

$$v = \varphi_3(A, \omega, \rho, Q, \sigma_{\pi}, I, b, d, l); \quad (4.38)$$

$$\zeta = \varphi_2(A, \omega, \rho, Q, \sigma_{\text{п}}, I, b, d, l), \quad (4.39)$$

где M - величин модуля размола, мм;

ν - коэффициент вариации размеров частиц, %,

ζ - содержания целых зерен, %.

Перечисленные величины M , ν и ζ характеризуют качественную сторону измельчения. Их применение обусловлено различными регламентирующими документами [44,49,50,161]. В дополнение к этому рассчитывался предложенный нами коэффициент ξ соответствия данного измельчителя или его режима настройки зоотехническим требованиям, определяемый выражением (4.9).

В свете сказанного, для получения требуемых зависимостей остается экспериментальный путь. Чтобы облегчить здесь задачу, воспользуемся методами теории размерности [2,99], а именно π - теоремой, которая гласит, что функциональная зависимость может быть представлена в безразмерном виде, т. е. в виде критериев подобия. Если выбрать для данного технологического процесса три основные единицы измерения, то число факторов можно уменьшить с 9 до 6 критериев подобия [2].

Степени размерности для каждого фактора и критерия оптимальности приведены в таблице 3.2.

Таблица 4.3 – Степени размерностей для факторов и критерия оптимальности

№ п/п	Факторы и критерий оптимальности	Степени размерностей		
		$[L]$	$[M]$	$[T]$
1	$\xi, \text{ Дж/кг}$	$\lambda_1=2$	$\mu_1=0$	$\tau_1=-2$
2	$A, \text{ м}$	$\lambda_1=1$	$\mu_1=0$	$\tau_1=0$
3	$\omega, \text{ с}^{-1}$	$\lambda_1=0$	$\mu_1=0$	$\tau_1=-1$
4	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$\lambda_1=-3$	$\mu_1=1$	$\tau_1=0$
5	$Q, \text{ кг/с}$	$\lambda_1=0$	$\mu_1=1$	$\tau_1=-1$
6	$\sigma_{\text{п}}, \text{ Па}$	$\lambda_1=-1$	$\mu_1=1$	$\tau_1=-2$
7	$I, \text{ кг м}^2$	$\lambda_1=2$	$\mu_1=1$	$\tau_1=0$
8	$b, \text{ м}$	$\lambda_1=1$	$\mu_1=0$	$\tau_1=0$
9	$d, \text{ м}$	$\lambda_1=1$	$\mu_1=0$	$\tau_1=0$
10	$l, \text{ м}$	$\lambda_1=1$	$\mu_1=0$	$\tau_1=0$

Выберем в качестве основных следующие единицы: A , ω и ρ . Для проверки правомерности такого выбора вычисляем определитель

$$\Delta = \begin{vmatrix} \lambda_2 & \mu_2 & \tau_2 \\ \lambda_3 & \mu_3 & \tau_3 \\ \lambda_4 & \mu_4 & \tau_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 3 & 1 & 0 \end{vmatrix} = -3.$$

В теории размерности доказывается [2], что условием выбора некоторых величин в качестве основных является отличающееся от нуля значение определителя, составленного из размерностей этих величин. Поскольку у нас $\Delta \neq 0$, то приходим к выводу, что основные единицы выбраны правильно.

Следовательно, предыдущие уравнения можно записать в критериальном виде. Например, уравнение (4.36) обретет следующую форму

$$\frac{\varepsilon}{A^{\alpha_1} \omega^{\beta_1} \rho^{\gamma_1}} = \Phi_1 \left(1, 1, 1, \frac{Q}{A^{\alpha_5} \omega^{\beta_5} \rho^{\gamma_5}}, \frac{\sigma}{A^{\alpha_6} \omega^{\beta_6} \rho^{\gamma_6}}, \frac{I}{A^{\alpha_7} \omega^{\beta_7} \rho^{\gamma_7}}, \frac{b}{A^{\alpha_8} \omega^{\beta_8} \rho^{\gamma_8}}, \frac{d}{A^{\alpha_9} \omega^{\beta_9} \rho^{\gamma_9}}, \frac{l}{A^{\alpha_{10}} \omega^{\beta_{10}} \rho^{\gamma_{10}}} \right).$$

Значения коэффициентов $A^{\alpha_1} \omega^{\beta_1} \rho^{\gamma_1}, \dots, A^{\alpha_{10}} \omega^{\beta_{10}} \rho^{\gamma_{10}}$ определяются из условия, что каждый критерий (комплекс) представляет собой безразмерную величину. Например, значения $A^{\alpha_1} \omega^{\beta_1} \rho^{\gamma_1}$ выбираем так:

$$\frac{[\varepsilon]}{[A]^{\alpha_1} [\omega]^{\beta_1} [\rho]^{\gamma_1}} = \frac{[L]^2 [T]^{-2}}{[L]^{\alpha_1} [T]^{\beta_1} [M]^{\gamma_1} [L]^{\gamma_1}} = [L]^{2-\alpha_1-\gamma_1} [T]^{-2-\beta_1} [M]^{\gamma_1} = 1.$$

Отсюда имеем следующую систему уравнений

$$2 - \alpha_1 - \gamma_1 = 0;$$

$$-2 - \beta_1 = 0;$$

$$0 - \gamma_1 = 0.$$

Ее решение приводит к результату: $\alpha_1=2$; $\beta_1=-2$; $\gamma_1=0$.

Следовательно, первый критерий будет определяться соотношением

$$\pi_1 = \frac{\varepsilon}{A^2 \omega^2}.$$

Таким же образом находим другие критерии подобия:

$$\pi_5 = \frac{Q}{A^3 \omega \rho}, \pi_6 = \frac{\sigma_{\pi}}{A^2 \omega^2 \rho}, \pi_7 = \frac{l}{A^5 \rho}, \pi_8 = \frac{b}{A}, \pi_9 = \frac{d}{A}, \pi_{10} = \frac{l}{A}.$$

Следовательно, выражение (4.36) можно переписать в виде

$$\pi_1 = \Phi_1 (\pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9, \pi_{10}).$$

Возможно вынесение критерия оптимальности из критерия подобия

$$\Theta = A^2 \omega^2 \Phi_1 (\pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9, \pi_{10}). \quad (4.40)$$

В полученных критериях π_5, π_6 и π_7 трудно уловить какой-либо физический смысл. Чтобы исправить положение, воспользуемся правилом теории размерностей, которое позволяет умножать или делить критерии друг на друга и получать, таким образом, новые критерии [2]. Однако общее число критериев подобия при этом не должно изменяться.

В результате многократного применения этой процедуры получили новые критерии (их нумерация тоже новая)

$$\pi_1 = \frac{Q}{\rho b l A \omega}, \pi_2 = \frac{\rho A^2 \omega^2}{\sigma_{\pi}}, \pi_3 = \frac{l \omega^2}{\sigma_{\pi} b l A}, \pi_4 = \frac{b}{d}, \pi_5 = \frac{b}{A}, \pi_6 = \frac{d}{l}. \quad (4.41)$$

Теперь критерии обрели некоторый физический смысл. Так, первый критерий π_1 выражает соотношение реальной производительности Q и некоторой характерной (эталонной) производительности $Q_3 = b l \rho A \omega$ выпускного отверстия измельчителя, если бы скорость выпуска была $v = A \omega$ ($A \omega$ – максимальная вибрационная скорость в системе). Но самое важное состоит в том, что этот критерий косвенно характеризует развиваемые напряжения в зерновке при ее сжатии. Чем меньше производительность Q , тем больше напряжения, и наоборот, чем больше Q , тем меньше напряжения в каждой зерновке.

Второй критерий π_2 является характеристикой типа нагружения. Об этой характеристике шла речь в предыдущем подразделе (см. формулу (2.12)). Она обусловлена появлением напряжений в зерновке от ее инерционности. Характерна для чисто ударного измельчения зерна.

Третий критерий π_3 характеризует инерционно-энергетические свойства пассивной щеки, поскольку от инерционных свойств этого рабочего органа зависит, реализуется ли дробящее усилие активной щеки. В данном случае эти

свойства представлены кинетической энергией T в числителе (вспомним, что при вращательном движении $T=I\omega^2/2$). Данная энергия соотносится с потенциальной энергией $U \sim \sigma_{\text{п}} blA$, запасенной при сжатии слоя материала сечением bl , на перемещении A .

Физический смысл критериев π_4, π_5 и π_6 ясен без каких-либо комментариев.

Таким образом, с 9 первоначальных факторов мы понизили их число до 6, что имеет немаловажное значение при проведении и обработке эксперимента. Кроме того, первоначальные факторы сгруппированы в критерии подобия, что, при пользовании ими, повышает ценность эксперимента, поскольку открывает возможность моделирования процесса вибрационного измельчения фуражного зерна.

Известно, что если для какого-либо процесса или устройства получены критерии подобия, то на их основе можно строить типоразмерный ряд машин с одинаковыми технико-экономическими показателями [5,6]. Очевидно, что для всех этих машин должно быть равенство критериев подобия. Условия подобия принято записывать в форме

$$\pi_k = idem (k = 1, \dots, n), \quad (4.42)$$

где *idem* (фр.) означает «одно и тоже».

В данной работе ставится цель – в лабораторных экспериментах найти рациональные значения критериев подобия с тем, чтобы использовать их при проектировании измельчителей производственного назначения.

Таким образом, окончательное функциональное уравнение для энергоемкости процесса вибрационного измельчения фуражного зерна предстает в виде

$$\mathcal{E} = A^2 \omega^2 \Phi_1 (\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6), \quad (4.43)$$

где под критериями π_1, \dots, π_6 подразумеваются критерии (4.41).

Обратим внимание на то, что теория размерности дает тот же результат для параметров вибрации $A^2 \omega^2$, что и формула (4.18), полученная на основе рациональной формулы В. П. Горячкина.

Соответственно, для величин модуля помола M , коэффициента вариации ν размеров частиц и содержания целых зерен ζ имеем право записать

$$M = b \Phi_2(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6). \quad (3.20)$$

$$\nu = \Phi_3(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6).$$

$$\zeta = \Phi_4(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6).$$

Использование в эксперименте переменных в виде критериев подобия несет и некоторые трудности с проведением опытов. В данном случае речь идет о том, что первоначальный фактор A вошел в четыре критерия подобия, а фактор ω представлен в трех критериях подобия. Как в таком случае варьировать их значения одновременно во всех этих критериях – серьезная проблема при использовании методики планирования эксперимента. В данном случае лучшее решение – не варьировать параметры A и ω вовсе.

Дело в том, что любой критерий подобия в эксперименте можно изменять числителем или знаменателем, причем любым из первоначальных параметров [5,6]. Поэтому целесообразно критерий π_1 изменять варьированием Q , критерий π_2 – показателем предела прочности σ_{Π} (дополнительно увлажняя материал). Критерий π_3 может быть изменен величиной I – моментом инерции пассивной щеки (путем добавления балластного груза).

Что же касается значений параметров A и ω , то их первоначально нужно выбрать в предварительных экспериментах так, чтобы они обеспечивали функционирование устройства с устойчивым процессом измельчения.

Критерии π_4, π_5 и π_6 изменяются в эксперименте варьированием величин, соответственно, d, b и l .

Таким образом, в разделе на основе теории размерности получены критерии подобия, открывающие возможности физического моделирования процесса вибрационного измельчения фуражного зерна и корректного проведения лабораторного эксперимента. Эти же критерии, после определения их численных значений в опытах, являются основой для проектирования производственных машин. Условиями проектирования являются:

$$\pi_1 = \frac{Q}{\rho b l A \omega} = idem, \quad \pi_2 = \frac{\rho A^2 \omega^2}{\sigma_{\pi}} = idem, \quad \pi_3 = \frac{l \omega^2}{\sigma_{\pi} b l A} = idem,$$

$$\pi_4 = \frac{b}{d} = idem, \quad \pi_5 = \frac{b}{A} = idem, \quad \pi_6 = \frac{d}{l} = idem.$$

4.5 Общая программа проведения экспериментов по обоснованию параметров вибрационного измельчителя

Для подтверждения теоретических выводов по технологическому процессу вибрационного измельчения фуражного зерна, а также с целью определения рациональных конструктивно-режимных параметров вибрационного измельчителя была составлена программа исследований, включающая (Рисунок 4.8):

- подбор образцов фуражного зерна для измельчения в процессе экспериментов;
- обоснование критериев оптимальности для процесса вибрационного измельчения фуражного зерна;
- выбор параметров (факторов) оптимизации данного технологического процесса;
- проведение размерного анализа и получение критериев подобия для процесса вибрационного измельчения фуражного зерна;
- разработку методики проведения и обработки отсеивающих экспериментов;
- разработку и изготовление лабораторного образца вибрационного измельчителя, подбор приборной базы;
- проведение, обработку и анализ отсеивающих экспериментов;
- обоснование и выбор матрицы планирования основного эксперимента, методики его обработки и проведения;
- экспериментальное исследование работы вибрационного измельчителя, обработку экспериментальных данных и получение регрессионных зависимостей,

описывающих технологический процесс вибрационного измельчения фуражного зерна.

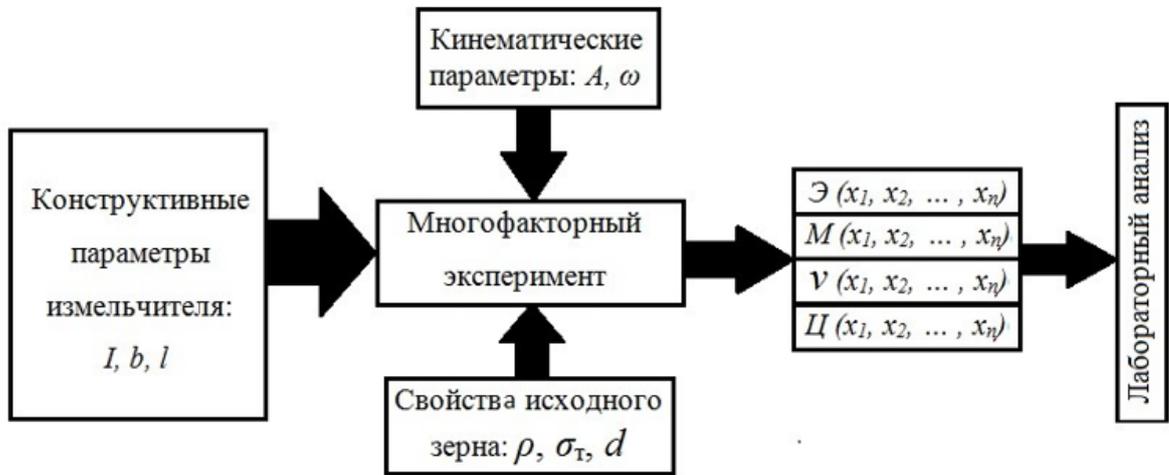


Рисунок 4.8 - Структурная схема экспериментального исследования рабочего процесса вибрационного измельчителя

4.6 Подбор образцов кормового зерна для измельчения в эксперименте

При проведении опытов использовали фуражное зерно яровых сортов пшеницы и ячменя. Пшеница была выбрана как самая распространенная фуражная культура, а ячмень – как самая прочная. Основные физико – механические характеристики этих видов зерна являются типичными для зернофуража, поэтому плотность, прочность и ряд других характеристик были приняты из литературных источников [30,35, 42,61].

Влажность зерна определяли при помощи электронного влагомера в начале и конце серии опытов. Замеры показали, что влажность зерна в течение опытов сохранялась постоянной (равновесной) и для разных видов имела значения в интервале, установленном нормативными документами, т. е. (10,0...14,5)% [28,105,120].

С целью снижения числа опытов в качестве основного экспериментального материала использовали пшеницу и ячмень. Критериями выбора ячменя как модельного материала явились его высокие прочностные характеристики, типичность формы и геометрических размеров.

Основные свойства исследуемого материала представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 Основные свойства исследуемого зерна

Культура	$W, \%$	$M_{1000}, \text{кг}$	$V_{1000}, \text{м}^3$	$d, \text{м}$	$\rho, \text{кг/м}^3$
Ячмень	10,2	$46,5 \cdot 10^{-3}$	$41 \cdot 10^{-6}$	$4,28 \cdot 10^{-3}$	1135
Пшеница	10,9	$38,8 \cdot 10^{-3}$	$33 \cdot 10^{-6}$	$3,98 \cdot 10^{-3}$	1189

Применяемое в опытах зерно соответствовало национальным стандартам РФ ГОСТ Р 53900-2010 «Ячмень кормовой. Технические условия» [32] и ГОСТ Р 54078-2010 «Пшеница кормовая. Технические условия» [33].

Определение других физико-механических свойств кормов выполняли по известным методикам для средних проб, отобранных по ГОСТ 13586.3—83 [35].

При исследовании гранулометрического состава измельченного зерна использовали сита с прямоугольными отверстиями, поскольку продукт содержал много пластинок (хлопьев).

4.7 Выбор критериев оптимальности процесса вибрационного измельчения фуражного зерна

Для оценки процесса измельчения фуражного мы применили следующие показатели [28,61,105,120]:

1. Показатели, характеризующие энергоёмкость процесса:

- расход энергии на единицу массы измельченного сырья, т. е. энергоёмкость процесса измельчения

$$\mathcal{E}_{\text{изм}} = N_{\text{изм}}/Q, \quad (4.44)$$

где $N_{\text{изм}}$ – мощность, расходуемая на измельчение (при этом мощность холостого хода не учитывается);

Q – производительность, кг/с.

- расход энергии на единицу вновь образованной поверхности, т. е. энергоёмкость процесса измельчения с учетом степени измельчения

$$\mathcal{E} = N/Q \lambda, \quad (4.45)$$

где λ - степень измельчения.

2. Показатели, характеризующие качество процесса измельчения:

- гранулометрический (фракционный) состав, т. е. соотношение в продуктах измельчения частиц определенных классов крупности (нормативный документ [105] требует, чтобы были представлены процентные соотношения следующих размерных классов (мм): 1) 0 - 0,25 включительно, 2) 0,25 - 0,6; 3) 0,6 - 1,0; 4) 1,0 - 2,0; 5) 2,0 - 3,0; 6) 3,0 - 4,0; 7) 4,0 - 5,0; 8) свыше 5,0 мм);

- средневзвешенный размер частиц (модуль размола) M (мм), определяемый по известной методике [44];

- степень измельчения λ , определяемая как отношение суммарной поверхности частиц продукта после измельчения S_k к суммарной поверхности S_n частиц исходного продукта

$$\lambda = \frac{S_k}{S_n}. \quad (4.46)$$

- неравномерность измельченного продукта ν (коэффициента вариации), %.

Практическое определение площадей поверхности частиц проводили методом ситового анализа при помощи лабораторного отсева. В результате просеивания отобранного образца продукта получали классы частиц, отличающихся крупностью. Суммарную поверхность частиц (приблизительно считая их кубической формы) всего образца подсчитывали по формуле [97]

$$S = 6 \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{\rho d_i}, \quad (4.47)$$

где M_i – масса i -го класса частиц;

ρ – плотность материала частиц.

Модуль размола определяли при помощи ситового анализа, т.е. отсева навески измельченного корма на фракции с целью определения его

гранулометрического состава. Для этого навеску дерти (100 г) просеивали на лабораторном рассеве вибрационного типа через набор сит с круглыми отверстиями диаметром 5, 4, 3, 2, 1, 0,6 и 0,25 мм. Верхнее сито с отверстиями диаметром 5 мм является контрольным для учета целых зерен.

Исчисление средневзвешенного размера частиц дерти (т.е. модуля размола) проводили по формуле [97]

$$M = \frac{d_1 P_{2*} + d_2 P_{2*} + \dots + d_n P_{n*}}{100} = \frac{\sum_{k=1}^i d_i P_{i*}}{100},$$

где d_i – средний размер отверстий двух смежных сит, мм;

P_{i*} – массовый выход фракции, т.е. остаток на каждом сите, выраженный в процентах от массы всей навески;

i – количество фракций, на которое разделялась навеска.

При использовании относительных выходов $P_i = P_{i*} / 100$ предыдущая формула несколько упрощается

$$M = \sum_{k=1}^i d_i P_i. \quad (4.48)$$

Данное выражение и использовалось при компьютерных расчетах.

Часто определение модуля размола недостаточно для всесторонней оценки качества измельчения и выравненности измельченного продукта по гранулометрическому составу. Оценку M мы дополняли расчетом следующих показателей:

- выборочной дисперсии D

$$D = \sum_{k=1}^i (d_i - M)^2 P_i; \quad (4.49)$$

- выборочное среднее квадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{D}; \quad (4.50)$$

- неравномерность измельченного продукта (коэффициента вариации), %

$$v = \frac{\sigma}{M} 100\%. \quad (4.51)$$

Наиболее характерными показателями процесса измельчения фуражного зерна являются:

1. расход энергии на единицу вновь образованной поверхности \mathcal{E} , т. е. энергоемкость процесса измельчения с учетом степени измельчения λ ;

2. модуль размола M ;
3. неравномерность измельченного продукта (коэффициента вариации модуля помола) ν , %.
4. содержание целых зерен в измельченном продукте (по массе) ζ , %.

Эти показатели и были приняты в качестве *критериев оптимальности* процесса вибрационного измельчения фуражного зерна. Прочие показатели получают в качестве промежуточных расчетов при вычислении критериев оптимальности.

Однако трудности с решением многокритериальных задач стимулируют поиск путей преобразования их в однокритериальный вид. В нашем случае целесообразно применить метод главного критерия [196]. Таковым может быть критерий энергоемкости \mathcal{E} процесса измельчения с учетом степени измельчения. Второй M , третий ν и четвертый ζ критерии, в соответствии с методикой И. Я. Федоренко [197], переводим в ограничения.

С учетом сказанного *математическую модель оптимизации*, основанную на экспериментальных данных, записываем в виде

$$\begin{aligned} \mathcal{E}(x_1, x_2, \dots, x_n) = N/Q \lambda \rightarrow \min, \\ [M_1] < M(x_1, x_2, \dots, x_n) < [M_2], \\ 0 < \nu(x_1, x_2, \dots, x_n) < [\nu], \\ 0 < \zeta(x_1, x_2, \dots, x_n) < [\zeta], \end{aligned} \quad (4.52)$$

где (x_1, x_2, \dots, x_n) – факторы процесса;

$[M_1]$, $[M_2]$ – зоотехнические требования на граничные (допускаемые) значения модуля помола (зависят от вида животных, общий диапазон составляет 0,2-2,6 мм);

$[\nu]$ – допускаемые значения неравномерности размеров измельченного продукта (коэффициента вариации модуля помола), %;

$[\zeta]$ – допускаемое содержание целых зерен в измельченном продукте (по массе), %.

Величины \mathcal{E} , M , ζ и ν в совокупности дают энергетическую и качественную оценку процесса измельчения фуражного зерна.

С помощью поверенного измерительного прибора К-50 снимали данные по потребляемой мощности вращения роторов вибровозбудителей на холостом ходу измельчителя и с нагрузкой по величине потребляемой мощности из сети. Величины λ и ν оценивали по выше приведенной методике, в основу которой положен ситовой анализ.

4.8 Описание лабораторного образца вибрационного измельчителя и приборной базы

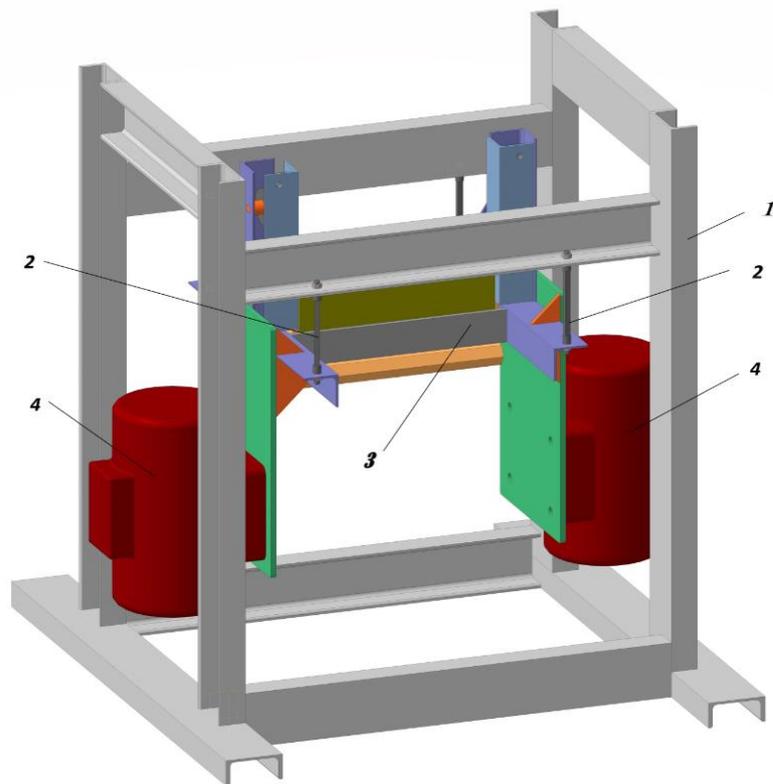
Лабораторный измельчитель содержит раму 1 (Рисунок 4.9), маятниковые подвески 2, которые поддерживают все колеблющиеся узлы. К последним относятся рабочие органы 3, пара самосинхронизирующихся вибровозбудителей 4.

Общий вид выполненного в металле измельчителя показан на Рисунке 4.10. Здесь дополнительно показан загрузочный бункер, куда поступало исходное зерно.

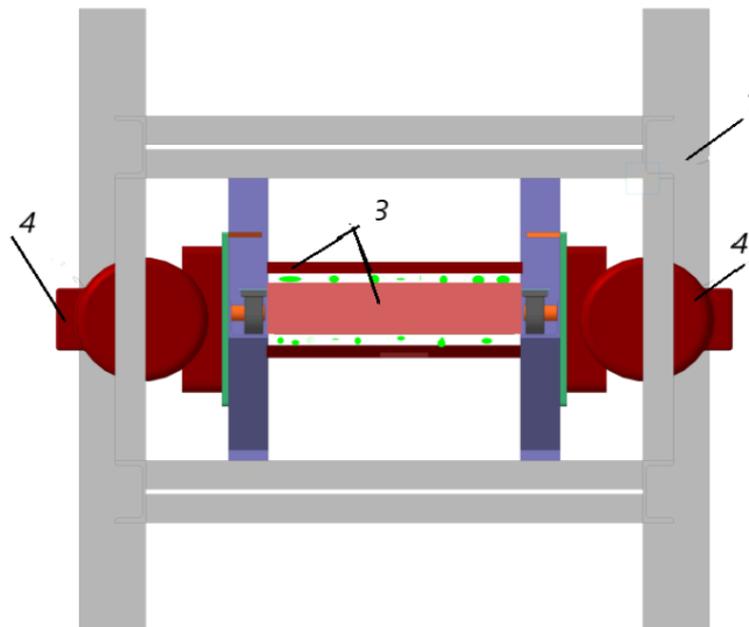
В качестве вибровозбудителей использовали внешние мотор-вибраторы серии MVE итальянской компании OLI. Марка мотор-вибратора: MVE 200/15E – 30A0, входная мощность - 0,12 кВт, частота вращения ротора - 1500 об/мин, максимальная центробежная сила - 1,9 кН.

Данная мощность вибровозбудителей обеспечивала максимальную производительность лабораторного измельчителя около 40 кг/час. Такая производительность обеспечивала экономию расхода зерна в экспериментах.

Однако при оснащении данного измельчителя мотор-вибраторами MVE 1100/15 мощностью 0,66 кВт каждый и вынуждающей силой 10,9 кН, а также при наращивании массы пассивной щеки производительность достигала 200-250 кг/час. Такая производительность вполне достаточна для обеспечения потребностей сельских подворий и некоторых фермерских хозяйств.



а



б

Рисунок 4.9 - Общий вид (а) и вид сверху (б) лабораторного образца вибрационного измельчителя (бункер условно снят): 1- рама; 2-подвески вибрирующей системы; 3- рабочие органы; 4- вибровозбудители



Рисунок 4.10 - Общий вид экспериментального вибрационного измельчителя

В процессе проведения экспериментальных исследований были использованы различные измерительные и регистрирующие приборы, перечень которых представлен в Таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Приборы и аппаратура, применяемые при экспериментальных исследованиях

Наименование	Класс точности	Марка	Назначение
Весы платформенные	1,0	РП-100	Определение массы исходного материала
Весы лабораторные	0,1	ВК-300.01	Определение массы проб и остатков на ситах
Рассев лабораторный	1,0	Тип Ihvr 1 (производство VEB LABORTECHNIK)	Рассев проб

Пурка лабораторная	-	ПХ - 1	
Преобразователь частоты питающего тока	0,5	FR-D740-080SC-EC преобразователь частоты Mitsubishi Electric 3.7кВт 380В	Изменяет входные сетевые параметры в различные выходные частоты, в конечном счете – частоты колебаний рабочего органа
Виброметр	0,5	PCE VT 2700	Измерение виброперемещения, виброскорости и виброускорения
Измерительный комплект	0,5	К - 50	
Секундомер	0,1		
Влагомер	0,1	Фауна-М	

4.9 Разработка методики проведения и обработки отсеивающего эксперимента

После того, как выбраны входные и выходные переменные, необходимо наметить стратегию дальнейших экспериментальных исследований. Стратегия зависит, в первую очередь, от количества отобранных факторов. Если их число не превышает 4-5, то можно сразу переходить к выбору плана эксперимента второго порядка [197]. В случае же большого количества переменных необходимо проводить отсеивающий эксперимент по выделению значимых (существенных) факторов. Еще академик В.П. Горячкин указывал, что как бы ни был сложен изучаемый процесс, всегда можно выделить 2-3 доминирующих фактора, определяющих его ход и качественное описание. Для точного количественного описания требуется учесть еще 2-3 фактора. Таким образом в эксперименте, как правило, участвует не более 2-5 факторов. Но их надо выделить с помощью отсеивающего эксперимента [197]. В большинстве процессов, зависящих от большого числа факторов, часть из них оказывает слабое влияние, соизмеримое с

ошибкой эксперимента. От этих факторов нужно освободиться, оставив только значимые. Эксперименты по поиску значимых факторов называют отсеивающими. В нашем случае даже после применения методов объединения первоначальных факторов в критерии подобия их число составляет 6. Следовательно, нужно проводить отсеивающий эксперимент.

Цель этих экспериментов состоит в получении грубых оценок воздействия факторов при возможно меньших затратах (минимальном числе опытов).

Из всех существующих методов наибольшее удобство для отсеивания факторов представляют насыщенные экспериментальные планы Плакетта-Бермана, для которых предполагается наличие линейных эффектов. При этом оценкой существенности факторов является их вклад в математическое ожидание отклика [206].

Для отсеивающих экспериментов важное значение имеют понятие числа степеней свободы и степени насыщенности планов и экспериментов.

Под числом степеней свободы φ будет пониматься разность числа экспериментов N и числа искомых параметров (коэффициентов модели) k :

$$\varphi = N - k. \quad (4.53)$$

Если $\varphi > 0$ и $N > k$, т.е. число проведенных экспериментов превышает число оцениваемых параметров, планы называют ненасыщенными. В этом случае возможна проверка адекватности модели. При $\varphi = 0$ и $N = k$, т.е. при равенстве числа экспериментов числу искомых параметров, планы называют насыщенными. Для проверки их адекватности здесь уже не остается степеней свободы.

При $\varphi < 0$ и $N < k$ число оцениваемых параметров превышает число экспериментов и планы называют сверхнасыщенными.

Все сказанное относится к тому случаю, когда в каждой точке плана эксперимента проводится одно наблюдение.

Число опытов N в планах Плакетта-Бермана кратно 4, и с их помощью можно исследовать $n = N - 1$ факторов (т.е. 7, 11, 15 факторов и т.д.). Эти планы являются *ортогональными*, что позволяет находить линейные эффекты факторов независимо друг от друга [206].

В таблице 4.6 приведена матрица плана для числа факторов $n=7$, сгенерированная функцией $plackettburman(nruns)$ математического пакета *MathCad*.

Функция $plackettburman(nruns)$ возвращает матрицу плана Плакетта-Бермана с $nruns$ выполнениями. В нашем случае число $nruns$ равно $N=8$.

Эта функция работает только с планами, у которых $8 \leq nruns \leq 48$ и $nruns$ должно быть кратным 4.

В этой матрице факторы обозначены латинскими буквами. Соответствие с предыдущими цифровыми обозначениями легко устанавливается: «А» ~ 1, «В» ~ 2 и т. д.

Таблица 4.6 - План Плакетта-Бермана для 7 факторов

$$X := plackettburman(8) = \begin{pmatrix} \text{"Run"} & \text{"Block"} & \text{"A"} & \text{"B"} & \text{"C"} & \text{"D"} & \text{"E"} & \text{"F"} & \text{"G"} \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 4 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 5 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 6 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 7 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 8 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

Поскольку у нас 6 факторов, а матрица эксперимента содержит 7 факторов, то седьмой фактор следует признать фиктивным. Введение фиктивного фактора даже полезно, поскольку, как мы увидим далее, он позволит оценить дисперсию наблюдений.

Уровни исследуемых факторов были установлены нами на основе анализа имеющихся исследований [88] и проведения поисковых экспериментов (Таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Уровни исследуемых факторов

Вещественный фактор	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	Фиктивный фактор
Кодированное обозначение фактора	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
Верхний уровень (+)	0,024	$20 \cdot 10^{-6}$	100	1,5	3,4 3	0,20	---
Нижний уровень(-)	0,008	$8 \cdot 10^{-6}$	50	0,5	2,0	0,12	---

Кодирование переменных и отыскание их кодированных уровней находили на основе методик, приведенных в руководствах по планированию эксперимента [206].

В соответствии с матрицей отсеивающего эксперимента и ранее приведенной методикой получили экспериментальные значения потребляемой мощности и степени измельчения материала. Производительность задавалась в эксперименте. Этих данных достаточно, чтобы рассчитать удельные затраты энергии на измельчение. Результаты промежуточных измерений и расчетов, а также окончательные данные по энергоемкости сведены в таблицу 4.8.

Таблица 4.8 -Значения выходных параметров отсеивающего эксперимента

№ опыта в соответствии с матрицей	№ реализации и после рандомизации опытов	Производительность, кг/ч	Замеряемая мощность, Вт	Энергоемкость, $\Delta_{\text{изм}}$, Вт ч/кг	Степень измельчения, λ	Энергоемкость с учетом λ , Э	
						Вт ч/(кг λ)	кДж/(кг λ)
1	2	30	37,7	4,59	2,05	2,24	8,06
2	3	30	43,8	4,79	1,41	3,40	12,24
3	7	30	84,8	6,16	1,27	4,85	17,45
4	4	10	47,6	4,76	2,42	1,98	7,08
5	6	30	41,0	4,70	1,61	2,92	10,51
6	1	10	5,0	5,50	2,13	2,58	9,30
7	8	10	69,0	6,90	2,17	3,18	11,44
8	5	10	68,4	6,84	3,30	2,07	7,46

Дисперсия ошибок наблюдений оценивается путем дублирования некоторых экспериментов или введением в план фиктивных факторов от $X_{\ell+1}$ до X_{N-1} . В нашем случае матрица строится для 7 факторов, к которым добавлен 1 фиктивный фактор. В результате такой процедуры и возможно использование одной из матриц планов Плакетта-Бермана (для $N=8$).

Для автоматизации расчетов мы использовали возможности математического пакета *Mathcad 15.045*. При анализе экспериментов применяли встроенные функции этого пакета [71].

Для расчета эффектов факторов использовали функцию *polyfitc(X, Y, n)*.

После проведения регрессионного анализа, значимыми факторами оказались свободный член «*Intercept*», а также факторы «*A*», «*C*», и «*D*». Соответственно незначимыми объявляются факторы «*B*», «*E*», «*F*» и «*G*».

Возвращаясь к размерным переменным, запишем незначимые критерии подобия:

$$\pi_2 = \frac{\rho A^2 \omega^2}{\sigma_{\Pi}}; \quad \pi_5 = \frac{b}{A}; \quad \pi_6 = \frac{d}{l}.$$

Критерий π_2 имеет большое значение для дробильных машин с разрушением тел ударом влет [175], где очень велики скорости ударных элементов. В вибрационнотрибционных измельчителях эти скорости на один-два порядка меньше, а сам процесс разрушения исходных тел осуществляется двусторонним сжатием. Это согласуется с теоретическими представлениями подраздела 4.3. Поэтому незначимость этого критерия следует признать правомерной и с физической точки зрения.

Критерий π_5 оказался статистически незначим, и видимо потому, что в режиме антирезонанса амплитуда колебаний очень мала и становится малоинформативной величиной.

Критерий π_6 имел бы значение, если бы размер измельчаемых тел d был соизмерим с длиной рабочих органов l . В нашем случае при малых размерах исходных зерновок $\pi_6 \ll 1$, что и обусловило незначимость этого критерия.

4.10 Обоснование и выбор матрицы планирования основного эксперимента, методики его проведения и обработки

После проведения отсеивающего эксперимента осталось три фактора, которые несколько изменим по правилам теории размерности и переобозначим следующим образом:

$$\pi_1 = \frac{Q}{\rho d l A \omega} (\text{«A»}), \pi_2 = \frac{I \omega^2}{\sigma_{\text{П}} l A^2} (\text{«B»}), \pi_3 = \frac{b}{d} (\text{«C»}). \quad (4.54)$$

Совокупность факторов процесса вибрационного измельчения фуражного зерна включает, таким образом, следующие их группы:

а) кинематические параметры рабочих органов (амплитуда A и частота колебаний ω);

б) технологические свойства обрабатываемого сырья (размерная исходная характеристика зерновок d , их плотность ρ , - динамический предел прочности материала зерновки $\sigma_{\text{П}}$);

в) геометрические и физические параметры рабочих органов (момент инерции I пассивной щеки относительно оси качания, размеры выпускной щели измельчителя в статическом положении b, l).

Таким образом, несмотря на отсеивание некоторых факторов, оставшиеся довольно полно характеризуют технологический процесс, что позволяет надеяться на получение объективной информации в дальнейших экспериментах.

Перечисленные критерии в процессе основного эксперимента изменяли, варьируя величины: Q, I и b .

Уровни варьирования перечисленных факторов оставили прежними, как в отсеивающем эксперименте (Таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Уровни варьирования факторов в основном эксперименте

Фактор	$\pi_1(x1)$	$\pi_2(x2)$	$\pi_3(x3)$
+1	0,024	100	1,5
0	0,016	75	1,0
-1	0,008	50	0,5

Последующие опыты должны решить следующие задачи:

- а) дать количественное описание исследуемого процесса;
- б) оптимизировать процесс по введенному критерию оптимальности и с учетом ограничений.

В соответствии с математической моделью оптимизации процесса (4.52), мы должны для каждой культуры получить по четыре уравнения регрессии: для \mathcal{E} , M , ν и \mathcal{C} .

Успех эксперимента во многом определяется выбором его плана (матрицы). Выбор плана является неформальной процедурой и определяется, кроме прочего, пристрастиями и квалификацией экспериментатора.

Во-первых, необходимо определиться с порядком математической модели, которую мы хотим получить при помощи эксперимента. Для целей управления и оптимизации достаточно модели второго порядка в виде соответствующего полинома. При этом нужен соответствующий план эксперимента.

Во-вторых, необходимо установить, какому критерию (или критериям) оптимальности планирования мы будем отдавать предпочтение.

С учетом сказанного, планируем основной эксперимент сразу с получением уравнения регрессии второго порядка.

При выборе плана эксперимента мы руководствовались рекомендациями, приведенными в книге [197]. Экономичные планы эксперимента можно получить, отказавшись от свойства композиционности плана. Это разумно, поскольку большинство сельскохозяйственных процессов имеют нелинейный характер зависимостей, поэтому пытаться строить сначала линейную модель имеет мало смысла. Среди некомпозиционных планов большую известность имеют близкие к D -оптимальным (квази D -оптимальные) планы Песочинского, а также планы Бокса-Бенкена [197]. Факторы в этих планах варьируются на уровнях $(-1; 0; +1)$.

С учетом использования математического пакета *MathCad* следует отдать предпочтение плану Бокса-Бенкена для 3-х факторов, поскольку в пакете в блоке «Планирование эксперимента» имеется соответствующая встроенная функция (Таблица 4.10).

Функция *boxbehnken(n)* возвращает *n*-факторную матрицу плана Бокса — Бенкена. Эта функция работает только с планами, у которых $3 \leq n \leq 7$.

Подробная методика обработки основного эксперимента вынесена в Приложение Г.

Таблица 4.10 – Матрица планирования эксперимента для трех факторов, сгенерированная функцией *boxbehnken(n)* программы *MathCad*

	0	1	2	3	4
0	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"
1	1	1	-1	-1	0
2	2	1	1	-1	0
3	3	1	-1	1	0
4	4	1	1	1	0
5	5	1	-1	0	-1
6	6	1	1	0	-1
boxbehnken (3) = 7	7	1	-1	0	1
8	8	1	1	0	1
9	9	1	0	-1	-1
10	10	1	0	1	-1
11	11	1	0	-1	1
12	12	1	0	1	1
13	13	1	0	0	0
14	14	1	0	0	0
15	15	1	0	0	0

5 АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

5.1 Особенности гранулометрического состава измельченного продукта

Первые же опыты по измельчению кормового зерна в вибрационном измельчителе показали, что структура измельченного продукта существенно отличается от соответствующих продуктов, полученных в молотковой дробилке и зерновой плющилке (Рисунок 5.1). Он занимает по форме получаемых частиц некоторое промежуточное положение между продуктами этих традиционных машин. При влажности зерна, не превышающей 11%, около 20-22% получаемых частиц (по массе) имеют форму пластинок (хлопьев), характерных для процесса плющения. Остальная часть продукта содержит бесформенные частицы, характерные для работы молотковой дробилки. О наличии зерновых пластинок в продукте вибрационного измельчения было впервые сообщено в нашей работе [88]. Затем это было подтверждено в работе [170].



а

б

Рисунок 5.1 - Вид частиц корма, получаемых при измельчении кормовой пшеницы вибрационными рабочими органами: а) влажность 12,2 %;
б) влажность 14,3 %

Увеличение влажности измельчаемого зерна примерно до (14,0-14,5) % повышает количество пластинок (по массе) до 75-85% (Рисунок 5.1б)

Для детального изучения влияния влажности на форму получаемых частиц корма провели соответствующий опыт. Предварительно было введено понятие показателя μ относительного количества плющенных частиц (по массе), определяемого по формуле

$$\mu = \frac{m}{M},$$

где m -масса плющенных частиц в общей навеске M измельченного продукта.

Маска навески принималась равной 1 кг, отсев неплющенных частиц проводился на виброрешете с круглыми отверстиями диаметром 3 мм. Повторность опытов – трехкратная.

Полученные в эксперименте данные аппроксимировали логистической кривой (Рисунок 5.2)

$$\mu(W) = \frac{1}{1 + C_0 \exp(-C_1 W)}$$

где C_0 , C_1 – подгоночные коэффициенты, определяемые в среде *Mathcad* методом наименьших квадратов при помощи встроенной функции *genfit*.

Значения коэффициентов составили: пшеница - $C_0 = 7675$, $C_1 = 0,724$; ячмень – $C_0 = 1620$, $C_1 = 0,725$.

Изучение рисунка 5.2 показывает, что, несмотря на различие значений коэффициента C_0 , кривые по пшенице и ячменю совпадают качественно и весьма близки количественно. В пределах изменения влажности зерна с 9 до 11% идет медленное повышение показателя μ , затем следует почти линейное его изменение в промежутке влажности 11-14% и, наконец, наступает период насыщения при влажности 14-16%. Асимптотой для исследуемого показателя является значение $\mu=1$.

Предельной влажностью, рекомендуемой для кормового зерна является (см. Таблицу 1.2) значение 14, 5%. Полученная дерть при такой влажности не плесневеет.

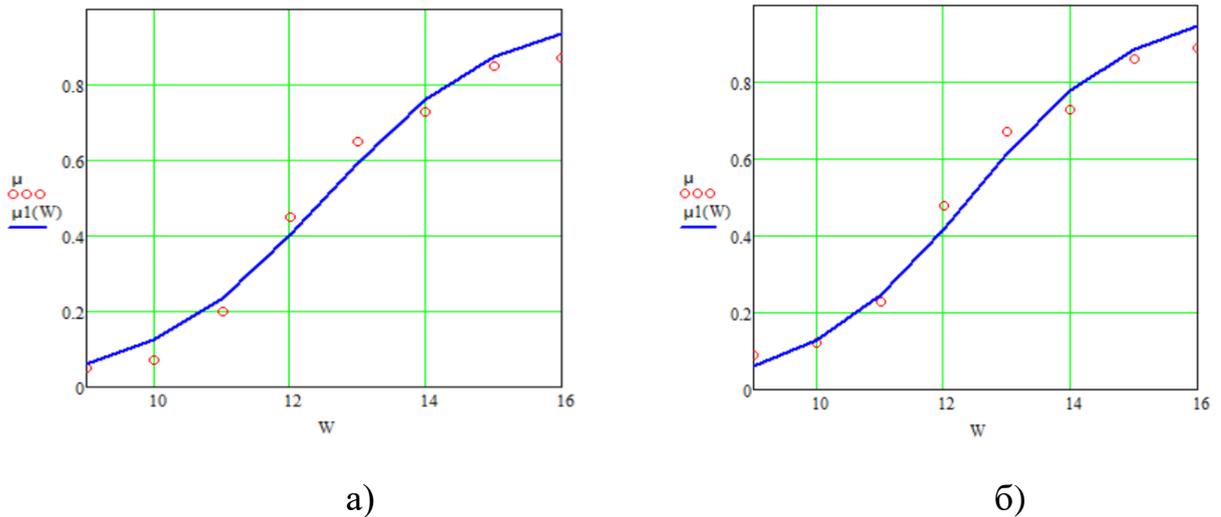


Рисунок 5.2 – Зависимость показателя относительного (по массе) количества плющенных частиц (кружочки – эксперимент, $\mu l = \mu l(W)$ – аппроксимационная кривая) в зависимости от влажности исходного зерна: а) ячмень; б) пшеница; (режим измельчения соответствует опыту №1 Таблицы 4.10)

Даже такое сухое плющение зерна (без обработки паром) имеет ряд преимуществ перед дроблением. При дроблении зерно просто раскалывается на несколько частиц. При плющении же оно не просто раздавливается, что видно внешне (см. Рисунок 5.1), но и происходит разрыв на клеточном уровне, чего не увидеть без приборов. Если посмотреть на клетку плющеного зерна под микроскопом, можно увидеть, что она вся покрыта микротрещинами, именно поэтому его усвоение лучше [129].

Для крупного рогатого скота важно, что нарушена, но в целом сохраняется оболочка овса и ячменя. Поскольку это жвачные животные, им нужен грубый корм, а не мука, поэтому плющенное зерно – очень здоровый корм, у животных не будет проблем с пищеварением. В итоге, чем грубее получится корм, тем медленнее он будет перевариваться в рубце животного. Корм тонкого помола переваривается слишком быстро, поэтому рН рубца животного сильно понижается, что, среди прочего, снижает поедаемость грубых кормов. Следствие этого – потери продуктивности и даже ламинит КРС (болезнь копыт) [129].

При использовании переизмельченного на молотковых дробилках зерна у жвачных животных нарушаются процессы полного усвоения питательных веществ зерна, в частности, перевода биологически неполноценного белка в биологически полноценный и преобразования углеводов в летучие жирные кислоты и т.д.

Задержка корма в рубце способствует более полному его усвоению, следовательно, лучшей конверсии. Удои, при скармливании сухого плющеного зерна, на 5-10% лучше по сравнению с дертью, а привесы на откорме выше на 10-20%. Плющенное зерно не пылит, то есть не вызывает аллергии ни у людей, ни у животных. Применяя технологию плющения зерна, можно одновременно сокращать затраты и повышать продуктивность животных.

Таким образом, структура измельченного вибрацией зерна идеальна для овец, коз, КРС, лошадей. Кроме того, подобное измельчение требуется в пищевой промышленности для солода и осолаживаемого зернового сырья.

Косвенным свидетельством изменения фракционного состава готового продукта в вибрационном измельчителе, в сравнении с молотковой дробилкой, являются результаты его ситовых анализов, один из которых на пшенице $W=10,9\%$ рассматривается ниже (см. также Приложение Д).

Полученные экспериментальные данные были представлены в программе Mathcad двумя матрицами (Рисунок 5.3).

$$X := \begin{pmatrix} 0.5 \\ 1.5 \\ 2.5 \\ 3.5 \\ 4.5 \\ 5.5 \end{pmatrix} \quad P := \begin{pmatrix} 0.02 \\ 0.36 \\ 0.41 \\ 0.14 \\ 0.06 \\ 0.01 \end{pmatrix}$$

Рисунок 5.3 – Матрица исходных данных

В первой матрице представлены средние размеры двух соседних сит (мм), во второй-остатки на ситах в относительных единицах.

Для расчетов модуля помола и коэффициента вариации модуля в системе Mathcad была создана несложная программа (Рисунок 5.4).

Расчет модуля размола

$$M(i) := \sum_{k=1}^i (X_k \cdot P_k) \quad M(6) = 2.39$$

Оценка дисперсии M

$$D(i) := \sum_{k=1}^i [(X_k - M(i))^2 \cdot P_k] \quad D(6) = 0.898$$

Оценка среднеквадратического отклонения

$$\sigma := \sqrt{D(6)} \quad \sigma = 0.948$$

Коэффициент вариации модуля помола (%)

$$v := \frac{\sigma \cdot 100}{M(6)} \quad v = 39.648$$

Рисунок 5.4 – Программа в системе *Mathcad* для обработки экспериментов по дисперсионному составу полученного продукта

Полученные данные были представлены в виде гистограммы и аппроксимированы затем нормальным законом распределения модуля размола, как случайной величины (Рисунок 5.5).

Экспериментальная гистограмма и теоретическая плотность нормального распределения остатков на ситах

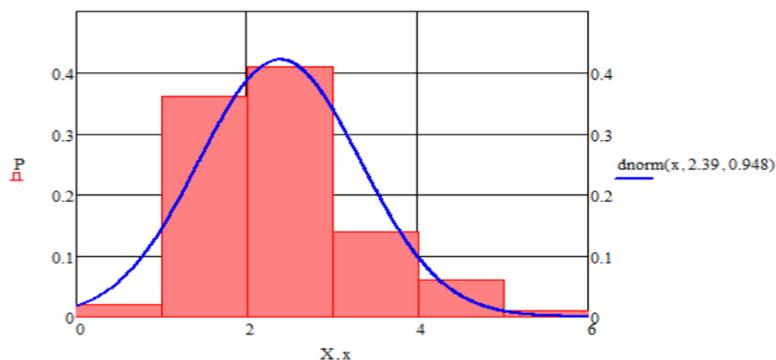


Рисунок 5.5 – Экспериментальная гистограмма и теоретическая плотность распределения остатков на ситах (пшеница, $W=10,9\%$)

Проверка по критерию Пирсона показала правомерность такой аппроксимации (Рисунок 5.6).

Расчет критерия согласия хи-квадрат
Пирсона

Исходные данные для расчета:

$$\begin{aligned} \text{ORIGIN} &:= 1 \\ i &:= 1, 2, \dots, 6 & M &:= 2.39 & \sigma &:= 0.948 \\ i &:= \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix} & X &:= \begin{pmatrix} 0.5 \\ 1.5 \\ 2.5 \\ 3.5 \\ 4.5 \\ 5.5 \end{pmatrix} & P &:= \begin{pmatrix} 0.02 \\ 0.32 \\ 0.37 \\ 0.22 \\ 0.06 \\ 0.01 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x &:= \begin{pmatrix} 0.5 \\ 1.5 \\ 2.5 \\ 3.5 \\ 4.5 \\ 5.5 \end{pmatrix} & \text{dnorm}(i, M, \sigma) &= \begin{pmatrix} 0.144 \\ 0.387 \\ 0.342 \\ 0.099 \\ 9.509 \times 10^{-3} \\ 2.987 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Переобозначение экспериментальных и теоретических частот

$$Y1 := P \quad Y2 := \text{dnorm}(i, M, \sigma)$$

Расчет критерия согласия хи-квадрат

$$\chi(i) := \sum_{k=1}^i \left[(Y1 - Y2)^2 \cdot \frac{1}{Y2} \right] \quad \chi(6) = 5.096$$

Табличное значение $\chi_{\text{табл}}$ при уровне значимости $\alpha=0.05$ и степенях свободы $i-1=5$ составляет 11,1. Поскольку $\chi(6)$ меньше $\chi_{\text{табл}}$, то гипотеза о нормальном законе распределения остатков на ситах не отвергается.

Рисунок 5.6 – Программа в системе Mathcad для проверки гипотезы о нормальном распределении размеров частиц в полученном продукте

Располагая законом и параметрами распределения модуля размола, можно подсчитать предложенный коэффициент соответствия данного измельчителя или его режима настройки зоотехническим требованиям (для определенного вида животных)

$$\xi = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx.$$

$$\xi := \int_0^{1.0} \text{dnorm}(x, 2.39, 0.948) dx = 0.065 \quad \text{Для свиней}$$

$$\xi := \int_1^2 \text{dnorm}(x, 2.39, 0.948) dx = 0.269 \quad \text{Для КРС}$$

$$\xi := \int_2^3 \text{dnorm}(x, 2.39, 0.948) dx = 0.4 \quad \text{Для птиц}$$

Как видно, данный режим вибрационного измельчения пшеницы обеспечивает в большей степени зоотехнические требования для птиц.

Подобные результаты были получены и на ячмене $W=10,2\%$ (Рисунок 5.7).

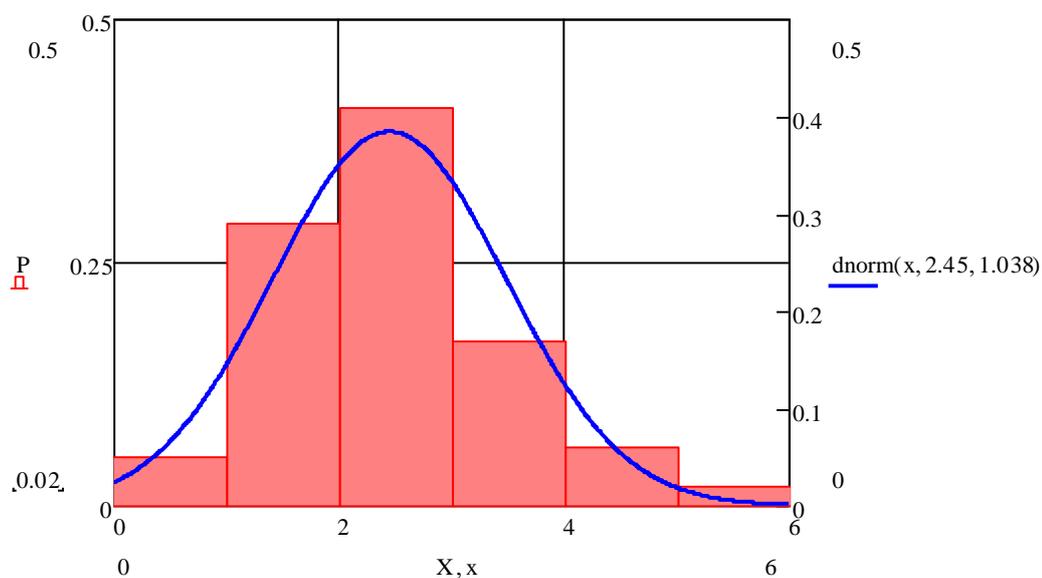


Рисунок 5.7 – Экспериментальная гистограмма и теоретическая плотность распределения остатков на ситах (ячмень)

Табличное значение $\chi_{\text{табл}}$ при уровне значимости $\alpha=0.05$ и степенях свободы $i-1=5$ составляет 11,1. Поскольку $\chi(6)$ меньше $\chi_{\text{табл}}$, то гипотеза о нормальном законе распределения остатков на ситах не отвергается.

Соответствующие коэффициенты соответствия для ячменя имеют вид:

$$\xi := \int_0^{1.0} \text{dnorm}(x, 2.45, 1.038) dx = 0.072 \quad \text{Для свиней}$$

$$\xi := \int_1^2 \text{dnorm}(x, 2.45, 1.038) dx = 0.251 \quad \text{Для КРС}$$

$$\xi := \int_2^3 \text{dnorm}(x, 2.45, 1.038) dx = 0.37 \quad \text{Для птиц}$$

Как видно, и по коэффициенту ξ получены сходные, как на пшенице, результаты.

Заметим далее, что молотковые дробилки выдают продукт с логнормальным распределением частиц по размерам. Следовательно, количество мучнистой фракции при вибрационном измельчении существенно меньше, чем при измельчении в молотковой дробилке. Таким образом, физиологии животных в большей степени отвечает продукт, полученный в вибрационном измельчителе.

Как было отмечено в главе 1, повышенное содержание пылевидной фракции, т.е. частиц размером менее 0,25 мм, в измельченном материале, предназначенном для скармливания сельскохозяйственным животным, имеет несколько отрицательных эффектов. С позиций зоотехнии – это ухудшение смачиваемости корма, что ведет к ухудшению его усвояемости, возникновению заболеваний желудочно-кишечного тракта и т.д. С технической стороны – увеличение энергозатрат на производство корма, повышенные потери при его транспортировке, погрузке и разгрузке и т.п. С точки зрения охраны труда – это ухудшение условий труда вследствие повышенного содержания пыли в воздухе, а также повышенная взрывоопасность и пр. Вследствие того, что современные молотковые дробилки дают от 20 до 30% пыли в зависимости от вида перерабатываемого сырья, то в рамках решения данной проблемы, одной из важнейших задач данного эксперимента, стояло отыскание таких конструктивных и кинематических параметров рабочего процесса вибрационного измельчителя, при которых достигается минимальное содержание пылевидной фракции с сохранением необходимого качества измельченного продукта по крупности.

5.2 Производительность вибрационного измельчителя и энергоемкость процесса измельчения

В разделе 2.4.3 главы 2 были проведены теоретические исследования по определению производительности вибрационного измельчителя кормового зерна, где отыскивалась ее зависимость от конструктивно-кинематических параметров рабочих органов и камер измельчения. Полученные теоретические результаты были проверены экспериментами, в которых замерялось количество измельченного материала, выходящее из измельчителя в единицу времени, в зависимости от названных параметров.

Графическая зависимость производительности измельчителя Q от выходного зазора b камер измельчения представлена на Рисунке 5.3. Данные результаты получены при постоянных прочих параметрах, в частности частота колебаний составляла 215 рад/с.

Из рисунка видно, что экспериментальные данные группируются около прямой линии, предсказанной теорией. Подсчеты показывают, что расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 5-7%.

Поскольку обсуждаемая зависимость линейна, то уместно говорить о коэффициенте корреляции. Он составил по результатам расчетов 0,98.

Несколько парадоксальным является теоретический вывод о наличии экстремума-минимума для производительности измельчителя по частоте колебаний рабочих органов (см. Рисунки 2.5 и 5.9).

Объяснялось такое явление тем, что при увеличении частоты, во-первых, возрастают центробежные силы, действующие на загрузку камеры измельчения, и способствующие выведению материала из последней. Во-вторых, эти же силы увеличивают прижатие загрузки к стенам камеры и, следовательно, повышают силы трения. «Игра» этих сил и объясняет указанный парадокс.

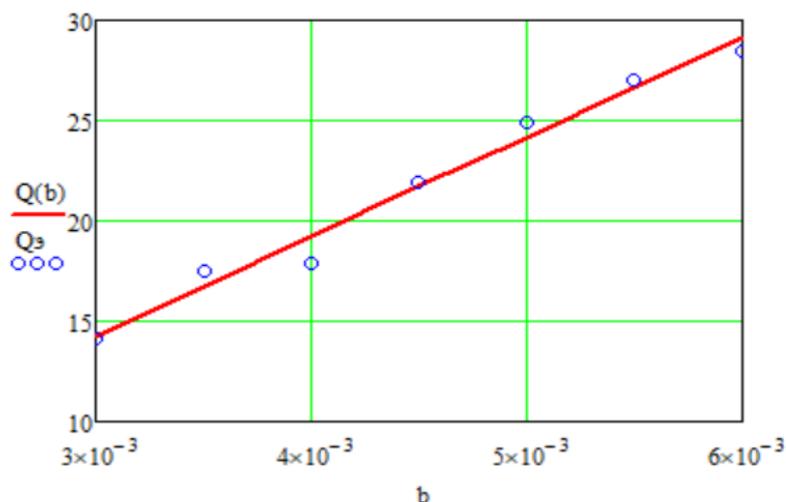


Рисунок 5.8 – Зависимость производительности (кг/час) лабораторного образца вибрационного измельчителя от выходного зазора (м) камер измельчения: точки-эксперимент, линия-теория; измельчаемый материал-пшеница влажностью 10,9%.

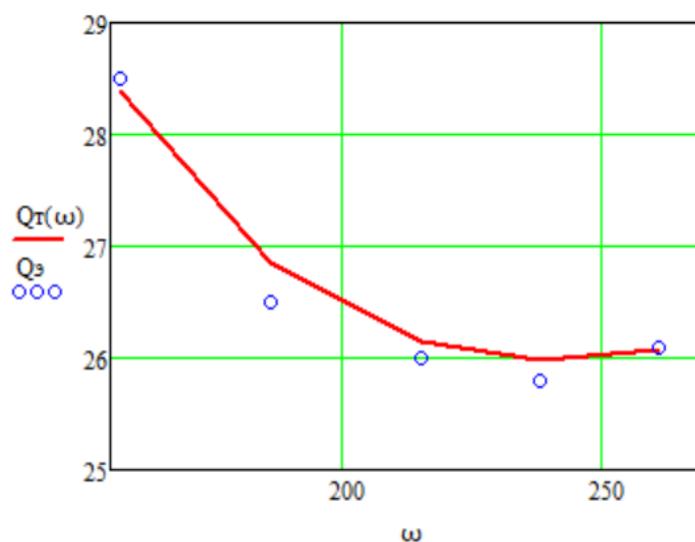


Рисунок 5.9 - Зависимость производительности (кг/час) лабораторного образца вибрационного измельчителя от частоты колебаний (рад/с) рабочих органов: точки-эксперимент, линия-теория; измельчаемый материал - пшеница влажностью 13,9%.

Представленные на рисунке 5.9 экспериментальные данные не противоречат указанному теоретическому выводу.

Основным подходом к теоретическому расчету удельной энергоемкости процесса измельчения кормового зерна явилась рациональная формула В. П. Горячкина, на основе которой была получена зависимость (4.18), отражающая особенности вибрационного измельчения.

На рисунках 5.10 и 5.11 представлены теоретические зависимости энергоемкости от параметров вибрации, а также экспериментальные точки.

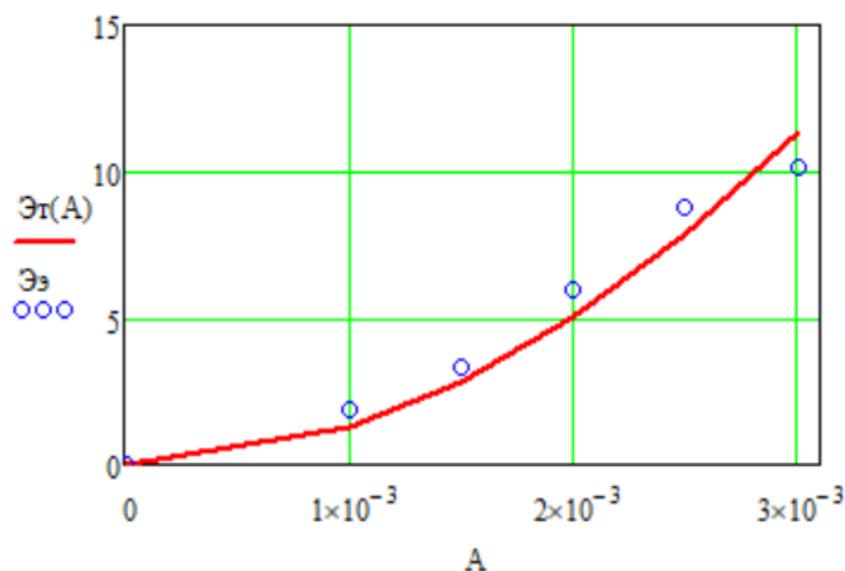


Рисунок 5.10 - Зависимость энергоемкости (кВт*ч/т) процесса вибрационного измельчения от амплитуды колебаний (м) рабочих органов: точки-эксперимент, линия-теория; измельчаемый материал - пшеница влажностью 10,9%.

Из графиков видно, что эксперимент качественно и количественно подтверждает теоретические зависимости. Следовательно, механико-технологические предпосылки, использованные при построении теории, являются обоснованными.

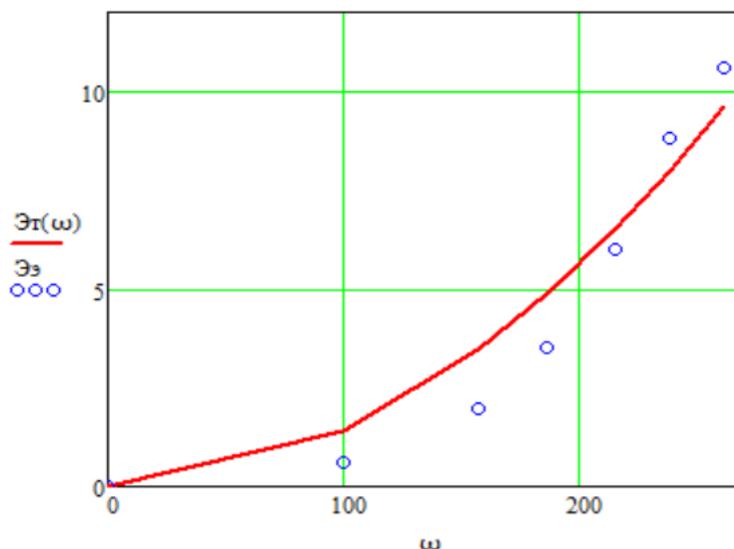


Рисунок 5.11 - Зависимость энергоемкости (кВт ч/т) процесса вибрационного измельчения от частоты колебаний (рад/с) рабочих органов: точки-эксперимент, линия-теория; измельчаемый материал - пшеница влажностью 10,9%.

5.3 Анализ процесса вибрационного измельчения кормовой пшеницы

Проведенные эксперименты, методика которых изложена в главе 4, позволили получить ряд показателей процесса вибрационного измельчения. Итоговая ведомость результатов представлена в Приложении Е.

Напомним, что факторами процесса у нас являются критерии подобия:

$$\pi_1 = \frac{Q}{\rho d l A \omega} \text{ («A»)}, \pi_2 = \frac{l \omega^2}{\sigma l A^2} \text{ («B»)}, \pi_3 = \frac{b}{d} \text{ («C»)}. \quad (5.1)$$

Выходными характеристиками процесса приняты:

1. расход энергии на единицу вновь образованной поверхности Э , т. е. энергоемкость процесса измельчения с учетом степени измельчения λ , кВт ч/(кг λ).;
2. модуль размола M , мм;
3. неравномерность измельченного продукта (коэффициента вариации модуля помола) ν , %.
4. содержание целых зерен в измельченном продукте (по массе) ζ , %.

В полученных и приведенных далее уравнениях регрессии применили следующие обозначения:

$$x1 \sim \pi_1 = \frac{Q}{\rho d l A \omega} (\text{«A»}), \quad x2 \sim \pi_2 = \frac{l \omega^2}{\sigma l A^2} (\text{«B»}), \quad x3 \sim \pi_3 = \frac{b}{d} (\text{«C»});$$

$$y1 = \varepsilon, \quad y2 = M, \quad y3 = v, \quad y4 = \zeta. \quad (5.2)$$

Обратим также внимание на то, что под обозначениями $x1$, $x2$ и $x3$ подразумеваются кодированные значения переменных, принимающие в экспериментах значения 1, 0 и -1.

5.3.1 Влияние параметров измельчения на модуль помола

Проведение эксперимента по плану Бокса-Бенкена и его последующая обработка позволили получить адекватное уравнение регрессии в виде полинома второй степени (Приложение Ж):

$$y2 = 1,55 + 0,34 * x1 - 0,37 * x2 - 0,07 * x3 - 0,12 * (x1)^2 + 0,12 * (x2)^2 - 0,13 * (x3)^2, \text{ мм.} \quad (5.3)$$

При этом значение коэффициента детерминации R^2 составило 0,967. Незначимыми оказались все члены уравнения регрессии, характеризующие взаимодействие факторов.

Из анализа данного уравнения следует, что наибольшее влияние на величину модуля размола M оказывают факторы $x1$ и $x2$, причем рост первого фактора увеличивает модуль размола, а рост второго фактора, наоборот, уменьшает этот показатель. Третий фактор $x3$ имеет меньшее влияние, и его действие проявляется весьма сложным образом.

Графическая иллюстрация этого уравнения представлена на рисунках 5.12 и 5.13.

На рисунке 5.12 по оси абсцисс отложен фактор $x1$, по оси ординат – фактор $x2$. Видно, что при минимальных значениях этих факторов модуль размола пшеницы составляет около 1,6 мм. По мере роста фактора $x1$ при неизменном $x2$ модуль размола достигает величины 2,0 мм. Увеличение фактора $x2$ при неизменном $x1$ уменьшает модуль помола до значения 0,9 мм.

Такое влияние данных факторов вполне объяснимо. Первый фактор в эксперименте мы варьировали изменением подачи исходного зерна. При увеличении подачи в большей степени загружалась камера измельчения, при этом механическое напряжение на каждую зерновку уменьшалось. Это и приводило к более крупному размолу зерна.

Увеличение второго фактора мы обеспечивали наращиванием массы (а, следовательно, и момента инерции пассивной щеки). Рост этого фактора, следовательно, увеличивает инерционное сопротивление этой щеки. В конечном счете это повышает напряжения в зерновках, находящихся в камере измельчения. Это и ведет к уменьшению модуля размола, т. е. к более мелкому измельчению.

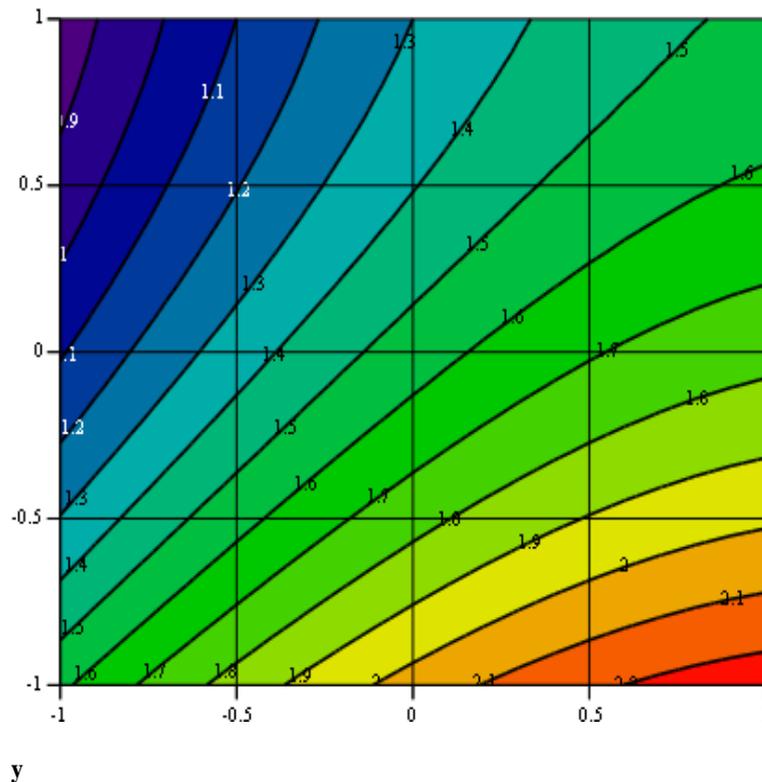


Рисунок 5.12 – Линии равного уровня для уравнения регрессии (4.3) при $x_3=0$

Влияние третьего фактора x_3 удобно проследить на рисунке 5.13.

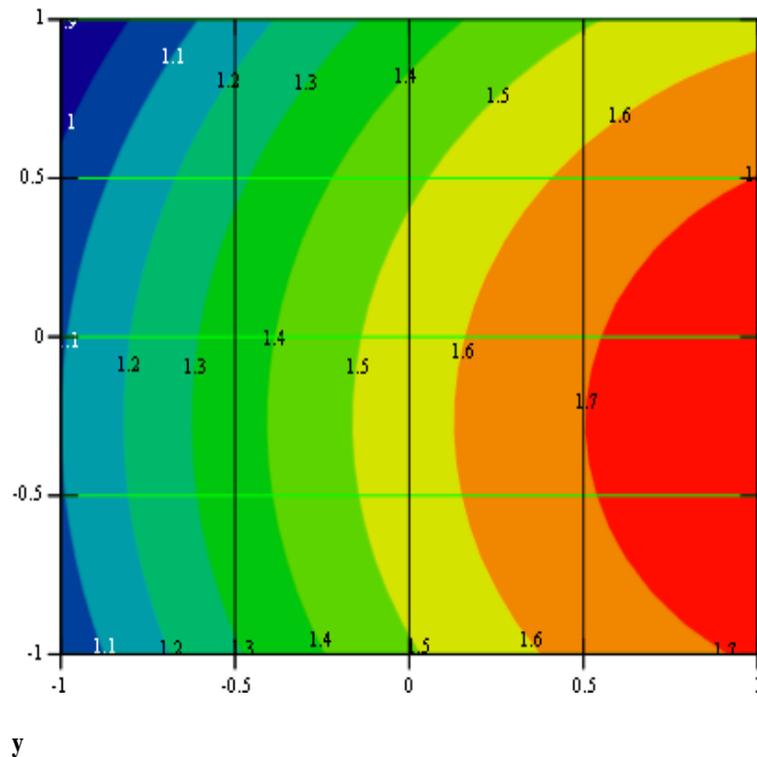


Рисунок 5.13 – Линии равного уровня для уравнения регрессии (4.3) при $x_2=0$

Этот фактор здесь отложен по оси ординат. Видно, что его увеличение, т. е. увеличение относительного зазора между активными и пассивными щеками, несколько уменьшает модуль помола. Видимо это уменьшение обязано усилением именно ударной нагрузки на зерновки в камерах измельчения, в то время как при малых зазорах преобладают статические нагрузки.

5.3.2 Влияние параметров измельчения на коэффициент вариации модуля размола

Изложенная ранее методика позволила получить уравнение регрессии коэффициента вариации модуля помола для пшеницы в виде

$$y_3 = 43,65 - 2,73x_1 + 2,07x_2 + 1,67x_1x_2 + 2,15(x_2)^2 - 4,94(x_3)^2, \% \quad (5.4)$$

Статистически незначимыми оказались коэффициент при x_3 и все взаимодействия факторов. Коэффициент детерминации R^2 составил величину 0.954, что говорит о хорошей корреляции между экспериментальными и предсказанными данными.

Среднее значение коэффициента вариации модуля помола составляет 43.65%. Это существенно ниже по сравнению с молотковыми дробилками (60-70%). Таким образом, вибрационное измельчение дает более выравненный, по размерам частиц, продукт. Он в большей степени отвечает физиологии животных.

Наиболее значимыми здесь оказались факторы x_3 , x_1 , x_2 , которые перечислены в порядке, соответствующим степени влияния. Более подробно изучим это влияние на графиках.

Закрепим значение фактора x_2 на нулевом уровне, а с остальными факторами построим сечения функции равного уровня (рисунок 5.14). Видим довольно сложное нелинейное влияние фактора x_3 (относительный зазор между щеками в камере измельчения) на коэффициент вариации модуля размола.

При среднем значении этого фактора наблюдается наибольшее значение коэффициента вариации модуля размола. В то же время фактор x_1 (величина подачи исходного зерна) дает обратно пропорциональную зависимость влияния на данную выходную характеристику процесса измельчения.

$$y_3(x_1, x_3) := 43.65 - 2.73 \cdot x_1 - 4.94 \cdot (x_3)^2$$

Еще более сложным является зависимость от инерционности пассивной щеки (фактор x_2). Здесь имеем, кроме всего прочего, взаимодействие с фактором x_1 (рисунок 5.15).

Картину взаимодействий дополняет рисунок 5.16, на котором изображены линии равного уровня для уравнения регрессии (5.4) при $x_1=0$. В левой и центральной части данного графика мы наблюдаем протяженную гряду повышенных значений коэффициента вариации модуля размола, переходящую в некоторую вершину в правой центральной части графика. При этом нужно учитывать влияние перечисленных факторов на другие выходные величины. Таким образом, можно констатировать, что рассмотренные закономерности пока не дают однозначного ответа на возможности управления данной выходной характеристикой процесса - коэффициентом вариации модуля размола.

$$y_3(x_1, x_2) := 43.65 - 2.73 \cdot x_1 + 2.07 \cdot x_2 + 1.67 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2.15 \cdot (x_2)^2$$

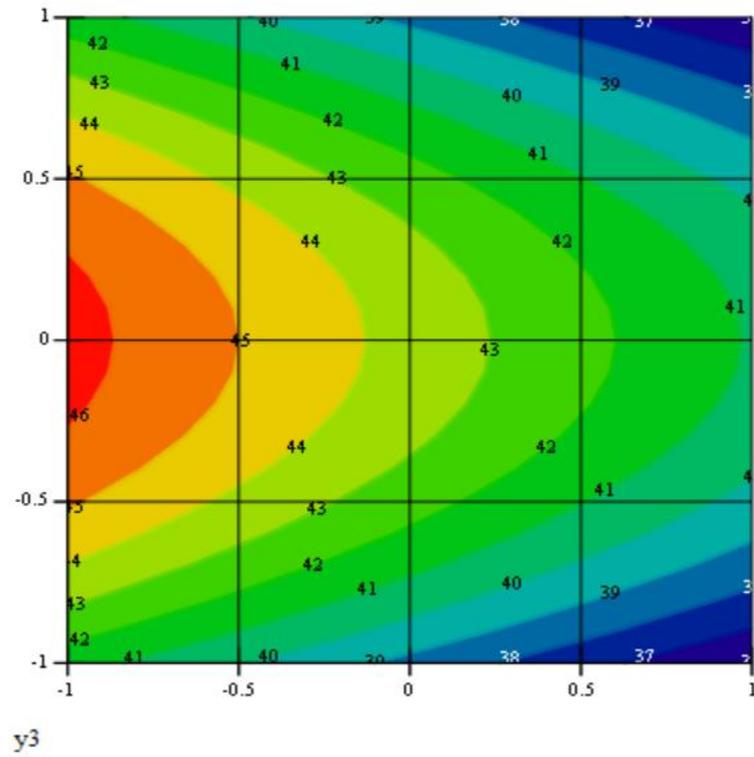


Рисунок 5.14 - Линии равного уровня для уравнения регрессии (5.4) при $x_3=0$

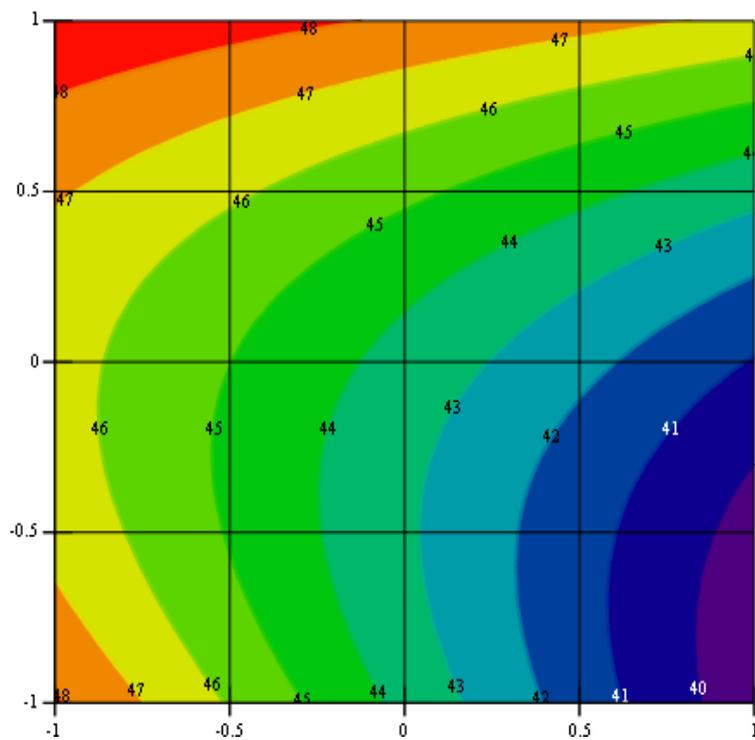


Рисунок 5.15 - Линии равного уровня для уравнения регрессии (5.4) при $x_3=0$

$$y_3(x_2, x_3) := 43.65 + 2.07 \cdot x_2 + 2.15 \cdot (x_2)^2 - 4.94 \cdot (x_3)^2$$

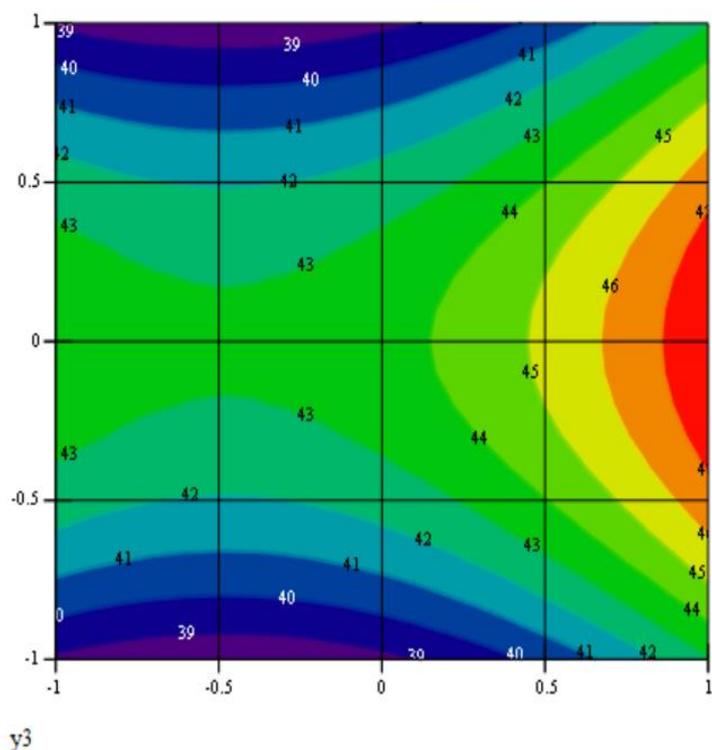


Рисунок 5.16 - Линии равного уровня для уравнения регрессии (5.4) при $x_1=0$

5.3.3 Влияние параметров измельчения на содержание целых зерен в измельченном продукте

Стандартами [105] установлено, что в комбикормах-концентратах, предназначенных для скармливания сельскохозяйственным животным, содержание целых зерен в продукции не должно превышать 1%. Однако, гранулометрический анализ проб материала, взятых от ряда широко применяемых в Алтайском крае измельчителей фуражного зерна, показал, что наличие целых зерен для данного оборудования колеблется в пределах от 1 до 3 %. Поэтому одной из задач проводимого эксперимента ставилось изучение влияния конструктивно-кинематических параметров установки на содержание целых зерен исходного материала в готовом продукте.

Итак, количество целых зерен в измельченном продукте должно быть минимальным или даже отсутствовать совсем (например, в дерти для молодняка

свиной). Поэтому в наших исследованиях данный показатель принят в качестве одного из критериев оптимальности.

Стандартная процедура проведения эксперимента и его обработки (приложение Ж) позволила получить очередное уравнение регрессии, которое имеет вид

$$y_4 = 2,38 + 1,98x_1 - 1,11x_2 - 1,37x_1x_2 + 0,62x_1x_3 - 0,68(x_2)^2, \% \quad (5.5)$$

Незначимыми оказались четыре члена изначального уравнения регрессии второго порядка. Коэффициент детерминации R^2 составил величину 0,901, что приемлемо для инженерных исследований.

Результаты эксперимента оказались вполне ожидаемыми. Видно (рисунок 5.14), что существует большая зона в плоскости параметров x_1 - x_2 , в которой мы констатируем отсутствие целых зерен в получаемой дерти. Однако эта зона быстро исчезает при изменении параметров процесса. Так, увеличение фактора x_1 , что можно достичь повышением подачи исходного зерна, приводит к появлению в измельченном продукте целых зерен. Их концентрация достигала в эксперименте 4%. В то же время увеличение момента инерции пассивной щеки (фактор x_2) приводит к повышению усилий на зерновки в дробильных камерах и, как следствие, к уменьшению числа целых зерен в получаемой дерти.

Касательно третьего фактора x_3 (относительного зазора между активной и пассивной щеками) следует констатировать, что в исследуемом диапазоне он оказывает весьма слабое влияние на количество целых зерен в измельченном продукте (Рисунок 5.18).

В результате анализа полученных уравнений регрессии и построенных на их основании двумерных сечений равного уровня было установлено, что варьирование данного фактора в установленных пределах не вызывает значительных изменений величины $Ц$, при этом исследуемая функция отклика имеет свое максимальное значение в точке ($x_1 = 1$, $x_2 = -1$). Дальнейшее движение

по осям в обе стороны приводит к снижению содержания целых зерен в измельченной корме (см. рисунок 5.18).

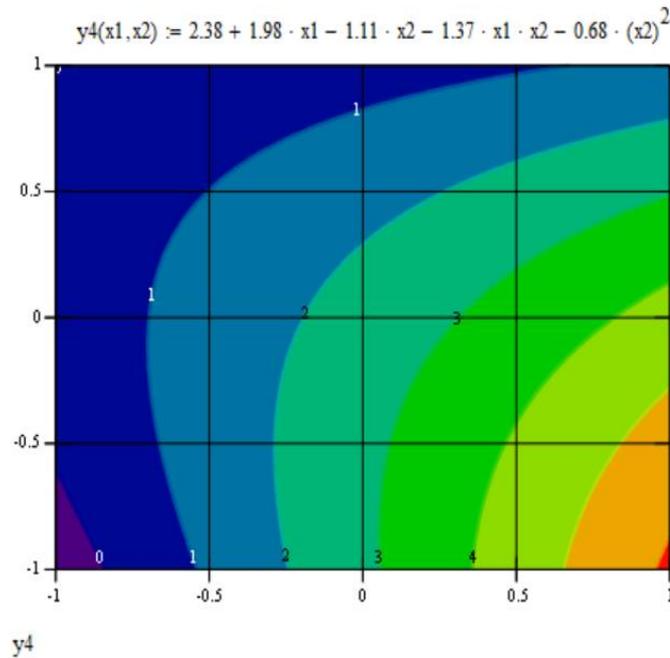


Рисунок 5.17- Линии равного уровня для уравнения регрессии (5.5) при $x_3=0$

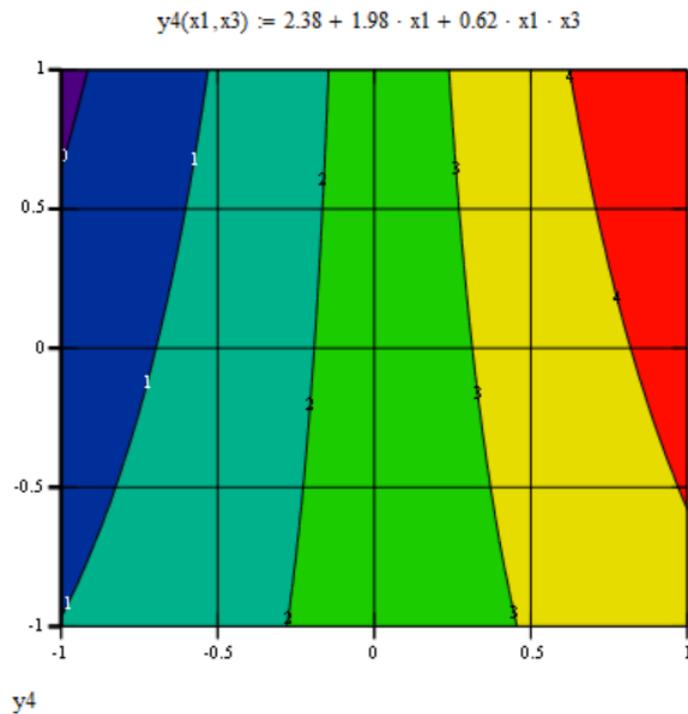


Рисунок 5.18- Линии равного уровня для уравнения регрессии (5.5) при $x_2=0$

5.3.4 Удельная энергоёмкость процесса измельчения зерна пшеницы с учетом достигнутой степени измельчения

Результаты эксперимента по определению удельной энергоёмкости процесса измельчения представлены в Приложении Ж. Для описания исследуемого процесса, эксперименты проводились на трех уровнях варьирования (таблица 4.10), в соответствии с планом-матрицей, представленной в таблице 4.11.

На основании методики обработки результатов, изложенной в главе 4, была получена регрессионная модель, в виде полинома второй степени, адекватно описывающая удельную энергоёмкость процесса с учетом достигнутой степени измельчения кормового зерна в вибрационном измельчителе.

$$y_1 = 2,90 + 0,30x_1 - 0,38x_2 - 0,20x_3 + 0,18x_1x_2 - 0,54(x_1)^2 + 0,32(x_2)^2 - 0,74(x_3)^2, \text{ Вт ч/(кг } \lambda). \quad (5.6)$$

Данное уравнение, как показывает регрессионный анализ, характеризуется коэффициентом детерминации $R^2=0,957$. Часть членов уравнения, характеризующая взаимодействие факторов, оказалась незначимой.

В результате анализа экспериментальных данных было установлено, что факторы x_1 и x_2 весьма сложным образом сказываются на энергоёмкости собственно процесса измельчения с учетом достигнутой степени измельчения (рисунок 4.19). Такая сложная картина линий равного уровня обусловлена наличием в уравнении регрессии (5.6) как линейных, так и квадратичных членов с факторами x_1 и x_2 . При этом знаки линейных и квадратичных членов по каждому фактору разные.

Обсуждаемая сложность появилась потому, что критерий оптимальности y_1 является комбинированным, включает как собственно энергетический показатель, так и достигаемую степень измельчения. Каждый из этих показателей в отдельности также зависит от факторов x_1 и x_2 .

Изучая рисунок 5.19, можно лишь констатировать, что для достижения малых значений удельных показателей по энергоёмкости фактор x_1 нужно уменьшать, а фактор x_2 – увеличивать.

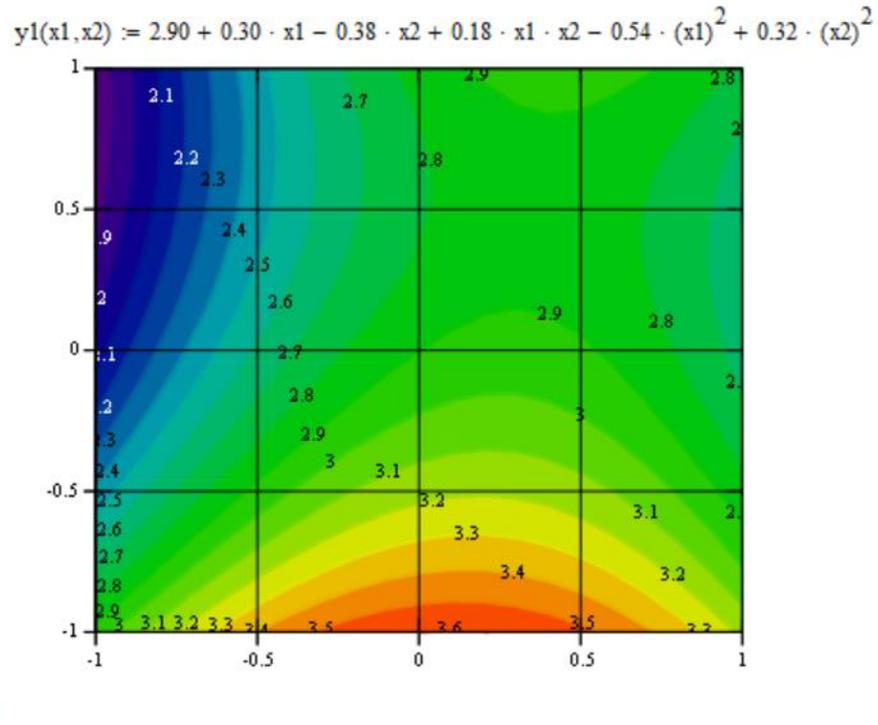


Рисунок 5.19- Линии равного уровня для уравнения регрессии (5.6) при $x_3=0$

Что же касается фактора x_3 , то его влияние несколько отличается от характера воздействия первых двух факторов. А именно: квадратичный член этого фактора по значимости превосходит линейный член. Поэтому по данному фактору выявляются граничные минимумы, имеющие место при $x_3=-1$ и $x_3=1$ (рисунок 5.20). Физически это можно объяснить тем, что при малом зазоре между щеками возрастает степень измельчения, а при большом – производительность вибрационного измельчителя. То и другое уменьшает энергоёмкости собственно процесса измельчения с учетом достигнутой степени измельчения, поскольку

$$\varepsilon = \frac{N}{Q\lambda}$$

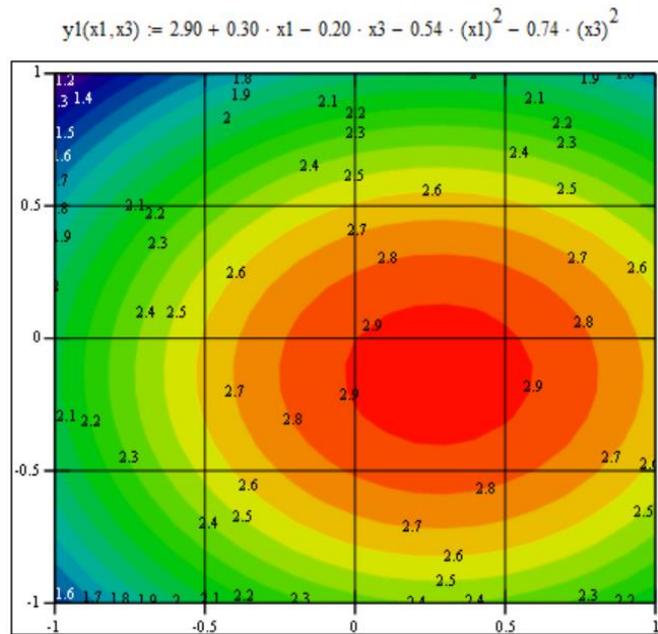


Рисунок 4.20 - Линии равного уровня для уравнения регрессии (5.6) при $x_2=0$

5.4 Экспериментальные закономерности вибрационного измельчения кормового ячменя

По той же методике, которая использовалась при измельчении кормовой пшеницы, были проведены эксперименты по изучению процесса вибрационного измельчения кормового ячменя (Приложение 3). В результате обработки экспериментальных данных (Приложение И) были получены уравнения регрессии, адекватно описывающие данный технологический процесс при использовании показателей:

- удельная энергоёмкость процесса измельчения зерна с учетом достигнутой степени измельчения

$$y_1 = 3,24 + 0,29x_1 - 0,37x_2 - 0,33x_3 + 0,22x_1x_2 + 0,25x_1x_3 - 0,72(x_1)^2 + 0,42(x_2)^2 - 0,57(x_3)^2, \text{ Вт ч/(кг } \lambda). \quad (5.7)$$

- модуль помола

$$y_2 = 1,74 + 0,31x_1 - 0,36x_2 - 0,08x_3 + 1,10x_1x_2 - 0,18(x_1)^2 + 0,13(x_2)^2 - 0,06(x_3)^2, \text{ мм}. \quad (5.8)$$

- коэффициент вариации модуля помола

$$y_3 = 45,59 - 2,84x_1 + 2,04x_2 + 1,10x_1x_2 + 1,90(x_2)^2 - 5,83(x_3)^2, \%. \quad (5.9)$$

- содержание целых зерен в измельченном продукте

$$y_4 = 2,53 + 1,83x_1 - 0,89x_2 - 1,10x_1x_2 - 0,85(x_2)^2, \% \quad (5.10)$$

Коэффициент детерминации R^2 составил по отдельным уравнениям от 0,928 до 0,970.

Изучение перечисленных уравнений регрессии и их графических представлений, сопоставление с соответствующими уравнениями и графиками по пшенице, позволяют утверждать о их качественном соответствии. В количественном отношении было отмечено следующее:

- повышение, в сравнении с измельчением пшеницы, удельной энергоёмкости процесса измельчения зерна с учетом достигнутой степени измельчения (с 2,90 до 3,24 Вт ч/(кг λ), если судить по средним показателям того и другого эксперимента);

- увеличение модуля размола с 1,55 мм (пшеница) до 1,74 мм (ячмень), если судить по осредненным показателям;

- незначительное повышение содержания целых зерен в измельченном продукте с 2,38 до 2,53%, а также коэффициента вариации модуля помола (в среднем по всему эксперименту с 43,65 до 45,59%).

Существенное изменение показателей удельной энергоёмкости процесса измельчения зерна с учетом достигнутой степени измельчения и модуля размола объясняются тем, что семена ячменя являются самыми прочными при воздействии как статической, так и динамической нагрузки [97]. Это сказывается и на работе вибрационного измельчителя.

5.5 Многокритериальная оптимизация процесса вибрационного измельчения кормового зерна

После обработки экспериментальной информации мы получили по процессу измельчения кормового зерна следующие уравнения регрессии:

1. для энергоёмкости собственно процесса измельчения с учетом достигнутой степени измельчения (Вт*ч/(кг*λ))

$$\mathcal{E} = \frac{N}{Q\lambda} = f_1(x_1, x_2, x_3),$$

где $N = N_T - N_{\text{хх}}$;

2. для модуля размола (мм)

$$M = f_2(x_1, x_2, x_3);$$

3. для коэффициента вариации модуля размола (%)

$$v = f_2(x_1, x_2, x_3);$$

4. для относительного (по массе) количества целых зерен (%)

$$\mathcal{C} = f_2(x_1, x_2, x_3)$$

Допустимые значения показателей качества измельченного продукта имеются в нормативных документах [105], а также обоснованы в работе [130].

На основании изложенного и полученных уравнений регрессии в среде Mathcad была создана программа оптимизации процесса измельчения кормового зерна (см Приложение К). В ее основе лежит встроенная функция *Minimize* и метод сопряженных градиентов (Рисунок 5.11). В перечень ограничений добавлены ограничения на изменение переменных в тех интервалах, в которых они варьировались в эксперименте.

Расчеты были проведены отдельно по кормовому ячменю и кормовой пшенице. Наиболее прочной культурой при измельчении является ячмень. Поэтому начнем анализ оптимизации именно с этой культуры (см. Приложение И).

Результаты оптимизации процесса измельчения по кормовому ячменю таковы (см. Рисунок 5.21):

$$x_1 = -0,231; x_2 = 0,827; x_3 = 1.$$

ФУНКЦИЯ ЦЕЛИ

$$\mathcal{E}(x_1, x_2, x_3) := 3.24 + 0.29 \cdot x_1 - 0.37 \cdot x_2 - 0.33 \cdot x_3 + 0.22 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.25 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0.72 \cdot (x_1)^2 + 0.42 \cdot (x_2)^2 - 0.57 \cdot (x_3)^2$$

ТОЧКИ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ

$$x_1 := 1 \quad x_2 := 0 \quad x_3 := 0$$

Given ОГРАНИЧЕНИЯ

$$1.1 \leq 1.74 + 0.31 \cdot x_1 - 0.36 \cdot x_2 - 0.08 \cdot x_3 + 1.10 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0.18 \cdot (x_1)^2 + 0.13 \cdot (x_2)^2 - 0.06 \cdot (x_3)^2 \leq 1.8$$

$$0 \leq 45.59 - 2.84 \cdot x_1 + 2.04 \cdot x_2 + 1.10 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1.90 \cdot (x_2)^2 - 5.82 \cdot (x_3)^2 \leq 50$$

$$0 \leq 2.53 + 1.83 \cdot x_1 - 0.89 \cdot x_2 - 1.10 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0.85 \cdot (x_2)^2 \leq 1$$

$$-1 \leq x_1 \leq 1 \quad -1 \leq x_2 \leq 1 \quad -1 \leq x_3 \leq 1$$

ВСТРОЕННАЯ ФУНКЦИЯ MATHCAD ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ

$$\text{opt}\mathcal{E}(x_1, x_2, x_3) := \text{Minimize}(\mathcal{E}, x_1, x_2, x_3)$$

РЕЗУЛЬТАТ ОПТИМИЗАЦИИ

$$\text{opt}\mathcal{E}(x_1, x_2, x_3) = \begin{pmatrix} -0.231 \\ 0.827 \\ 1 \end{pmatrix}$$

ПРОВЕРКА ОГРАНИЧЕНИЙ

$$x_1 := -0.231 \quad x_2 := 0.827 \quad x_3 := 1$$

$$1.55 + 0.34 \cdot x_1 - 0.37 \cdot x_2 - 0.07 \cdot x_3 - 0.12 \cdot (x_1)^2 + 0.12 \cdot (x_2)^2 + 0.13 \cdot (x_3)^2 = 1.301$$

$$43.65 - 2.73 \cdot x_1 + 2.07 \cdot x_2 + 1.67 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2.15 \cdot (x_2)^2 - 4.94 \cdot (x_3)^2 = 42.204$$

$$2.38 + 1.98 \cdot x_1 - 1.11 \cdot x_2 - 1.37 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.62 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0.68 \cdot (x_2)^2 = 0.658$$

ЗНАЧЕНИЕ ФУНКЦИИ ЦЕЛИ В ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЧКЕ

$$\mathcal{E}(x_1, x_2, x_3) = 2.116$$

Рисунок 5.21 – Программа *Mathcad* для оптимизации процесса вибрационного измельчения кормового ячменя

Как видно, значение третьего фактора находится на границе проведенного эксперимента $x_3=1$.

Проверим, как выполняются ограничения при найденных значениях факторов. В разработанной программе (см. Рисунок 5.11) этому соответствует фрагмент «ПРОВЕРКА ОГРАНИЧЕНИЙ». Расчет показывает, что все три ограничения соблюдаются. Это означает, что качество полученной дерти отвечает установленным требованиям:

- модуль помола $M=1,30$ мм;
- коэффициент вариации модуля помола $v=42,20\%$;
- содержание целых зерен $C=0,66\%$.

Проведем подобную процедуру оптимизации процесса измельчения, но для кормовой пшеницы (Рисунок 5.22 и Приложение Ж).

Как видно, здесь получили иную оптимальную точку в многомерном факторном пространстве:

$$x_1 = -0,906; \quad x_2 = 0,311; \quad x_3 = 1.$$

Анализ выполнения ограничений в полученной оптимальной точке показывает, что все они выполняются, т. е. качество получаемой дерти соответствует установленным требованиям. Результат по содержанию в продукте целых зерен $\text{Ц} = -5.609 \cdot 10^{-4}$ можно считать машинным нулем.

ФУНКЦИЯ ЦЕЛИ

$$\text{Э}(x_1, x_2, x_3) := 2.90 + 0.30 \cdot x_1 - 0.38 \cdot x_2 - 0.20 \cdot x_3 + 0.18 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0.54 \cdot (x_1)^2 + 0.32 \cdot (x_2)^2 - 0.74 \cdot (x_3)^2$$

ТОЧКИ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ

$$x_1 := 1 \quad x_2 := 1 \quad x_3 := 0$$

Given ОГРАНИЧЕНИЯ

$$1.1 \leq 1.55 + 0.34 \cdot x_1 - 0.37 \cdot x_2 - 0.07 \cdot x_3 - 0.12 \cdot (x_1)^2 + 0.12 \cdot (x_2)^2 + 0.13 \cdot (x_3)^2 \leq 1.8$$

$$0 \leq 43.65 - 2.73 \cdot x_1 + 2.07 \cdot x_2 + 1.67 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2.15 \cdot (x_2)^2 - 4.94 \cdot (x_3)^2 \leq 50$$

$$0 \leq 2.38 + 1.98 \cdot x_1 - 1.11 \cdot x_2 - 1.37 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.62 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0.68 \cdot (x_2)^2 \leq 1$$

$$-1 \leq x_1 \leq 1 \quad -1 \leq x_2 \leq 1 \quad -1 \leq x_3 \leq 1$$

ВСТРОЕННАЯ ФУНКЦИЯ MATHCAD ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ

$$\text{optЭ}(x_1, x_2, x_3) := \text{Minimize}(\text{Э}, x_1, x_2, x_3)$$

РЕЗУЛЬТАТ ОПТИМИЗАЦИИ

$$\text{optЭ}(x_1, x_2, x_3) = \begin{pmatrix} -0.906 \\ 0.311 \\ 1 \end{pmatrix}$$

ПРОВЕРКА ОГРАНИЧЕНИЙ

$$x_1 := -0.906 \quad x_2 := 0.311 \quad x_3 := 1$$

$$1.55 + 0.34 \cdot x_1 - 0.37 \cdot x_2 - 0.07 \cdot x_3 - 0.12 \cdot (x_1)^2 + 0.12 \cdot (x_2)^2 + 0.13 \cdot (x_3)^2 = 1.1$$

$$43.65 - 2.73 \cdot x_1 + 2.07 \cdot x_2 + 1.67 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2.15 \cdot (x_2)^2 - 4.94 \cdot (x_3)^2 = 41.565$$

$$2.38 + 1.98 \cdot x_1 - 1.11 \cdot x_2 - 1.37 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.62 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0.68 \cdot (x_2)^2 = -5.609 \times 10^{-4}$$

ЗНАЧЕНИЕ ФУНКЦИИ ЦЕЛИ В ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЧКЕ

$$\text{Э}(x_1, x_2, x_3) = 1.107$$

Рисунок 5.22 – Программа *Mathcad* для оптимизации процесса вибрационного измельчения кормового ячменя

Возникает далее вопрос о том, как использовать полученные данные при проектировании производственного образца вибрационного измельчителя. Для этого открываются два пути:

1. Предусмотреть регулировки измельчителя с тем, чтобы каждый раз настраивать его на оптимальный режим при переходе на измельчение зерна новой кормовой культуры;
2. Изначально настроить измельчитель на переработку кормового ячменя, как самой прочной кормовой культуры. При этом постулируется, что, если измельчитель справляется с измельчением зерна ячменя, то и другие культуры будут измельчены.

Проверим последнее утверждение, для чего в программе оптимизации пшеницы в ограничения подставим оптимальные параметры измельчения ячменя (Рисунок 5.23).

ПРОВЕРКА ОГРАНИЧЕНИЙ

$$x1 := -0.231 \quad x2 := 0.827 \quad x3 := 1$$

$$1.55 + 0.34 \cdot x1 - 0.37 \cdot x2 - 0.07 \cdot x3 - 0.12 \cdot (x1)^2 + 0.12 \cdot (x2)^2 + 0.13 \cdot (x3)^2 = 1.301$$

$$43.65 - 2.73x1 + 2.07 \cdot x2 + 1.67 \cdot x1 \cdot x2 + 2.15 \cdot (x2)^2 - 4.94 \cdot (x3)^2 = 42.204$$

$$2.38 + 1.98 \cdot x1 - 1.11 \cdot x2 - 1.37x1 \cdot x2 + 0.62 \cdot x1 \cdot x3 - 0.68 \cdot (x2)^2 = 0.658$$

ЗНАЧЕНИЕ ФУНКЦИИ ЦЕЛИ В ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЧКЕ

$$\Xi(x1, x2, x3) = 1.732$$

Рисунок 5.23 – Программа *Mathcad* для проверки качества вибрационного измельчения пшеницы с оптимальными параметрами измельчения кормового ячменя

Как видно из представленных результатов, качество получаемой дерти сохраняется. При этом, однако, несколько увеличиваются энергозатраты. Тем не менее этот вариант мы и рекомендуем для производственной реализации. Первый вариант должен быть отброшен уже по той причине, что он усложняет

конструкцию измельчителя, а оптимальную настройку по каждой зерновой культуре вряд ли будет проводить обслуживающий персонал.

В связи с последним обстоятельством найденную оптимальную точку для ячменя с координатами

$$x_1 = -0,231; x_2 = 0,827; x_3 = 1$$

мы и рекомендуем в качестве компромиссной. В этом случае ее правильнее называть не оптимальной, а рациональной [127].

Перейдем далее от кодированных значений рациональных факторов к их натуральным значениям. Последними являются критерии

$$\pi_1 = \frac{Q}{\rho d l A \omega} \text{ («A»),} \quad \pi_2 = \frac{l \omega^2}{\sigma l A^2} \text{ («B»),} \quad \pi_3 = \frac{b}{d} \text{ («C»).$$

Для перевода используем формулу

$$\pi = x * \Delta \pi + \pi_0,$$

где $\Delta \pi$ – полуинтервал варьирования критерия подобия;

π_0 – средний уровень варьирования критерия подобия.

Расчет по этой формуле дает результат:

$$\pi_1 * = 0,014; \pi_2 * = 95,68; \pi_3 * = 1,50.$$

Это и есть искомые рациональные параметры процесса вибрационного измельчения кормового зерна.

Энергоёмкость собственно процесса измельчения ячменя с учетом достигнутой степени ее измельчения при рациональных параметрах составляет $2,116 \text{ Вт} * \text{ч} / (\text{кг} * \lambda)$ (см. Рисунок 5.13). В привычных для сельскохозяйственного производства единицах это составляет $2,116 \text{ кВт} * \text{ч} / (\text{т} * \lambda)$, в системе СИ – $7,618 \text{ кДж} / (\text{кг} * \lambda)$.

Для пшеницы этот показатель составляет

$$\mathcal{E} = 1,732 \text{ Вт} * \text{ч} / (\text{кг} * \lambda) = 1,732 \text{ кВт} * \text{ч} / (\text{т} * \lambda) = 5,196 \text{ кДж} / (\text{кг} * \lambda).$$

Таким образом, энергоемкость измельчения пшеницы на рациональных режимах работы вибрационного измельчителя практически на треть меньше энергоемкости измельчения ячменя $(7,618-5,196)/7,618=0,318$ (31,8%).

Однако, если не учитывать степень измельчения зерна, то результаты будут иными. Поскольку при оптимизации получили для ячменя $M=1,3$ мм, то степень измельчения λ составит 3,29. Соответственно для пшеницы эти величины принимают значения: $M=1,1$ мм; $\lambda=3,62$. Энергоемкости процесса без учета степени измельчения составят: ячмень – 6,96 кВт*ч/т, пшеница – 6,27 кВт*ч/т.

Это практически наполовину меньше, чем энергоемкость горизонтальных молотковых дробилок и классических плющилок (Рисунок 5.24), Снижение энергоемкости по сравнению с вертикальными молотковыми дробилками составляет 26,7% %.

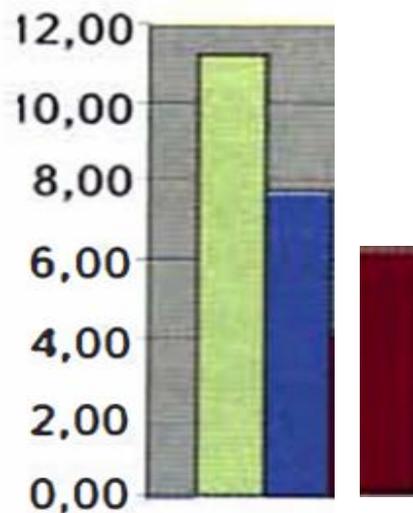


Рисунок 5.24.- Сопоставление энергоемкости (кВт·ч/т)измельчения кормового зерна в горизонтальной (■) и вертикальной (■) дробилках (данные фирмы «Бюлер» [146]) и вибрационном измельчителе (■)

Для рационального режима работы вибрационного измельчителя кормового зерна введенный нами ξ - коэффициент соответствия размеров частиц дерти установленным требованиям – составил для КРС 0,713. Это означает, что 71.3% частиц дерти имеет нужный размер.

Выводы по главе 5

1. Экспериментально установлено, что гранулометрический состав дерти, получаемой в вибрационном измельчителе, подчиняется нормальному закону распределения размеров частиц. Это указывает на уменьшение содержания зерновой пыли, в сравнении с продуктом молотковых дробилок, имеющим асимметричное логарифмически-нормальное распределение. Кроме того, при влажности зерна около (14-14,5)% структура получаемого продукта на (75-85)% по массе представляет собой пластинки (хлопья). Это так называемое сухое плющение кормового зерна.

2. Отсеивающий эксперимент показал, что существенными для процесса вибрационного измельчения кормового зерна являются факторы, представленные в виде критериев подобия: $\pi_1 = \frac{Q}{\rho d l A \omega}$ («А»), $\pi_2 = \frac{l \omega^2}{\sigma l A^2}$ («В»), $\pi_3 = \frac{b}{d}$ («С»).

3. Основной эксперимент, проведенный по плану Бокса-Бенкена, позволил получить уравнения регрессии для основных показателей процесса вибрационного измельчения пшеницы и ячменя. Этот экспериментальный материал стал основой для оптимизации исследуемого процесса. Изначально многокритериальная задача оптимизации была преобразована в однокритериальную, в которой критерий $\Xi(x_1, x_2, x_3)$ был признан главным, а критерии $M(x_1, x_2, x_3)$, $v(x_1, x_2, x_3)$, $\zeta(x_1, x_2, x_3)$ были переведены в ограничения. Сформулированная задача оптимизации позволила найти оптимальные значения факторов по каждому виду кормового зерна. Компромиссная задача привела к отысканию рациональных значений факторов: $x_1 = -0,231$; $x_2 = 0,827$; $x_3 = 1$. Этим кодированным значениям соответствуют натуральные значения критериев: $\pi_1^* = 0,014$; $\pi_2^* = 95,68$; $\pi_3^* = 1,50$. Энергоемкость измельчения ячменя при этом составляет $7,618$ кДж/(кг*λ), пшеницы - $5,196$ кДж/(кг*λ). Качество полученной дерти при этом соответствует нормативным документам. Для рационального режима работы вибрационного измельчителя кормового зерна введенный нами ζ - коэффициент соответствия размеров частиц дерти установленным требованиям – составил для КРС 0,713.

Это означает, что 71.3% частиц дерти имеет нужный размер. Для молотковых дробилок этот показатель не превышает 45-50%.

6 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

6.1 Общие положения

Целесообразность внедрения новой машины в производство оценивается ее сравнительной экономической эффективностью.

Показатели сравнительной экономической эффективности включают в себя, согласно ГОСТу 34393-2018 «Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки», следующий перечень [48]:

- годовую экономию совокупных затрат денежных средств в сравнении с аналогом;
- снижение себестоимости i -го вида работы;
- срок окупаемости капиталовложений;
- снижение потребности в обслуживающем персонале (механизаторах и вспомогательных рабочих);
- снижение потребности в моторном топливе (электроэнергии, газе).

В основе перечисленных показателей лежит расчет совокупных затрат. *Совокупные затраты (себестоимость выполнения работы)* – это сумма денежных средств на выполнение отдельной (i -й) механизированной работы, включающая в себя прямые эксплуатационные затраты, издержки средств от изменения количества и качества продукции и на охрану окружающей среды.

Прямые эксплуатационные затраты денежных средств, приходящиеся на выполнение единицы наработки вида работы $Z_{экс}$, руб/т, вычисляют по формуле

$$Z_{экс} = Z_m + Z_э + Z_p + A + И, \quad (6.1)$$

где Z_m — затраты денежных средств на оплату труда обслуживающего персонала, руб/т;

$Z_э$ — затраты денежных средств на оплату электроэнергии, руб/т;

Z_p - затраты денежных средств на ремонт и техническое обслуживание, руб/т;

A — амортизационные отчисления, руб/т;

$И$ — издержки денежных средств на вспомогательные технологические материалы, руб/т.

Методика расчета перечисленных составляющих прямых эксплуатационных затрат, а также издержек от изменения количества и качества продукции и на охрану окружающей среды, изложена в работах [48,102].

В основе экономической оценки техники лежит сравнительный принцип испытаний — показатели экономической оценки новой техники сравнивают с показателями базового варианта (далее — аналога).

За аналог для сравнения принимают лучшую серийно выпускаемую в государстве технику, а при ее отсутствии — лучший зарубежный аналог, который преобладает в составе зональных машинных технологий в конкретном государстве [48].

При сравнительной экономической оценке специализированной техники расчет показателей проводят на годовой фактический объем работ новой техники, а для определения показателей ресурсосбережения — на годовой условный объем. По стационарным комплексам — на годовой фактический объем произведенной продукции по конкретной культуре. *При выполнении научно-исследовательских работ* — на объем работ с учетом организационно-правовых форм использования техники у производителей сельскохозяйственной продукции различных форм собственности (агрофирм, агрохолдингов, коллективных сельскохозяйственных предприятий, фермерских хозяйств, машинно-технологических станций).

Формулы для расчета всего перечня показателей сравнительной экономической оценки новой техники, а также рекомендуемая форма соответствующих таблиц приведены в упомянутых источниках [48,102]. Эти документы и были положены в основу приведенного ниже расчета.

6.2 Расчет показателей сравнительной экономической эффективности вибрационного измельчителя кормового зерна

В качестве базовой модели для сравнения была принята наиболее совершенная из молотковых дробилок, предназначенных для сельского хозяйства,

дробилка с вертикальным расположением барабана. В ООО "Глобал Инжиниринг» (г. Барнаул) она выпускается под маркой ДМВ-2 (дробилка молотковая вертикальная производительностью 2 т/час). Для базового варианта расчет экономической эффективности проводился на основании данных ООО «Глобал Инжиниринг», а для опытно - производственного образца вибрационного измельчителя на основании данных, полученных в результате испытаний вибрационного измельчителя в Алтайском ГАУ и опытно-конструкторских работ в ООО «Еврогруп - Сибирь» (Таблица 6.1).

Таблица 6.1 – Исходные данные для расчета сравнительной экономической эффективности измельчителей

Показатели	Молотковая дробилка ДМВ-2	Вибрационный измельчитель
Часовая производительность, т/ч	2,0	2,0
Установленная мощность, кВт	15	5,5 2=11
Удельный расход энергии, кВт·ч/т	7,5	5,5*
Годовой фонд времени, ч	1460	1460
Годовая выработка, т	2920	2920
Количество обслуживающего персонала, чел	1	1
Балансовая стоимость, руб.	160000	100000
Масса, кг	500	400

*При подготовке дерти для крс

Для удобства проведения расчетов и большей наглядности полученных данных, результаты представлены в Таблицах 6.2-6.4, форма которых рекомендована ГОСТ 34393-2018 «Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки».

Таким образом, годовая экономия эксплуатационных затрат от применения вибрационного измельчителя по сравнению с базовым вариантом такой же производительности ДМВ-2 составила около 83800 рублей. Экономия достигнута за счет снижения энергоемкости и металлоемкости процесса измельчения кормового зерна.

Таблица 6.2 – Общие затраты труда

Показатели	Молотковая дробилка ДМВ-2	Вибрационный измельчитель
Годовые затраты труда на обслуживание основного процесса, чел.-ч.	1460	1460
Годовые затраты труда на техобслуживание и ремонт, чел.-ч.	183,6	183,6
Итого	1643,6	1643,6

Таблица 6.3 – Эксплуатационные затраты

Показатели	ДМВ-2		Вибрационный измельчитель	
	удельные затраты, руб/т	годовые затраты, руб	удельные затраты, руб/т	годовые затраты, руб
1. Оплата труда с начислениями	112,5	328500	112,50	328500
2. Амортизационные отчисления	38,10	111252	23,80	69496
3. Техобслуживание и ремонт	14,15	41310	14,15	41310
4. Электроэнергия (5,76 руб/кВт ч, август 2021 г)	43,20	126144	31,68	84096
Итого	207,95	607206	182,13	523402

Здесь необходимо отметить, что помимо экономии эксплуатационных затрат, связанных со снижением удельной энерго- и металлоемкости конструкции, использование вибрационного измельчителя позволяет:

- улучшить усвояемость корма животными, вследствие выравнивания гранулометрического состава полученного продукта и значительного уменьшения содержания в нем пылевидной фракции (7-10% в вибрационном измельчителе против 20-30% в ДМВ-2 при одинаковом модуле помола;

Таблица 6.4 – Показатели экономической эффективности использования вибрационного измельчителя

Показатели	ДМВ-2	Вибрационный измельчитель
1. Прямые эксплуатационные затраты, руб.	607206	523402
2. Капиталовложения, руб.	160000	100000
3. Годовая экономия эксплуатационных затрат, руб.		83804
4. Удельная годовая экономия эксплуатационных затрат, руб/т		28,7
5. Общие затраты труда, чел.·ч	1643,6	1643,6
6. Удельные затраты труда, чел.·ч/т	0,56	0,56
7. Годовая экономия потребления электроэнергии, кВт		5840
8. Удельная годовая экономия потребления электроэнергии, кВт·ч/т		2,0
9. Металлоемкость конструкции, кг/(т/ч)	80	50

- улучшить условия работы обслуживающего персонала вследствие уменьшения запыленности воздуха;

- уменьшить потери корма при погрузочно-разгрузочных работах, транспортировке и его раздаче, вследствие уменьшения содержания легко уносимых частиц корма.

Однако, вследствие отсутствия надежных данных и методик учета положительных эффектов, они не учтены в дальнейших расчетах экономической эффективности вибрационного измельчителя и окончательных результатах (Таблица 6.5).

Таким образом, использование в реальном производстве вибрационного измельчителя вместо молотковой дробилки с вертикальным валом позволяет снизить потребность в электроэнергии на 26,7%. Себестоимость производства 1 т зерновой дерти снижается на 12,4%.

Таблица 6.5 — Ожидаемые показатели сравнительной экономической эффективности на условный объем работы

Наименование показателя	Значение показателя по новой технике
Годовая экономия совокупных затрат денежных средств, руб	83800
Снижение себестоимости выполнения работы, %	12,4
Снижение потребности в обслуживающем персонале (операторах и вспомогательных рабочих), %	0
Снижение потребности в электроэнергии, %	26,7

Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения вибрационного измельчителя на фермах крупного рогатого скота Сибирского федерального округа составляет около 23 млн рублей.

6.3 Реализация результатов исследования

Научно-технические решения по повышению энергоэффективности технологических измельчающих машин на базе использования вибраций были реализованы сначала в лабораторных образцах зерноизмельчителей. Их испытания показали стабильную и надежную работу, снижение энергоемкости и материалоемкости. Опыт также подтверждает эффект одновременной самосинхронизации дебалансных вибровозбудителей и наличия антирезонанса рабочих органов, реализуемого в предложенной нами конструкции вибрационного измельчителя. Тем самым устраняется главный недостаток вибрационных технологических машин – быстрый выход из строя вибровозбудителей и других узлов устройства. Полученные критерии подобия позволяют строить линейку вибрационных измельчителей разной производительности со сходными технико-экономическими показателями.

Использование указанных результатов исследования позволяет создать высокоэффективные энергосберегающие вибрационные машины для измельчения

кормового зерна, соответствующие самым современным требованиям. Появляется возможность переоснастить отрасли сельского хозяйства и пищевой промышленности, использующие измельчение зерна, более совершенными высокотехнологичными машинами. Аналогов зерноизмельчающих вибромашин, выпускаемых зарубежными фирмами, не имеется, что дает возможность в короткий срок повысить технический уровень процессов измельчения кормового зерна в РФ.

Для реализации результатов научной работы на производстве в настоящее время разработаны документы и проведены следующие мероприятия:

- опубликованы научно обоснованные рекомендации по созданию новых зерноизмельчителей вибрационного типа, включающие их технологические схемы и основные положения расчетной методики определения их параметров (утверждены Министерством сельского хозяйства Алтайского края от 17 мая 2023 года, см. Приложение Л). Рекомендации получили положительные отзывы от государственных органов Новосибирской и Омской областей, Республики Алтай (см. Приложение Л);

- проведено эскизное проектирование (прототипирование), изготовление и испытание вибрационного измельчителя кормового зерна производительностью 200-250 кг/час (см. Рисунки 4.8 и 4.9);

- при использовании наших разработок ООО "Глобал Инжиниринг" (г. Барнаул) разработало экспериментальный образец вибрационного измельчителя кормового зерна для фермерских и подсобных хозяйств производительностью 300 кг/час (Рисунок 6.1), предусматривающий проведение ОКР по дальнейшей отработке различных схем вибрационных измельчителей. В дальнейшем предусматривается разработка измельчителя производительностью 3 т/час (см. Приложение Л);

- ООО «СТ-Проект» (г. Ставрополь) приступило к проектированию и изготовлению вибрационного измельчителя кормового зерна производительностью 2 - 3 т/час (см. Приложение Л).



Рисунок 6.1 - Вибрационный измельчитель кормового зерна
производительностью 300 кг/час (разработка ООО "Глобал Инжинринг",
г. Барнаул)

Материалы исследований используются в учебном процессе (см. Приложение Л):

- в ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет» по дисциплине: «Компьютерное моделирование технологических процессов АПК»;
- в ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет» по дисциплинам: «Современные проблемы науки и производства в агроинженерии», «Проектирование технологического оборудования для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Констатировано, что используемые в сельском хозяйстве при измельчении кормового зерна молотковые дробилки имеют существенные недостатки, обусловленные высокой энергоемкостью (до 15 кВт*ч/т) и наличием в измельченном продукте большого количества зерновой пыли (до 30%). Анализ уровня техники и технологии измельчения кормового зерна показал, что перспективным направлением является способ разрушения слоя зерна сжатием с приложением вибрационной нагрузки. В устройствах, реализующих данный способ, сведено к минимуму трение частиц корма между собой и о рабочие органы, а последние практически не генерируют паразитный воздушный поток. Однако небольшой объем теоретических и экспериментальных исследований в области разработки вибрационных измельчителей зерна не позволяет пока надеяться на широкое применение этих машин в животноводстве. Это диктует необходимость дальнейшего рассмотрения задачи, исходя из современных методов и возможностей.

2. Для совокупности (множества) конструкций вибрационных измельчителей кормового зерна составлены морфологическая таблица и морфологическая матрица, включающие около полумиллиона вариантов исполнения данной машины. На основе морфологического подхода был проведен анализ известных конструкций измельчителей и синтезированы новые устройства (патенты №№ 2262984, 2688424, 2759864, 2787723), обеспечивающие повышение дробящего усилия и производительности измельчителей, а также снижение энергоемкости процесса измельчения.

3. Определен механизм измельчения кормовых зерен при вибрационной нагрузке в виде малоциклового усталости материала. Сделан вывод, что «инкубационный» период, когда идет скрытое трещинообразование в зерновке, очень важен с энергетической точки зрения. Именно он определяет (до 95%) общие затраты на измельчение фуражного зерна. Механико-технологическое объяснение этого факта дано при помощи реологической модели зерновки. Модель включает набор элементов Сен-Венана, упругие и вязкие элементы.

Показано, что зерновки в рабочих полостях вибрационных измельчителей испытывают статическое нагружение, в отличие от динамического режима в молотковых зернодробилках. Это предопределяет снижение энергоемкости процесса измельчения кормового зерна.

4. Установлено, что рабочие органы вибрационного измельчителя должны быть выполнены с плоскими поверхностями, а зазор между ними - уменьшаться по мере продвижения дробимого материала вниз. Эта схема обеспечивает простое конструктивное исполнение вибрационных рабочих органов, дробление зерновки за несколько десятков вибрационных воздействий и, как следствие, высокую производительность машины. Эти исследования также положены в основу предложенных конструкций измельчителей зернового материала.

5. Анализ всей совокупности информации по вибрационным измельчителям, разработанным в различных отраслях хозяйства, позволило сформулировать основные требования к динамическим системам этих машин. В результате сравнения трех динамических схем измельчителей кормового зерна по введенным критериям был отобран вариант измельчителя с динамической схемой, построенной по варианту, предусматривающему двойной самосинхронизированный вибропривод и режим антирезонанса рабочих органов. Компьютерные и натурные эксперименты показывают работоспособность данной динамической схемы измельчителя, выполненного по схеме двойного маятника, с получением достаточных размахов колебаний рабочих органов и самосинхронизацией вибровозбудителей. При этом интенсивно раскачивается пассивный маятник, а активный маятник, на котором установлены вибровозбудители, имеет минимальные колебания с амплитудой около 0,05 рад. Взаимные относительные колебания, от которых и зависит процесс измельчения, сохраняют большую величину - 0,2 рад. Соответственно снижаются затраты на холостой ход и повышается надежность устройства в целом. Тем самым устраняется главный недостаток вибрационных технологических машин - быстрый выход из строя вибровозбудителей и других узлов устройства.

6. Установлено, что структура измельченного продукта существенно отличается от соответствующих продуктов, полученных в молотковой дробилке. При влажности (14,0-14,5) % большинство ((75-85) % по массе) получаемых частиц имеет форму пластинок, характерных для процесса плющения. Остальная часть продукта содержит бесформенные частицы, характерные для работы молотковой дробилки. Экспериментально установлено, что гранулометрический состав дерти, получаемой в вибрационном измельчителе, подчиняется нормальному закону распределения размеров частиц. Это указывает на уменьшение до 7 – 10% содержания зерновой пыли, в то время как продукт молотковых дробилок, имеющий асимметричное логарифмически-нормальное распределение размера частиц, содержит до 30% зерновой пыли. Предложен критерий соответствия данного измельчителя или его режима настройки зоотехническим требованиям (для определенного вида животных), показывающий долю продукта по массе, соответствующего требованиям, от общего его количества.

7. Отсеивающий эксперимент показал, что существенными для процесса вибрационного измельчения кормового зерна являются факторы, представленные в виде критериев подобия: $\pi_1 = \frac{Q}{\rho d l A \omega}$, $\pi_2 = \frac{l \omega^2}{\sigma l A^2}$, $\pi_3 = \frac{b}{d}$. Основной эксперимент, проведенный по плану Бокса-Бенкена, позволил получить уравнения регрессии для основных показателей процесса вибрационного измельчения пшеницы и ячменя, характеризующих энергетическую и качественную стороны работы измельчителей. На основе уравнений регрессии проведена оптимизация исследуемого процесса. Установлены рациональные значения критериев подобия: $\pi_1^* = 0,014$; $\pi_2^* = 95,68$; $\pi_3^* = 1,50$. Энергоемкость измельчения ячменя при этом составляет 7,618 кДж/(кг*λ), пшеницы - 5,196 кДж/(кг*λ). Качество полученной дерти соответствует нормативным документам. Для рационального режима работы вибрационного измельчителя кормового зерна введенный нами ξ - коэффициент соответствия размеров частиц дерти установленным требованиям составил для КРС 0,713. Это

означает, что 71.3% частиц дерти имеет нужный для животных размер. Для молотковых дробилок этот показатель не превышает 45-50%.

8. Использование в реальном производстве вибрационного измельчителя вместо молотковой дробилки позволяет снизить, как показывают расчеты, потребность в электроэнергии на 26,7%. Себестоимость производства 1 т зерновой дерти снижается на 12,4%. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения вибрационного измельчителя на фермах крупного рогатого скота Сибирского федерального округа составляет около 23 млн рублей.

Рекомендации производству

Результаты выполненных исследований, а также патент № 2688424 «Измельчитель зернового материала» рекомендуются для использования предприятиями, выпускающими кормоприготовительную технику.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшие научные исследования должны быть направлены на изучение способов увеличения толщины зернового слоя, обрабатываемого вибрационными рабочими органами, что позволит увеличить производительность измельчителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдюкаева, А. Ф. Оптимизация энергозатрат процесса измельчения зернового сырья/А. Ф. Абдюкаева, П. И. Огородников //Современные проблемы науки и образования. – 2007. – № 1. - Режим доступа: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=266>.
2. Алабужев, П. М. Теория подобия и размерностей. Моделирование/ П. М.: Алабужев и [др.]. - М.: Высшая школа, 1968.- 208 с.
3. Алешкин, В. Р. Повышение эффективности процесса и технических средств механизации измельчения кормов: дисс...д-ра техн. наук: 05.20.01/ Алешкин Владимир Романович. - Киров, 1995.- 412 с.
4. Алешкин, А. В. Методы математического моделирования процессов разделения и измельчения растительных материалов для повышения эффективности функционирования технических средств послеуборочной обработки зерна и кормоприготовления: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.20.01/Алешкин Алексей Владимирович. - Киров, 2001. – 492 с.
5. Асташев, В. К. Динамические принципы разработки виброударных машин/В. К. Асташев, В. Л. Крупенин. //Вестник научно-технического развития.- № 5 (129), 2018.- С. 3-8.
6. Афанасьев, В. А. Руководство по технологии комбикормовой продукции с основами кормления животных/ В. А. Афанасьев. - . Воронеж, 2007.- 389 с.
7. Афанасьев, В. А. Современные тенденции развития комбикормовой промышленности России/Научное обеспечение развития животноводства в Российской Федерации: Материалы междунар. науч.-практич. конф., посвящ. 90-летию ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, 23-25 сентября 2019 г. / ФГБНУ ФНЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста. – Дубровицы, 2019. – С. 59-64.
8. Афанасьев, Н. Н. Статистическая теория усталостной прочности металлов/ Н. Н. Афанасьев. - Киев: Изд-во АН УССР. - 1953.- 128 с.
9. Баловнев, В. И. Интенсификация измельчения материалов на основе обобщающей гипотезы дробления/В. И. Баловнев// Строительные и дорожные

машины. - 2001. - №6. - С. 36-38.

10. Баранов, В. Ф. Обзор дробильного и измельчительного оборудования основных производителей/В. Ф. Баранов // Обогащение руд. - 2012.- № 3. - С. 32-38.

11. Баранов, Н. Ф. Совершенствование технологических процессов и технических средств приготовления кормов для сельскохозяйственного производства на базе роторных измельчителей: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.20.01/Баранов Николай Федотович. - Киров, 2001.- 622 с.

12. Барзуков, О. П. Влияние технологической нагрузки на самосинхронизацию вибровозбудителей/ О. П. Барзуков, Л. А. Вайсберг, Л. К. Балабатько, А. Д. Учитель // Обогащение руд. №2. - С. 31-33.

13. Барзуков, О. П. Основные закономерности изменения состояния слоя сыпучего материала при сжатии/ О. П. Барзуков, В. И. Ревнивцев, Н. А. Иванов, Я. М. Кацман // Обогащение руд – 1989 – №4. – С 3-6.

14. Барштейн, М. Ф. Динамический расчет зданий и сооружений/ М. Ф. Барштейн, В. А. Ильичев, Б. Г. Коренев и [др]. -М.: Стройиздат, 1984. - 303 с.

15. Батуев, Г. С. Инженерные методы исследования ударных процессов/Г. С. Батуев, Ю. В. Голубков, А. К. Ефремов, А. А. Федосов. – М.: Машиностроение, 1977. – 240 с.

16. Бауман, В. А. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций /В. А. Бауман, Б. В. Клушанцев, В. Д. Мартынов. - М.: Машиностроение, 1981. - 323 с.

17. Бауман, В. А. Определение основных параметров щековых камнедробилок /В. А. Бауман //Строительные и дорожные машины. - 1963. - № 4. - С. 25 - 28.

18. Белецкий, Б.Ф. Строительные машины и оборудование: Учебное пособие / Б. Ф. Белецкий, И. Г. Булгакова. - СПб.: Лань, 2012. - 608 с.

19. Бесполденев, Р. В. Виброактивность молотковых зернодробилок с оппозитной загрузкой исходного материала / Р. В. Бесполденев, А. М. Левин, И. Я. Федоренко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. –

2023. – № 6(224). – С. 78-85.

20. Биленко, Л. Ф. Прогрессивные тенденции в технике и технологии дезинтеграции руд/ Л. Ф. Биленко, И. М. Костин // Перспективные направления по созданию техники и технологии для переработки минерального и техногенного сырья: Всес. научн.-технич. конф., 4-6 марта 1991 г.: сборник стат. – С-Пб., 1991. – С. 80 – 86.

21. Блехман, И. И. Синхронизация динамических систем/ И. И. Блехман. - М.: Наука, 1971.-896 с.

22. Блехман, И.И. Синхронизация в природе и технике/ И. И. Блехман. - М.: Наука, 1981. - 351 с.

23. Блехман, И. И. Движение материала в камере дробления конусных дробилок как процесс вибрационного перемещения. / И. И. Блехман, Н. А. Иванов // Обогащение руд. - 1977. - № 1. - С. 15-21.

24. Блехман, И. И. Использование самосинхронизирующихся вибровозбудителей в горных вибрационных машинах/ И. И. Блехман, Л. А. Вайсберг//Горный журнал, 2000. - № 11-12.- С. 81-82.

25. Блехман, И. И. Теория вибрационных процессов и устройств/И. И. Блехман. – СПб.: Руда и металлы, 2013. – 640с.

26. Блохин, В. С. Анализ и перспективы развития отечественных машин для дробления твердых материалов / В. С. Блохин, А. О. Дегтярев, Н. Г. Малич // Неделя горняка. – Днепропетровск. – 2007. - С. 365-380.

27. Бонд, Ф. С. Законы дробления / Ф. С. Бонд // Труды Европейского совещания по измельчению. – М.: 1966. - С. 195-208.

28. Борщев, В. Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы: учебное пособие/ В. Я. Борщев. - Тамбов: издательство Тамбовского ГТУ, 2004. - 75с.

29. Булатов, С. Ю. Повышение эффективности приготовления кормов путем совершенствования конструкции и технологического процесса кормоприготовительных машин // Пермский аграрный вестник, 2017. - № 1 (17). - С. 55-64.

30. Быховский, И. И. Автоматизация работы вибромашин /И. И. Быховский // Строительные и дорожные машины. – 1960. – № 5. – С. 10-15.
31. Вайсберг, Л. А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов / Л. А. Вайсберг. – М.: Недра, 1986. – 144 с.
32. Вайсберг, Л. А. Вибрационные дробилки. Основы расчета, проектирования и технологического применения /Л. А. Вайсберг, Л. П. Зарогатский, В. Я. Туркин. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. – 306с.
33. Вайсберг, Л. А. Основные тенденции развития процессов дезинтеграции руд в XXI веке / Л. А. Вайсберг, П. И. Крупа, В. Ф. Баранов // Обогащение руд. - 2002. - №3. - С. 3-9.
34. Вайсберг, Л.А. Дробильно-измельчительное оборудование вибрационного действия для переработки сырья и промышленных отходов/ Л. А. Вайсберг, А.Н. Сафронов //Экология и промышленность России, 2019. -Т. 23-. № 7 - С. 4–9.
35. Васильков В. Б. Динамика вибрационного устройства с торсионно подвешенными маятниками/ В. Б. Васильков, Е. В. Шишкин //Обогащение руд, 2014.-№ 6.-С. 25 – 28.
36. Вильдеман, В.Э. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов/В.Э. Вильдеман, Ю. В. Соколкин, А.А. Ташкинов. – М.: Наука, Физматлит, 1997. – 288 с.
37. Вознесенский, В. А. Принятие решений по статистическим моделям/ В. А. Вознесенский, А. Ф. Ковальчук - М.: - Статистика, 1978.- 192 с.
38. Глебов, Л. А. Гранулометрический состав измельченного зерна/ Л. А. Глебов, Г. М. Гамзаев // Комбикормовая промышленность. - 1997. - №8. - С. 15.
39. Глебов, Л. А. Интенсификация процесса измельчения сырья в производстве комбикормов:: автореф. дисс. Докт. техн. наук: 05.18.12/ Глебов Леонид Александрович. - М.: 1990. – 50 с.
40. Гончаревич, И. Ф. Теория вибрационной техники и технологии/ И. Ф. Гончаревич, К. В. Фролов. - М.: Наука, 1981.- 287 с.
41. Горячкин, В. П. Собрание сочинений/ В. П. Горячкин. - Т. 1. - М.:

Колос, 1965. - 720 с.

42. Горячкин, В. П. Собрание сочинений/ В. П. Горячкин. - Т. 2. - М.: Колос, 1965. - 459 с.

43. Горячкин, В. П. Собрание сочинений/ В. П. Горячкин. - Т. 3. - М.: Колос, 1965. - 384 с.

44. ГОСТ 13496.8-72. Комбикорма. Методы определения крупности размола и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений. – М.: Стандартиформ, 2011. - 3 с.

45. ГОСТ 14916-82. Дробилки. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1984. - 15 с.

46. ГОСТ 24346-80. Межгосударственный стандарт. Вибрация: термины и определения. - М.: Стандартиформ, 2010. – 54 с.

47. ГОСТ 27548 -97. Межгосударственный стандарт. Корма растительные. Методы определения содержания влаги. Vegetable feeds. Methods for determination of moisture content Дата введения 1999—01—01.

48. ГОСТ 34393— 2018. Межгосударственный стандарт. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. - М.: - Стандартиформ, 2018.- 15 с.

49. ГОСТ Р 53900-2010. Ячмень кормовой. Технические условия. - М.: Стандартиформ, 2011. – 14 с.

50. ГОСТ Р 54078-2010 «Пшеница кормовая. Технические условия».- М.: Стандартиформ, 2011.-17 с.

51. ГОСТ13586.3—83. Межгосударственный стандарт. Зерно. Правила приемки и методы отбора проб. - М.: - Стандартиформ, 2018.- 12 с.

52. Гурьянов, Г. А. Прикладная модель измельчения твердой частицы простой формы ударом о жесткую поверхность/Г. А. Гурьянов, Б. М. Абдеев, Е. А. Клименко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. –2018. – № 1. – С. 110–120.

53. Давиденков, Н. Н. Динамическая прочность и хрупкость металлов/ Избр. труды: В 2-х томах/Н. Н. Давиденков. - Киев: Наукова думка, 1981. - т. 1. -

704 с.

54. Дедаев, Г. А. Пути снижения энергозатрат в кормопроизводстве/ Г. А. Дедаев, Н. В. Насонов -М.: ВНИИТЭИСХ, - 1986. – 42 с.

55. Демидов, А. Р. Определение прочностных характеристик зерна различных культур/ А. Р. Демидов, С. Е. Чирков // Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность, 1971. - №8. - С.29-30.

56. Денисов, Г. А. Оборудование и технологии для вибрационного измельчения материалов с различными физическими свойствами. / Г. А. Денисов, Л. П. Зарогатский, В. Я. Туркин. - СПб.: - 1992. - 119 с.

57. Дринча, В. М. Применение молотковых мельниц в индивидуальном производстве кормов / В. М. Дринча // Кормопроизводство. – 2013. – № 1. – С. 43–45.

58. Дринча, В. М. Применение молотковых мельниц в индивидуальном производстве кормов / В. М. Дринча// Кормопроизводство. - 2013. - № 1. - С. 43-45.

59. Егоров, Г. А. Технологические свойства зерна / Г. А. Егоров. – Москва: Агропромиздат, 1985. – 218 с.

60. Жуазель, А. Разрушение хрупких тел при измельчении// Европейское совещание по измельчению. Франкфурт-на-Майне, 1962 / Пер. Л. А. Ласточкина. - М.: 1966. - С. 56-78. – Текст: непосредственный.

61. Злочевский, В. Л. Исследование прочностных свойств зерновых материалов: учебное пособие /В. Л. Злочевский, А. П. Борисов. — Санкт-Петербург: Лань, 2017. — 180 с.

62. Иванов, Н. М. Моделирование динамики вибрационного измельчителя кормового зерна/ Н. М. Иванов, А. М. Левин, И. Я. Федоренко // Сельскохозяйственные машины и технологии, 2024. - Т. 18. - N1. - С. 46-51. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-0-0. EDN: OZIKUK.

63. Иванов, Н. М. Динамические особенности виброщекового измельчителя кормового зерна/ Н. М. Иванов, А. М. Левин, И. Я. Федоренко// Сибирский вестник сельскохозяйственной науки, 2024. - №4. С. 52 - 61.

64. Иванов, А. В. Исследование процесса измельчения единичных зерен/ А. В. Иванов, Ж. В. Арбузова, Е. Ю Сеница// Хранение и переработка сельхозсырья, 1999. -№5.- С. 13 - 14.
65. Ишлинский, А. Ю. Математическая теория пластичности/ Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д. - М.: Физматлит, 2003. - 704 с.
66. Ишлинский, А. Ю. Некоторые применения статистики к описанию законов деформирования тел/ А. Ю. Ишлинский // Изв. АН СССР. ОТН. - 1944. - № 9. - С. 583-590.
67. Кардашевский, Е. Е. Тенденции развития конструкций вибрационных измельчителей кормового зерна/ Е. Е. Кардашевский, А. М. Левин, И. Я. Федоренко //Вестник Алтайского государственного аграрного университета. - 2024. - № 6 (182). - С. 137-143.
68. Карманов, Н. Г., Использование уравнения Лагранжа 2-го рода для описания динамики вибрационно-ударного измельчителя фуражного зерна/ Н. Г. Карманов, А. М. Левин // Достижения и перспективы студенческой науки в АПК: Сборник трудов межрегиональной научной студенческой конференции, посвященной 60-летию Алтайского государственного аграрного университета. Барнаул: Изд-во АГАУ, 2004. - Ч. I. - С. 87-90.
69. Картавый, А. Н. Ресурсосберегающие принципы конструирования технологических вибрационных машин/ А. Н. Картавый // Горное оборудование и электромеханика. - 2009. - №3. - С. 28-37.
70. Кирпичев, В. А. Беседы о механике / В. Л. Кирпичев.— Изд. 5-е. — Москва - Ленинград: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., - 1951. — 360 с.
71. Кирьянов, Д. В. Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0/ Д. В. Кирьянов — СПб.: БХВ-Петербург, 2012. — 432 с.
72. Клушанцев, Б. В. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации/Б. В. Клушанцев, А. И. Косарев, Ю. А. Муйземнек.- М.: Машиностроение, 1990. 320 с.
73. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников /А.И. Кобзарь. - М.: Физматлит, 2006. – 816с.

74. Когаев, В. П. Расчёты на прочность при напряжениях, переменных во времени/ В. П. Когаев. - М.: Машиностроение. 1977. - 232 с.
75. Колмогоров, А.Н. О логарифмически нормальном распределении размеров частиц при дроблении // Доклады АН СССР. – 1941. – Т.31, в. 2. – С. 99-101.
76. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн – М.: Наука, пер. с англ. - 2014. – 832 с.
77. Кривцов, А. М. Деформирование и разрушение твердых тел с микроструктурой. — М.: Физматлит, 2007. — 304 с. — ISBN 978-5-9221-0803-4.
78. Крупенин, В. Л. Ударные и виброударные машины и устройства /В. Л. Крупенин //Вестник научно-технического развития. – 2009. - №4. – С. 3-32.
79. Кукта, Г. М. Технология переработки и приготовления кормов/ Г. М. Кукта. - М.: Колос, 1978. -265с.
80. Кулаковский, И. В. Машины и оборудование для приготовления кормов/ И. В. Кулаковский, Ф. С. Кирпичников, Е. И Резник/ Справочник. - М.: Россельхозиздат, 1987.-285с.
81. Кутателадзе, С. С. Анализ подobia в теплофизике /Кутателадзе С. С.; отв. ред. Ярыгина Н.И.; Акад. наук СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т теплофизики. - Новосибирск: Наука, 1982. – 280 с.
82. Латышев, О. Г. Направленное изменение фрактальных характеристик, свойств и состояния пород поверхностно-активными веществами в процессах горного производства: научная монография / О. Г. Латышев, М. В. Корнилков; Урал. гос. горный ун-т. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. – 407 с.
83. Левин, А. М. Использование вибрационного воздействия для измельчения зерна/ А. М. Левин // Молодежь-Барнаулу: Материалы пятой городской научно-практической конференции молодых ученых (20-21 ноября 2003 г.). - Барнаул: Аз Бука, 2003. - С. 316.
84. Левин, А. М. Обоснование конструктивно-кинематических параметров вибрационно-ударного измельчителя фуражного зерна/ А. М. Левин //

Молодежь-Барнаул: Материалы научно-практической конференции (22-23 ноября). Барнаул: Аз Бука, 2004. - С. 296-298.

85. Левин, А. М. Феноменологическая модель поведения зерновки в рабочей зоне вибродробилки/ А. М. Левин // Вестник алтайского государственного аграрного университета. - 2003.- № 1 (9). - С. 48-50.

86. Левин, А. М. Экспериментальная оптимизация процесса вибрационного измельчения кормового зерна/ А. М. Левин // Вестник Омского ГАУ. - 2023. - № 1 (49). - С. 161-168. - DOI: 10.48136/ 2222-0364_2023_1_161.

87. Левин, А. М. Выбор рациональной динамической схемы измельчителя кормового зерна / А. М. Левин, И. Я. Федоренко // Аграрная наука - сельскому хозяйству: Сборник материалов XVIII Международной научно-практической конференции. В 2-х книгах, Барнаул, 08-09 февраля 2024 года – Книга 1. – Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2024. – С. 114-117. - Текст: электронный.

88. Левин, А. М. Обоснование конструктивно-режимных параметров вибрационно-ударного измельчителя фуражного зерна: 05.20.01: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: /Левин Алексей Михайлович. - Барнаул, 2005. - 19 с.

89. Левин, А. М. Требования к динамическим системам вибрационных измельчителей кормового зерна / А. М. Левин, И. Я. Федоренко // Аграрная наука - сельскому хозяйству: Сборник материалов XVIII Международной научно-практической конференции. В 2-х книгах, Барнаул, 09 февраля 2023 года – 10 2023 года. Книга 1. – Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2023. – С. 134-137. – EDN NMQJOK

90. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа/ Л. Г. Лойцянский: Учебник для вузов. — М.: Дрофа, 2003. — 840 с.

91. Макаров, А. П. Исследование технологического процесса измельчения фуражного зерна в молотковых дробилках/ А. П. Макаров // Научные труды ВИЭСХ. Том 14. М.: ВИЭСХ, - 1964. - С. 66-88.

92. Манжосов В. К. Модели продольного удара / В. К. Манжосов. –

Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 160 с.

93. Маркин, О. Ю. Разработка вибрационной дробилки для измельчения зерновых материалов с обоснованием параметров и режимов работы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01/Маркин Олег Юрьевич. –Казань, 1997.- 24 с.

94. Мартьянов, С. А. Обоснование параметров и повышение эффективности конусных вибрационных дробилок: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.20.01, 05.20.03/Мартьянов Сергей Анатольевич. – Казань, 2008. – 16 с.

95. Масленников, В. А. Дробилки, разрушающие материал сжатием/ В. А. Масленников // Известия вузов. Горный журнал. - 1996. - № 10. - С. 124 - 138.

96. Мельников С. В. Аэродинамические исследования молотковых кормодробилок/ С. В. Мельников //Земледельческая механика: сб. тр.-М.: Машиностроение, 1971.-Т. 13.-С.270...281.

97. Мельников, С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм/ С. В. Мельников. -Л.: Колос, Ленингр. отделение. - 1978. - 560с.

98. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов/С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.

99. Механизация приготовления комбикормов в фермерских и коллективных хозяйствах: Учебное пособие / С. Н. Васильев, В. И. Земсков, С. В. Золотарев, И. Я. Федоренко. Под общ. ред. И. Я. Федоренко. Барнаул, 1997. - 70с.

100. Миончинский, П. Н. Производство комбикормов. 2-е изд., доп. и перераб./П. Н. Миончинский, Л. С. Кожарова. - М.: Агропромиздат, 1991. – 288 с.

101. Шохин, А. Е. Моделирование колебаний цепной четырехмассной виброударной системы с самосинхронизирующимися вибровозбудителями/А. Е. Шохин, А. Н. Никифоров //Вестник научно-технического развития. - 2018. - № 12 (136), - С. 39-44.

102. Морозов, Н. М. Организационно-экономические и технологические основы механизации и автоматизации животноводства: науч. изд./ Н. М. Морозов. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2011. - 284 с.

103. Москвитин, В. В. Циклические нагрузки элементов конструкций/ В. В. Москвитин. – М.: Наука, 1981. – 344 с.
104. Наумов, И. А. Совершенствование кондиционирования и измельчения пшеницы и ржи/ И. А. Наумов. – М.: Колос, 1975. – 176 с.
105. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных. Справочное пособие. 3-е издание переработанное и дополненное. / Под ред. А. П. Калашникова, В. И. Фисинина, В. В. Щеглова, Н. И. Клейменова. - Москва. 2003. - 456 с.
106. Овчинников, П. Ф. Дифференциальные и интегральные уравнения кинетики измельчения / П. Ф. Овчинников // Процессы в зернистых средах. – Иваново, 1989. – С. 3 – 8.
107. Олевский, В. А. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы/ В. А. Олевский, О. С. Богданов - М.: Недра, 1982. - 101 с.
108. Организация полноценного кормления высокопродуктивных коров (рекомендации). — М.: ФГУ РЦСК, 2008. — 58 с.
109. Основы экспериментальной механики разрушения / И. М. Керштейн, В. Д. Ключников, Е. В. Ломакин и [др]. - М.: Изд-во МГУ, 1989. – 140с.
110. Особов, В. И. Машины и оборудование для уплотнения сено – солоmistых материалов/ В. И. Особов, Г. К. Васильев, А. В. Голяновский. – М.: Машиностроение, 1974. – 231 с.
111. ОСТ 70 .19.2 - 83. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и оборудование для приготовления кормов. Программа и методы испытаний. - М.: ЦНИИТЭИ, 1984. - 114 с.
112. Пальмов, В. А. Колебания упруго-пластических тел/ В. А. Пальмов. - М.: Наука, 1976. - 328 с.
113. Пановко, Г. Я., Динамика резонансных вибромашин с самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями/ Г. Я. Пановко, А. Е. Шохин. - М.: Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2020. - 168 с. EDN: SFMMNR.
114. Пановко, Г. Я. Некоторые аспекты моделирования динамики

резонансных вибротамбов/ Г. Я. Пановко, А. Е. Шохин // Вестник научно-технического развития, 2014. - N1 (77). - С. 25-36.

115. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механических колебаний/ Я. Г. Пановко. - М.: Наука. - 1991. — 256 с.

116. Пановко, Я. Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем/ Я. Г. Пановко. - М.: Физматгиз, 1960. - 193 с.

117. Пановко, Я. Г. Механика деформируемого твердого тела/ Я. Г. Пановко. – М.: - Наука, 1985. – 288 с.

118. Партон, В. Механика упругопластического разрушения/ В. З. Партон, Е. М. Морозов. — М.: Наука, 1985.— 504 с.

119. Патент № 1540722 А1 СССР, МПК А01F 29/00, В02С 2/04. Инерционная дробилка: № 4323652: заявл. 03.11.1987 : опубл. 07.02.1990 / И. Я. Федоренко, В. И. Земсков, С. Н. Васильев.

120. Патент № 2085288 С1 Российская Федерация, МПК В02С 4/12, В02С 19/16. Дробилка для зерновых и кусковых материалов: № 94023347/03: заявл. 17.06.1994: опубл. 27.07.1997 / И. Я. Федоренко, С. А. Белокурченко, В. А. Костюк.

121. Патент № 2262984 С2 Российская Федерация, МПК В02С 19/16. Измельчитель зерновых и сыпучих материалов: № 2003129141/03: заявл. 29.09.2003: опубл. 27.10.2005 / И. Я. Федоренко, А. М. Левин, М. Г. Желтунов ; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Алтайский государственный аграрный университет" (АГАУ).

122. Патент № 2688424 С1 Российская Федерация, МПК В02С 19/16. Измельчитель зернового материала: № 2018105815: заявл. 15.02.2018: опубл. 21.05.2019 / И. Я. Федоренко, А. М. Левин, А. В. Табаев. – EDN HZAYQG.

123. Патент № 2719819 С1 Российская Федерация, МПК В02С 13/04. Молотковая дробилка: № 2019125047 : заявл. 06.08.2019 : опубл. 23.04.2020 / И. Я. Федоренко, А. М. Левин, А. А. Балабов. – EDN NKZXBI.

124. Патент № 2759864 С1 Российская Федерация, МПК В02С 1/00, В02С 19/16. Вибрационно-щечковая дробилка для измельчения зернового материала: №

2020142291: заявл. 21.12.2020: опубл. 18.11.2021 / И. Я. Федоренко, А. М. Левин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Алтайский государственный аграрный университет" (АГАУ). – EDN CCOWXF.

125. Патент № 2787723 С1 Российская Федерация, МПК В02С 1/02. Вибрационно-щечковая дробилка: № 2022112164: заявл. 04.05.2022: опубл. 12.01.2023 / И. Я. Федоренко, А. М. Левин, Е. Е. Кардашевский; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Алтайский государственный аграрный университет". – EDN VLBAVI

126. Писаренко, Г. С. Обобщенная нелинейная модель учета рассеяния энергии при колебаниях/Г. С. Писаренко - Киев: Наукова думка, 1985. - 236 с.

127. Писаренко, Г.С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряжённом состоянии/Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. — Киев: Наукова думка, 1976.— 415 с.

128. Полноценное кормление молочного скота – основа реализации генетического потенциала продуктивности/В. И. Волгин, Л. В. Романенко, П. Н. Прохоренко, З. Л. Федорова, Е. А. Корочкина. –М.: РАН, 2018. – 260 с. ISBN 978-5-906906-85-4.

129. Пристач, Н. В. Плющить нельзя дробить/ Н. В. Пристач//Агробизнес, 2011.-№5(10). - С. 38-39.

130. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела/ Ю. Н. Работнов.- М.: Наука, 1988.-712 с.

131. Разрушение. Математические основы теории разрушения/ Редактор Г. Либовиц// Перевод с английского /Под редакцией А. Ю. Ишлинского. - М.: Мир, 1975. - Том 2.- 768 с.

132. Раков, Д. Л. Структурный анализ и синтез новых технических систем на базе морфологического подхода / Д. Л. Раков. – М.: ЛИБРОКОМ, 2011. - 159 с.

133. Рамзаев, А. Удельный расход энергии на измельчение зерна/ А. Рамзаев, Д. Черепанов, Д. Климовских // Хлебопродукты. - 1997. - №7. - С. 15-17.

134. Ревнивцев, В. И. Вибрационная дезинтеграция твердых материалов/ В. И. Ревнивцев, Г. А. Денисов, Л. П. Зарогатский, В. Я. Туркин, - М.: Недра, 1992.- 430 с.

135. Резник Е. И. Совершенствование технологических процессов и технических средств заготовки, приготовления и раздачи кормов на фермах крупного рогатого скота: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01/Резник Евгений Иванович.- Москва- 2003. -60 с.

136. Родин, Р. А. О механизме роста трещин при разрушении упруго-хрупкого тела/ Р. А. Родин // Известия вузов. Горный журнал. - 1991. - № 10. - С. 5 - 12.

137. Родин, Р. А. О прогнозировании гранулометрического состава продуктов разрушения/ Р. А. Родин// Известия вузов. Горный журнал. - 1996. - № 2. - С. 3 - 6.

138. Родин, Р. А. О работе, расходуемой на дробление горных пород/ Р. А. Родин// Известия ВУЗов. - 1987. - № 6 - С. 84 - 89.

139. Родин, Р. А. О характеристиках крупности продуктов дробления и измельчения/ Р. А. Родин // Известия вузов. Горный журнал. - 1990. - № 7. - С. 47-53.

140. Родин, Р. А. О гипотезах дробления / Р. А. Родин // Известия ВУЗов. Горный журнал. - 1989. - №.4. - С.71-78.

141. Родин, Р. А. Работа дробления при единичном разрушении / Р. А. Родин // Нерудные строительные материалы. - М.: Стройиздат, 1978. - Вып. 22. -С 118-127.

142. Рудич, Д. Дробилки и измельчители разного назначения для хозяйств/Д. Рудич, С. Рыжов// Комбикормовая промышленность. 1999.- №6. - С. 19-22.

143. Рундквист, А. К. Общая форма законов дробления /А.К. Рундквист // Механобр. Научно-технический информационный бюллетень. - 1956. - № 2.

144. Рутман, Ю. Л. Динамика сооружений: сейсмостойкость, сейсмозащита, ветровые нагрузки: моногр. / Ю. Л. Рутман, Н. В. Островская;

СПбГАСУ. – СПб., 2019. – 253 с.

145. Рыжиков, Р. К. Расчет пропускной способности дробилок крупного дробления /Р. К. Рыжиков // Строительные и дорожные машины. - 1977. - № 5. - С. 15.

146. Рюле М. Измельчение: факторы влияния на размер частиц и их распределение/ М. Рюле// Комбикорма. - №4. - 2020. - С. 22-23.

147. Сабиев У.К. Интенсификация технологических процессов приготовления комбикормов в условиях сельскохозяйственных предприятий : автореф. дис. ... д-ра техн. наук, Барнаул, 2012. С. 43.

148. Сабиев, У.К. Методологическая база обоснования технологического процесса и интенсифицирующих рабочих органов вибрационного и ударного принципа действия для приготовления комбикормов в условиях сельскохозяйственных предприятий // Вестн. Ом. гос. аграр. ун-та. - 2013. - № 2 (10). -С. 62–64.

149. Савиных П. А. Исследование рабочего процесса молотковой дробилки зерна с ротором-вентилятором / П. А. Савиных, С. Ю. Булатов, В. Н. Нечаев // Аграрная наука ЕвроСеверо-Востока. – 2013. – № 1 (32). – С. 54–59.

150. Савиных, П. А., Оптимизация конструктивно-технологических параметров дробилки зерна ударно-отражательного действия/ П. А. Савиных, С. Ю. Булатов, К. Е. Миронов // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве материалы Международной научно-технической конференции: сб. статей. - 2014. - Т. 3. - С. 67–73.

151. Садов, В. В. Повышение эффективности измельчения зерновых компонентов за счет оптимальной загрузки молотковой дробилки / В. В. Садов, С. А. Сорокин// Вестник Алтайского государственного аграрного университета. - 2021. - № 3 (197). - С. 100-106. EDN:NVNXAU

152. Садов, В. В. Теоретические предпосылки обоснования разрушения зернового материала разгонным диском в молотковой дробилке / В. В. Садов, С. А. Сорокин. - Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. - 2019. - № 2 (172). - С. 156-161. EDN: ZGGREE.

153. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике/Л. И. Седов. – М.: Наука, 1987. – 430 с.
154. Семенов, Е. В. Определение эффективности измельчения зерна в молотковой дробилке/ Е. В. Семенов, А. А. Коробицин, В. А. Карамзин // Пищевая промышленность, 1999.- №4.-С.38 - 40.
155. Сена, Л. А. Единицы физических величин и их размерности/Л. А. Сена. - М.: Наука, 1989.- 336 с.
156. Сергеев, В. П. Строительные машины и оборудование/ В. П. Сергеев. – М.: Высшая школа, 1987. – 376с.
157. Сергеев, Н. С. Центробежно-роторные измельчители фуражного зерна: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01/ Сергеев Николай Степанович. - Челябинск, 2008. - 38 с. EDN:NJIANV
158. Сиденко, П. М. Измельчение в химической промышленности / П.М. Сиденко. – 2-е изд. перераб. –М.: Химия, 1977. – 368 с.
159. Сластенов, В. В. Динамика взаимодействия вибромашины с технологической средой: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06/ Сластенов Владимир Валентинович. - Саратов, 2006.- 20 с.
160. Смышляев, А. А. Совершенствование рабочего процесса центробежного измельчителя фуражного зерна: автореф. ...канд. техн. наук: 05.20.01 /Смышляев Андрей Алексеевич. – Барнаул, 2002. – 23 с.
161. СТО АИСТ. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для кормопроизводства. Показатели назначения и надежности. Общие требования. - М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020.-31 с.
162. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации/Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145.
163. Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года/Утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 8 сентября 2022 г. № 2567-р.

164. Стратегия развития машиностроения для пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2030 года / Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 августа 2019 г. № 1931-р.

165. Сундеев, А. А. Экспериментальные исследования работы безрешетной дробилки/А. А. Сундеев// Совершенствование технологий и технических средств для механизации процессов в растениеводстве: Сб. науч. тр./ ВГАУ. - Воронеж, 1994. -С.164-169.

166. Сцхроен Х. Современные требования к процессу измельчения / Х. Сцхроен// Комбикорма. - 2012. - № 2. - С. 52-53. EDN:OSKG

167. Сыроватка, В. И. Основные закономерности процесса измельчения зерна в молотковой дробилке/В. И. Сыроватка//Электрификация сельского хозяйства: Труды ВИЭСХ, -М.: Колос, 1964. -Т. 14. -С. 89 -145.

168. Сысуев, В. А. Кормоприготовительные машины. Теория, разработка, эксперимент: В двух томах/В. А. Сысуев, А. В. Алешкин, П. А. Савиных// – Киров: Зональный НИИСХ Северо – Востока, 2008. – Т.1. – 640 с.

169. Сысуев, В. А. Кормоприготовительные машины. Теория, разработка, эксперимент: в двух томах/ В. А. Сысуев, А. В. Алешкин, П. А. Савиных. – Киров: Зональный НИИСХ Северо-Востока, 2009. – Т.2. – 496 с.

170. Табаев, А.В. Особенности гранулометрического состава измельченного продукта, образуемого в вибрационном измельчителе. Орёл: Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, - 2022. - С. 270-276. EDN: YIVYWY.

171. Табаев, А. В. Анализ размерностей процесса вибрационного измельчения фуражного зерна/А. В. Табаев, А. М. Левин, И. Я. Федоренко // Аграрная наука - сельскому хозяйству: Сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции в 2 кн., Барнаул, 09–10 февраля 2021 года. – Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2021. – кн. 2. - С. 41-43.

172. Табаев, А. В. Расчет технологических показателей вибрационных

измельчителей фуражного зерна/А. В. Табаев, И. Я. Федоренко, А. М. Левин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2020. – № 10(192). – С. 112-118.

173. Тимошенко, С. П. Теория упругости/ С. П. Тимошенко., Дж. Гудьер: Пер. с англ. /Под ред. Г. С. Шапиро. - М.: Наука. - 1979. - 560 с.

174. Туркин, В.Я. Основные направления совершенствования вибрационных щековых дробилок / В. Я. Туркин, М. Ю. Тягушев, Р. А. Саблин // Записки Горного института. 2007. - т. 170 (1). - С. 77-79.

175. Ударное нагружение и разрушение твердых тел: обзор и новая теория/ Колмогоров В. Л., Джонсон У., Рид С. Р., Корбетт Г. Г./ Пер. Е. Е. Верстаковой / Под ред. В. Л. Колмогорова. - Екатеринбург: УРО РАН, 2006. - 321 с.

176. Федеральная научно-техническая программа развития сельского хозяйства на 2017 - 2025 годы. Утверждена постановлением Правительства РФ 25 августа 2017 г. № 996.

177. Федоренко, И. Я. Оценка эффективности однократного удара по слою зерна при его измельчении / И. Я. Федоренко, Н. Ф. Карпов, А. М. Левин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 6(200). – С. 87-93. – EDN EDYYZS.

178. Федоренко, И. Я. Динамические эффекты, проявляющиеся в механической системе вибрационного измельчителя кормового зерна/И. Я. Федоренко, А. М. Левин, А. В. Табаев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 11(205). – С. 86-93.

179. Федоренко, И. Я. Методологические аспекты экспериментальной оптимизации процесса измельчения кормового зерна / И. Я. Федоренко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 5(199). – С. 101-107.

180. Федоренко, И. Я. Механизм разрушения фуражного зерна вибрационными рабочими органами/И. Я. Федоренко, А. М. Левин, А. В. Табаев // Аграрная наука - сельскому хозяйству: Сборник материалов XV Международной научно-практической конференции в 2 кн., Барнаул, 12–13 марта 2020 года. –

Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2020. – С. 84-86. – Текст: непосредственный.

181. Федоренко, И. Я. Морфологический анализ вибрационных измельчителей кормового зерна / И. Я. Федоренко, А. М. Левин, А. В. Табаев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2020. – № 1(183). – С. 156-163.

182. Федоренко, И. Я. Нестационарная задача о количестве вибрационных нагружений, необходимых для разрушения зерновки/И. Я. Федоренко, А. М. Левин, А. В. Табаев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. -2019. - № 12 (182). - С. 137-143.

183. Федоренко, И. Я. Экспериментальные предпосылки к разработке ударно-центробежного измельчителя фуражного зерна/ И. Я. Федоренко, С. В. Золотарев, А. А.Смышляев, А. М. Левин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета - 2002. - № 2. - С. 84-88.

184. Федоренко, И. Я. Особенности конструкции вибрационно-ударного измельчителя зерна/ А. М. Левин // Материалы XLIII научно-технической конференции Челябинского государственного агроинженерного университета. Часть 2. Челябинск: ЧГАУ, - 2004. - С. 47-51.

185. Федоренко, И. Я. Совершенствование процесса измельчения кормового зерна. Рекомендации / И. Я. Федоренко, А. М. Левин. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2023. – 63 с. – 1 CD-R (8,5 МБ). – Систем. требования: Intel Pentium 1,6 GHz и более; 512 Мб (RAM); Microsoft Windows 7 и выше; Adobe Reader. – Загл. с титул. экрана. – Текст: электронный.

186. Федоренко, И. Я. Реологическая модель единичной частицы фуражного зерна/ И.Я. Федоренко, А.М. Левин, А.В. Табаев// Теория и практика современной аграрной науки: Сб. III национальной (Всероссийской) научной конференции с международным участием (г. Новосибирск, 28 февраля 2020 г): Т.2/Новосиб. гос. аграр. ун-т. – Новосибирск: ИЦНГАУ «Золотой колос», 2020. – С. 476-479.

187. Федоренко, И.Я. Моделирование ударного нагружения слоя

кормового материала/И. Я. Федоренко, А. А. Смышляев//Вестник Алтайского Государственного аграрного университета. – 2015. - №5. – С. 136-141.

188. Федоренко, И.Я., Инновационные конструкции вибрационных дробилок фуражного зерна/ А. М. Левин, А. В. Табаев // Перспективы внедрения инновационных технологий в АПК. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2019. - С. 104-106. EDN: VJHOQB.

189. Федоренко, И. Я. Вибрационные зернодробилки: основы теории и расчета: монография / И. Я. Федоренко, А. М. Левин, А. В. Табаев. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2023. – 167 с. – Текст: электронный.

190. Федоренко, И. Я. Вибрационные процессы и устройства в АПК / И. Я. Федоренко. – Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2016. – 289 с. – ISBN 9785944852960.

191. Федоренко, И. Я. Влияние числа ударов, необходимых для разрушения зерна, на энергетику процесса измельчения / И. Я. Федоренко, С. В. Золотарев, А. А. Смышляев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2001. – № 6. – С. 53-54.

192. Федоренко, И. Я. Инновационные конструкции вибрационных дробилок фуражного зерна / И. Я. Федоренко, А. М. Левин, А. В. Табаев // Перспективы внедрения инновационных технологий в АПК: Сборник статей II Российской (Национальной) научно-практической конференции, Барнаул, 20 декабря 2019 года. – Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2019. – С. 104-106.

193. Федоренко, И. Я. Методологические аспекты использования нечеткого моделирования для выбора технологий и оборудования в животноводстве/ И. Я. Федоренко // Аграрная наука– сельскому хозяйству: матер. Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 кн. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2009. – Кн. I. – С. 241-246.

194. Федоренко, И. Я. Моделирование вибрационных процессов и устройств АПК: Лабораторный практикум для студентов и аспирантов вузов / И. Я. Федоренко. – Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2020. – 147 с. – ISBN 9785944853325.

195. Федоренко, И. Я. Молотковые зернодробилки: технологические и динамические аспекты / И. Я. Федоренко, В. В. Садов, С. А. Сорокин. – Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2023. – 207 с. – ISBN 978-5-94485-259-5. – EDN IRVIWT.

196. Федоренко, И. Я. Оптимизация в агроинженерии. Компьютерный практикум / И. Я. Федоренко. – Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2018. – 101 с. – EDN MUJDWJ.

197. Федоренко, И. Я. Оптимизация и принятие решений в агроинженерных задачах: учебное пособие / И. Я. Федоренко, С. В. Морозова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Санкт-Петербург: Лань, 2021. — 288 с

198. Федоренко, И. Я. Особенности механического удара в измельчителях фуражного зерна/ И. Я. Федоренко, С. В. Золотарев, А. А. Смышляев// Вестник Алтайской науки. - Вып. 1. - Т.2. - Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2001. - С. 126-129.

199. Федоренко, И. Я. Проектирование технических устройств и систем: принципы, методы, процедуры/ И. Я. Федоренко, А. А. Смышляев. – М: Издательство "Форум", 2014. – 320 с.

200. Федоренко, И. Я. Теоретические основы оптимизации гранулометрического состава дерти, образуемой при измельчении фуражного зерна / И. Я. Федоренко, И. Б. Шагдыров, В. В. Садов // Ползуновский вестник. – 2012. – № 2-2. – С. 229-233. – EDN WJRZDD.

201. Федоренко, И. Я. Технологические процессы и оборудование для приготовления кормов / И. Я. Федоренко. – М.: Издательство "Форум", 2020. – 176 с. – ISBN 9785000917176.

202. Федоренко, И. Я. Энергетические соотношения при ударном измельчении зерна/ И. Я. Федоренко, А. М. Левин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2002. - №11.- С. 32-33.

203. Федоренко, И. Я. Экспериментальные предпосылки к разработке ударно-центробежного измельчителя фуражного зерна /И. Я. Федоренко., С. В. Золотарев, А. А. Смышляев, А. М. Левин // Вестник Алтайской науки. -Вып. 2, т.2. - Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2002. - С. 126-129.

204. Фидлин, А. Об усреднении в сильно демпфирующих системах: общий подход и его применение к асимптотическому анализу эффекта Зоммерфельда/ А. Фидлин, О. Дроздецкая//В сборнике тезисов симпозиума IUTAM по аналитическим методам в нелинейной динамике (Франкфурт, Германия, 6-9 июля 2015 г.). Германия: Технический университет Дармштадта. - С. 19–21.

205. Физико-механические, физико-химические и теплофизические свойства сырья и готовых продуктов пищевой промышленности: справочные материалы/ Юж-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ).- Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2012.- 28с.

206. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов/ К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер. – М.: Мир, 1977. – 544с.

207. Ходаков, Г. С. Физика измельчения / Г. С. Ходаков. - Москва: Наука, 1972. - 307 с.

208. Черняев, Н. П. Технология комбикормового производства/Н. П. Черняев. - М.: Колос, 1992.-368 с.

209. Шишкин, Е. В. Динамика колебательной системы вибрационного устройства с пространственными движениями рабочих органов для дезинтеграции особо прочных материалов/ Е. В. Шишкин, С. В. Казаков // Обогащение руд, № 5. - 2017. - С 48 - 53 .

210. Шишкин, Е. В. Вынужденные колебания вибрационной дробилки в резонансной области частоты/ Е. В. Шишкин, С. В. Казаков //Обогащение руд, №5. – 2015. – С.42-46.

211. Шишкин, Е. В. Анализ динамики вибрационной конусной дробилки/ Е. В. Шишкин, С. В. Казаков // Автоматизированное проектирование в машиностроении. - 2015. - №3. - С. 82-87. EDN: UNRYWX.

212. Шишкин, Е. В. Влияние технологического режима на динамику вибрационной гирационной конусной дробилки/ Е. В. Шишкин, П. В. Шишкин // Журнал ОПЗ, - № 1, - Т 33, - 2017. - С. 909 - 913.

213. Шохин А. Е. Экспериментальный анализ колебаний двухмассовой

системы с самосинхронизирующимися инерционными вибровозбудителями / А. Е. Шохин, А. Н. Никифоров, К. Б. Саламандра // Вестник научно-технического развития. - 2017. - N12 (124). - С. 58-65.

214. Щеглов, В. В. Корма: Приготовление, хранение, использование. Справочник/ В. В. Щеглов, Л. Г. Боярский. - М.: Агропромиздат, 1990.- 255с.

215. Ялпачик, Ф. Е. Кормодробилки: конструкция, расчет /Ф. Е. Ялпачик, Г. С. Ялпачик, Н. Л. Крыжачковский, В. Н. Кюрчев. /Под редакцией Г. С. Ялпачик. – Запорожье: Коммунар, - 1992. – 292 с.

216. Ясенецкий, В. А. Машины для измельчения кормов/ В. А. Ясенецкий, П. В. Гончаренко/ Под ред. акад. ВАСХНИЛ Л.В. Погорелого. - К.: Тэхника, 1990. - 160 с.

217. Andreychikov A. V. Metody i intellektual'nye sistemy analiza i sinteza novykh tehnicheskikh resheniy [Methods and intelligent systems of analysis and synthesis new technical solution]. Москва, ООО "Издательский Центр РИОР" Publ., 2019, pt. 1, 544 p. DOI: 10.29039/02005-0 (in Russian).

218. Blekhman I. I. Vibrational mechanics: nonlinear dynamic effects, general approach, applications. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2000. 509. DOI: 10.1142/9789812794659.

219. Box G., Benken D. Some new three level designs for study of quantitative variables. - Technometrics, 1960, v.2, N. 4, p. 455-475.

220. Chunyu Zhao, Bin He, Junjiang Liu, et al. Design method of dynamic parameters of a self-synchronization vibrating system with dual mass // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part K: Journal of Multi-body Dynamics, Prepublished January 29, 2017. DOI: 10.1177/1464419316689643.

221. Fedorenko, I. Y. Dynamic properties of vibration crusher of feed grain taking into account technological loading / I. Y. Fedorenko, A. M. Levin, A. V. Tabaev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : The proceedings of the conference AgroCON-2019, Kurgan, 18–19 апреля 2019 года. – Kurgan: IOP Publishing Ltd, 2019. – P. 012115. – DOI 10.1088/1755-1315/341/1/012115.

222. Fedorenko, I. Y. Modeling elastic and dissipative properties of feed grain

subjected to vibration / I. Y. Fedorenko, A. M. Levin, A. V. Tabaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Barnaul, 26–27 июня 2020 года. – Barnaul, 2020. – P. 012046. – DOI 10.1088/1757-899X/941/1/012046.

223. Good band R.D., Tokach M.D., Nelssen J.L. The effects of diet particle size on animal performance. Feed manufacturing, №2050. - May 1995. - P. 156-161.

224. Grinding Equipment // <http://www.muayangbiz.com/> URL: <http://www.muayangbiz.com/MyEng/ArticleListByImg.aspx?ClassID=130066630117> (дата обращения: 07.12.2021).

225. Grinding units // <http://www.aarsen.com/> URL: http://www.aarsen.com/HOME/PRODUCTS_&_PROCESSES/Grinding_units/849/ (дата обращения: 18.12.2020).

226. Gruber Gebläsehammermühle Ultra // <http://www.getreidetechnik.com/> URL: <http://www.getreidetechnik.com/p/getreide-mahlen-quetschen-mischen/mahlmischtechnik/geblaesehammermuehle-ultra/> (дата обращения: 16.12.2023).

227. Hamermolens // <http://www.ottevanger.com> URL: http://www.ottevanger.com/nl/pagina/producten/malen_breken/hamermolens.html (дата обращения: 07.12.2019).

228. Hammer mills for optimum size reduction of raw material for pet food production // <http://www.andritz.com/> URL: <http://www.andritz.com/products-and-services/pf-detail.htm?industryid=1195632&applicationid=1299750&pid=15453> (дата обращения: 07.12.2020).

229. Healy, B.J., J.D. Hancock, G.A. Kennedy. P.J. Bramel-Cox, K.C. Behnke, and R.H. Hines. 1994. Optimum particle size of corn and hard and soft sorghum for nursery pigs. J. Anim. Sei. 72:2227.

230. Kazakov S., Shishkin E. Vibrational dynamic system for the reduction of solid materials // Vibroengineering PROCEDIA. Vol. 25. 2019. 65-69. DOI: 10.21595/vp.2019.20808.

231. Multi Feed // <http://www.buhlergroup.com/> URL: <http://www.buhlergroup.com/europe/ru/101.htm#.VIQXcTGsWSq> (дата обращения: 07.12.2020).

232. Nagaev, R. F. Dynamics of synchronising systems / R. F. Nagaev ; transl. by Alexander K. Belyaev. – Berlin [etc.]: Springer, 2003. – 326 p. – (Foundations of engineering mechanics). – ISBN 3-540-44195-6. – EDN QNBYJL.

233. Panovko G., Shokhin A. Dynamics features of a resonant vibromachine with self-synchronizing inertial vibroexciters in the presence of vibration limiter // *Journal of Vibroengineering*. 2021. Vol. 23. Iss. 8. 1727. DOI: 10.21595/jve.2021.22127. EDN: TUNZHJ.

234. Shishkin E.V., Kazakov S.V. Application of vibratory-percussion crusher for disintegration of supertough materials. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2017. 87 022018. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022018.

235. Vinod K. J. Mechanics of Hammer Mill Grinding of Corn as Related to its Mechanical Properties: The Pennsylvania State University, 1975.

236. Купченко, А. В. Определение прочностных характеристик зерна/ О. В. Ялпачик, Т. А. Шпиганович, В. А. Алексеенко//*Зернові продукти і комбікорми*, - № 4. - 2010. - С. 18-22.

237. Олексієнко, В. О. Підвищення ефективності роботи молоткових кормодробарок. Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / В. О. Олексієнко. –Мелітополь, 2006 – 173 с.

Приложение А

**Компьютерные программы для оптимизации профиля рабочих органов
вибрационного измельчителя**

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА О ДРОБИЛКЕ С ПРЯМОЛИНЕЙНЫМИ РО

Значения коэффициентов

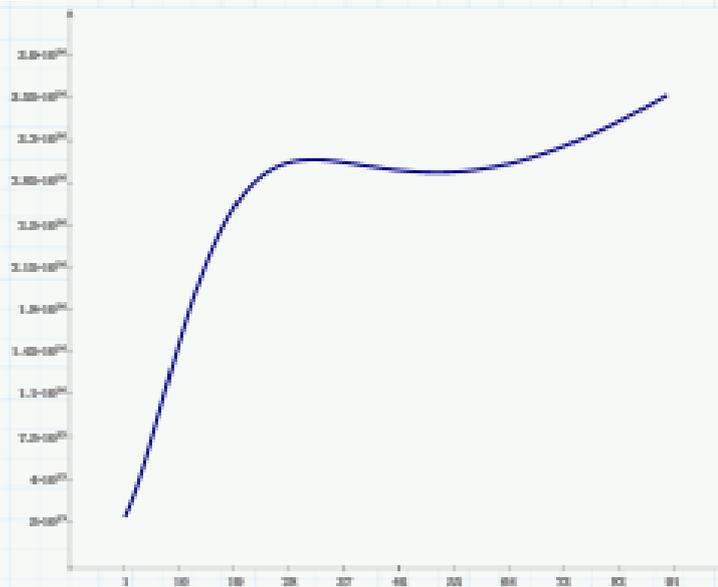
$$\sigma_1 = 2 \cdot 10^6 \quad \sigma_2 = 3 \cdot 10^6 \quad n_0 = 15 \quad k = 0.1 \quad \alpha = 0.037 \quad \rho = 1300$$

Оптимизируемая функция

$$F(n) = n \cdot \left(1 - \alpha \cdot \sqrt[3]{\frac{\left(\sigma_1 + (n_0 - 1 + k \cdot (n - 1)) - \sigma_2 \right) \cdot \alpha^{-\frac{(n-1)}{\rho}}}{\rho}} \right) \cdot \left(\sigma_1 + \left(\sigma_2 \cdot (1 + k \cdot (n - 1)) - \sigma_1 \right) \cdot \left(\alpha^{-\frac{(n-1)}{\rho}} \right) \right)^2$$

График функции

$F(n)$



n

$\sigma_f = 2 \cdot 10^6$ $\sigma_1 = 3 \cdot 10^6$ $n_0 = 15$ $k = 0.1$ $\alpha = 0.037$ $\rho = 1300$

$$F(n) = n \cdot \left(1 - e^{-2 \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{(\sigma_f + (\sigma_1 \cdot (1 + k \cdot (n-1)) - \sigma_f) \cdot e^{\frac{(n-1)}{n_0-1}})}{\rho}}}} \right) \cdot \left(\sigma_f + (\sigma_1 \cdot (1 + k \cdot (n-1)) - \sigma_f) \cdot \left(e^{\frac{(n-1)}{n_0-1}} \right) \right)^2$$

$n > 1$

Начальная точка $n = 10$

$exp := \text{minimize}(F, n) = 1$ Результат оптимизации

$F(1) = 8.743 \cdot 10^{12}$ Значение функции в экстремальных точках

Новая начальная точка

$n = 50$

$exp := \text{minimize}(F, n) = 52.149$ $F(52.149) = 2.937 \cdot 10^{14}$

$F(5) = 6.541 \cdot 10^{13}$ $F(10) = 1.53 \cdot 10^{14}$ $F(15) = 2.257 \cdot 10^{14}$

$F(20) = 2.722 \cdot 10^{14}$ $F(30) = 3.037 \cdot 10^{14}$ $F(40) = 2.998 \cdot 10^{14}$

$n = 27$
 $exp := \text{maximize}(F, n) = ?$ локальный максимум

$F(32.048) = 3.042 \cdot 10^{14}$

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА О ДРОБИЛКЕ С КРИВОЛИНЕЙНЫМИ РО

Значения коэффициентов

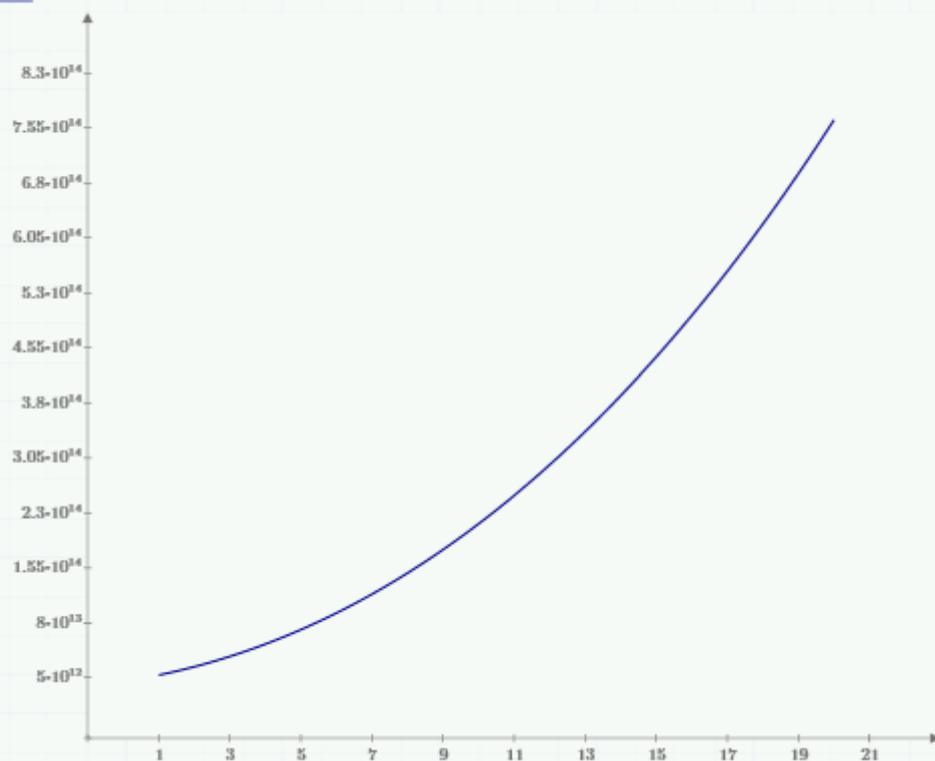
$$\sigma_f := 2 \cdot 10^6 \quad \sigma_1 := 3 \cdot 10^6 \quad n_* := 15 \quad k := 1.1 \quad \rho := 1300 \quad \alpha := 0.037$$

Оптимизируемая функция

$$F(n) := n \cdot \left(1 - e^{-2 \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{\sigma_f + (\sigma_1 \cdot (k^{n-1}) - \sigma_f) \cdot \left(e^{\frac{(n-1)}{(n_*-1)} \right)}{\rho}}}} \right) \cdot \left(\sigma_f + (\sigma_1 \cdot (k^{n-1}) - \sigma_f) \cdot \left(e^{\frac{(n-1)}{(n_*-1)} \right)} \right)^2$$

График функции

$F(n)$



n

Одномерная оптимизация

$$\sigma_f := 2 \cdot 10^6 \quad \sigma_1 := 3 \cdot 10^6 \quad n_* := 15 \quad k := 1.1 \quad \rho := 1300 \quad \alpha := 0.037$$

Ограничивающие приближения

$$F(n) := n \cdot \left(1 - e^{-2 \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{\sigma_f + (\sigma_1 \cdot (k^{n-1}) - \sigma_f) \cdot \left(e^{-\frac{(n-1)}{(n_*-1)}} \right)}{\rho}}} \right) \cdot \left(\sigma_f + (\sigma_1 \cdot (k^{n-1}) - \sigma_f) \cdot \left(e^{-\frac{(n-1)}{(n_*-1)}} \right) \right)^2$$

$$n \geq 1$$

Начальная точка

$$n := 5$$

Решатель

$$exp := \text{minimize}(F, n) = 1$$

Результат оптимизации

$$F(1) = 8.743 \cdot 10^{12}$$

Значение функции в экстремальных точках

$$F(5) = 7.079 \cdot 10^{13}$$

$$F(10) = 2.153 \cdot 10^{14}$$

$$F(15) = 4.427 \cdot 10^{14}$$

$$F(20) = 7.661 \cdot 10^{14}$$

$$F(30) = 1.793 \cdot 10^{15}$$

$$F(40) = 3.596 \cdot 10^{15}$$

Приложение Б

Компьютерное моделирование динамики зерноизмельчителя

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИЗМЕРЬЧИТЕЛЯ

$$\omega_{01} := 5$$

$$\omega_{02} := 2$$

$$\omega_{12} := 2.6$$

$$\omega_{21} := 4.5$$

$$\omega := 150$$

$$n_1 := 0.67$$

$$n_2 := 2$$

$$t_0 := 0$$

$$t_1 := 30$$

$$K_1 := 0.03$$

$$K_2 := 0.5$$

Given

$$\varphi_1'(t) = v_1(t)$$

$$\varphi_2'(t) = v_2(t)$$

$$v_1'(t) + 2 \cdot n_1 \cdot (v_1(t) - v_2(t)) + (\omega_{12})^2 \cdot (\varphi_1(t) - \varphi_2(t)) + (\omega_{01})^2 \cdot \varphi_1(t) = K_1 \cdot (\omega)^2 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$v_2'(t) + 2 \cdot n_2 \cdot (v_2(t) - v_1(t)) + (\omega_{02})^2 \cdot \varphi_2(t) + (\omega_{21})^2 \cdot (\varphi_2(t) - \varphi_1(t)) = -K_2 \cdot v_1'(t)$$

$$\varphi_1(t_0) = 0.001$$

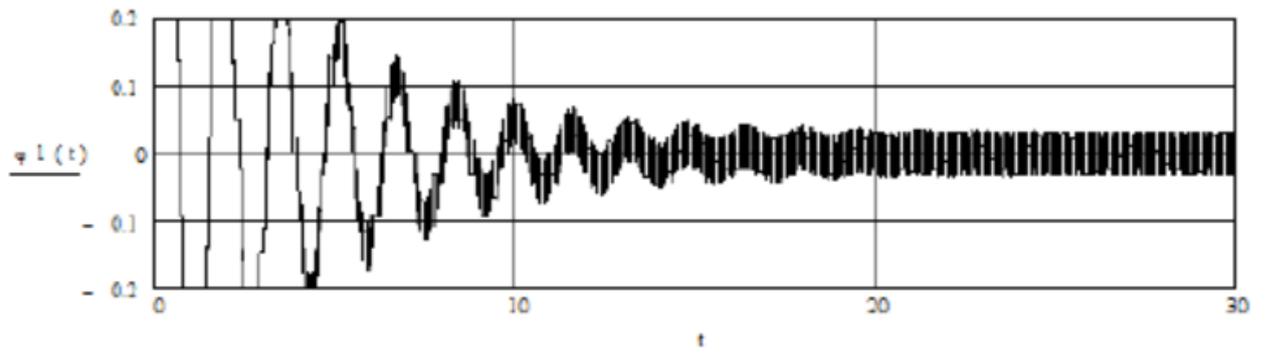
$$v_1(t_0) = 0.001$$

$$\varphi_2(t_0) = 0.001$$

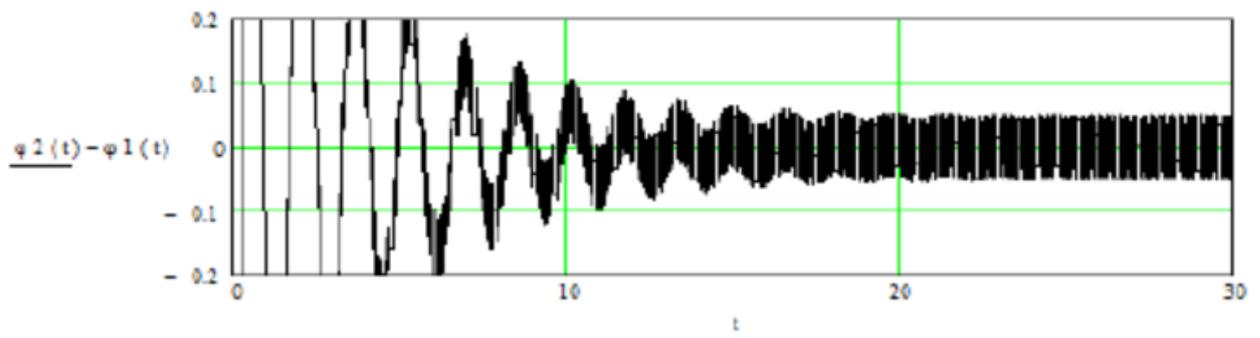
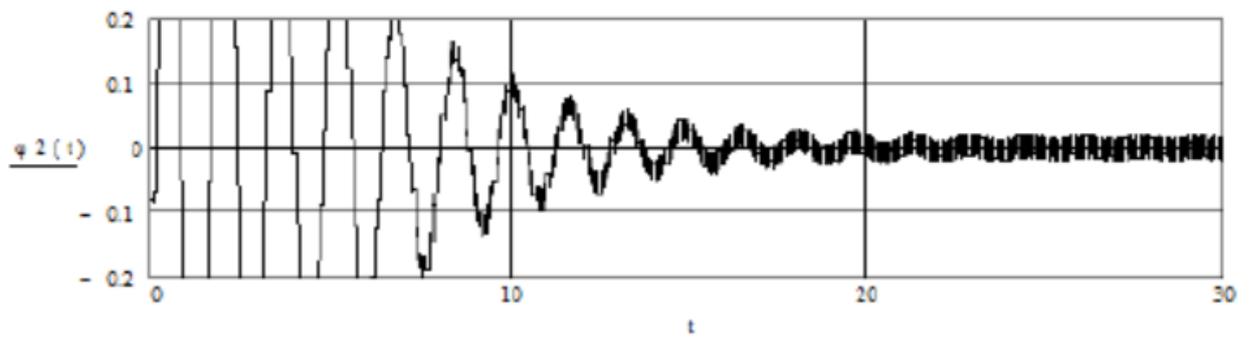
$$v_2(t_0) = 0.001$$

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} := \text{Odesolve} \left[\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{pmatrix}, t, t_1 \right]$$

$$t := 0, 0.001.. 30$$



¶



Приложение В
Динамика антирезонансного режима работы вибрационного
зерноизмельчителя

ДИНАМИКА АНТИРЕЗОНАНСНОГО РЕЖИМА

$$\omega_{01} := 20$$

$$\omega_{02} := 50$$

$$\omega_{12} := 2.6$$

$$\omega_{21} := 4.5$$

$$\omega := 50$$

$$n_1 := 0.67$$

$$n_2 := 2$$

$$K_1 := 0.03$$

$$t_0 := 0$$

$$t_1 := 10$$

$$K_2 := 0.5$$

Given

$$\varphi_1'(t) = v_1(t)$$

$$\varphi_2'(t) = v_2(t)$$

$$v_1'(t) + 2 \cdot n_1 \cdot (v_1(t) - v_2(t)) + (\omega_{12})^2 \cdot (\varphi_1(t) - \varphi_2(t)) + (\omega_{01})^2 \cdot \varphi_1(t) = K_1 \cdot (\omega)^2 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$v_2'(t) + 2 \cdot n_2 \cdot (v_2(t) - v_1(t)) + (\omega_{02})^2 \cdot \varphi_2(t) + (\omega_{21})^2 \cdot (\varphi_2(t) - \varphi_1(t)) = -K_2 \cdot v_1'(t)$$

$$\varphi_1(t_0) = 0.001$$

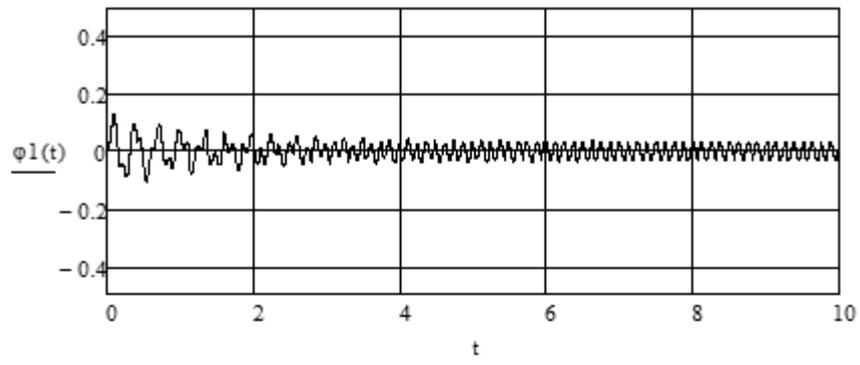
$$v_1(t_0) = 0.001$$

$$\varphi_2(t_0) = 0.001$$

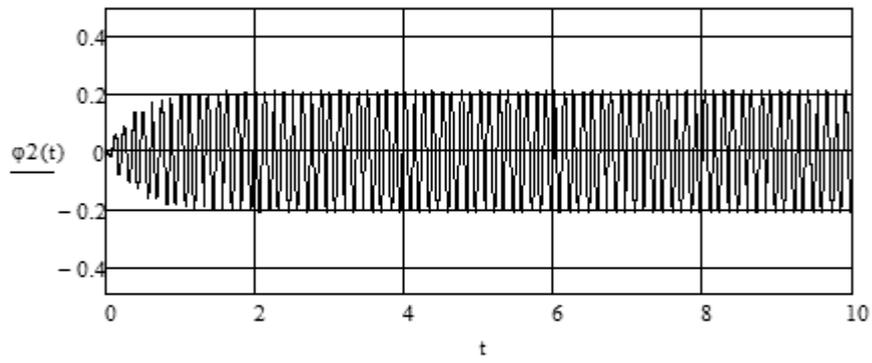
$$v_2(t_0) = 0.001$$

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} := \text{Odesolve} \left[\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{pmatrix}, t, t_1 \right]$$

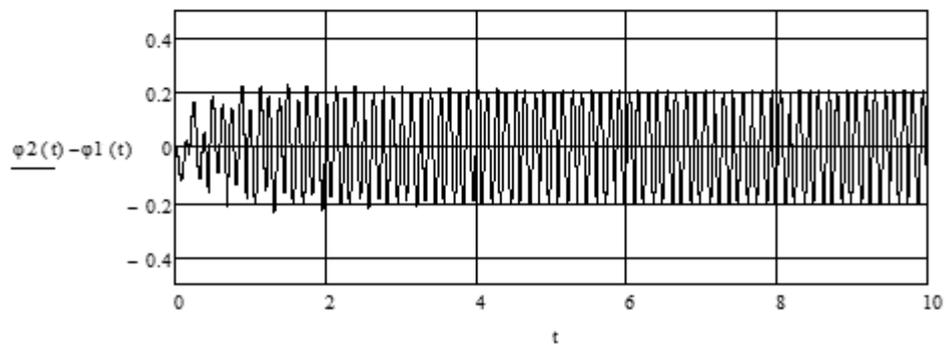
$$t := 0, 0.001.. 10$$



a



б



B

Приложение Г
Методика обработки основного эксперимента по плану Бокса -
Бенкена

Обработка эксперимента, проведенного по любому плану, проводится в несколько этапов [206]:

1. Определяют среднее значение \bar{y}_u и дисперсию s_u^2 каждого опыта по выражениям

$$\bar{y}_u = \frac{1}{m} \sum_{g=1}^m y_{gu}; \quad s_u^2 = \frac{\sum_{g=1}^m (y_{gu} - \bar{y}_u)^2}{m-1}, \quad (\Gamma.1)$$

где u – номер опыта или номер строки в матрице эксперимента; g ,
 m – номер и число повторных наблюдений.

Корень квадратный из дисперсии, взятый с положительным знаком, дает квадратическое отклонение (квадратичную ошибку)

$$s_u = \sqrt{\frac{\sum_{g=1}^m (y_{gu} - \bar{y}_u)^2}{m-1}}. \quad (\Gamma.2)$$

2. Рассчитывают значение G критерия Кохрена

$$G = s_{u \max}^2 / \sum_{u=1}^N s_u^2, \quad (\Gamma.3)$$

где N - число опытов или строк в матрице эксперимента;

$s_{u \max}^2$ - максимальная дисперсия из всех строк матрицы эксперимента.

С этим критерием связаны числа степеней свободы: $\varphi_1=m-1$; $\varphi_2=N$.

Проверяют гипотезу однородности дисперсий сопоставлением расчетного G с его табличным значением G_T . Если $G < G_T$, гипотеза принимается. Критические (табличные) значения G следует выбирать из таблиц [197,206].

3. Вычисляют дисперсии воспроизводимости опытов. Если дисперсии однородны, то дисперсии по опытам можно усреднить и пользоваться формулой

$$s_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N s_u^2 \quad \text{или, по-иному} \quad s_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{g=1}^m (y_{gu} - \bar{y}_u)^2}{N(m-1)}. \quad (\Gamma.4)$$

4. Вычисляют коэффициенты уравнения регрессии.

5. Проверяют

значимость коэффициентов, для чего:

а) находят ошибку в определении i -го коэффициента регрессии s_{bi}^2 и s_{bii}^2 или s_{bij}^2 , которая зависит от s_y^2 и находится по специальным формулам.

б) определяют критические значения коэффициентов по формулам:

$$b_{i\text{кр}} = s_{bi} \cdot t; \quad (\Gamma.5)$$

$$b_{ii\text{кр}} = s_{bii} \cdot t \quad \text{и т.д.} \quad (\Gamma.6)$$

Дисперсии оценок коэффициентов регрессионной модели для симметричных планов определяют по формулам

$$s_{b_0}^2 = s_y^2 N^*; \quad s_{bi}^2 = s_y^2 a^{-1}; \quad s_{bii}^2 = s_y^2 r^*; \quad s_{bij}^2 = s_y^2 p^{-1}. \quad (\Gamma.7)$$

в) Сравнивая b_i и $b_{i\text{кр}}$, делают вывод об их значимости или незначимости. Если $b_i > b_{i\text{кр}}$, то коэффициент значим, в противном случае незначим.

Формируют уравнение регрессии и проверяют его адекватность. Проверку ведут по критерию Фишера F :

$$F = \frac{s_{ад}^2}{s_y^2}, \quad (\Gamma.8)$$

где $s_{ад}^2$ - дисперсия адекватности (остаточная дисперсия).

Последнюю определяют по формуле

$$s_{ад}^2 = \frac{m \sum_{u=1}^N \Delta y_u^2}{N - \ell} = \frac{m \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - y_u)^2}{N - \ell},$$

где Δy_u - разность между наблюдаемым в эксперименте \bar{y}_u и вычисляемым по уравнению регрессии y_u значением отклика в u -ом опыте;

ℓ - число значимых коэффициентов в уравнении.

Для проверки гипотезы об адекватности используют сравнение расчетного и табличного (таблица 10.12 в [206]) значений критерия Фишера. Если $F < F_T$, то гипотеза об адекватности принимается, в противном случае – отвергается.

Для проверки общего качества уравнения регрессии в программе Mathcad используется коэффициент детерминации R^2 , который в общем случае рассчитывается по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum s^2}{\sum (\bar{y}_u - y_u)^2}. \quad (\Gamma.9)$$

Он показывает степень корреляции между экспериментальными и предсказанными данными. Его значения находятся между нулем и единицей. Чем ближе этот коэффициент к единице, тем больше уравнение регрессии объясняет поведение y .

Большинство из рассмотренных выше расчетов осуществляется автоматически программой $polyfitc(X, Y, n/"terms"/M, [conf])$ пакета Mathcad.

Функция $polyfitc(X, Y, n/"terms"/M, [conf])$ возвращает коэффициенты регрессии для поверхности регрессии многомерного полинома, аппроксимирующие результаты, записанные в матрице Y , к данным, содержащимся в матрице X [48]. Уравнение регрессии полинома можно определить, задав степень полинома n , или при помощи его членов, как указано в строке “*terms*” или в матрице M . Используется матрица M , если не требуется включать пересечение в аппроксимацию полиномом. Используется дополнительный аргумент $conf$, чтобы указать доверительный интервал, отличающийся от заданного по умолчанию значения 95 %.

Матрица, возвращаемая функцией $polyfitc$, имеет следующие столбцы (таблица Г.1):

Аргументы функции имеют следующее содержание:

- X — матрица плана или матрица, в которой каждый столбец представляет независимую переменную. Каждый столбец X должен иметь совместимые единицы измерения.

Таблица Г.1 – Содержание матрицы, возвращаемой функцией *polyfitc*

Столбец	Описание
0	Метки для каждого члена, включаемого в отчет
1	Коэффициенты регрессии для каждого члена
2	Среднеквадратическая ошибка для коэффициента регрессии
3, 4	Нижняя и верхняя границы доверительного интервала коэффициента регрессии
5	Коэффициент инфляции дисперсии — мера мультиколлинеарности (т. е. тесной корреляционной взаимосвязи между отбираемыми для анализа факторами, совместно воздействующими на общий результат, которая затрудняет оценивание регрессионных параметров)
6	Тестовая статистика с распределением Стьюдента для проверки значимости члена
7	<i>P</i> -значение — вероятность отбраковки члена на основе <i>t</i> -статистики, когда фактически он имеет значение

• Y — вектор или матрица с результатами измерений или моделирования, где каждая строка содержит результаты отдельного выполнения или точку данных, определенную в X . Если строки содержат неодинаковое число реплик, необходимо заполнить пустые элементы Y значениями *NaN*. Элементы Y должны иметь совместимые единицы измерения.

• n — целое число, задающее степень полинома. Оно должно быть меньше общего числа точек данных: $1 \leq n \leq \text{length}(Y) - 1$. В противном случае задача окажется под ограничением, которое не позволяет получить уникальное решение.

• “*terms*” — строка, содержащая члены или факторы и взаимодействия, которые требуется включить в регрессию полинома. К примеру, строка “*A B AB AA BB*” означает, что полином содержит следующие члены:

$$c_0 + c_1 A + c_2 B + c_3 A B + c_4 A^2 + c_5 B^2.$$

В качестве разделителя можно использовать пробел, запятую, двоеточие или точку с запятой.

• M — матрица, задающая полином, с начальными значениями коэффициентов в первом столбце и показателями степени независимых переменных для каждого члена в остальных столбцах. Для описанного выше полинома определяем матрицу M следующим образом.

$$M := \begin{bmatrix} c_0 & 0 & 0 \\ c_1 & 1 & 0 \\ c_2 & 0 & 1 \\ c_3 & 1 & 1 \\ c_4 & 2 & 0 \\ c_5 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

• $conf$ (необязательный) — требуемый доверительный предел — доля, выраженная числом в интервале от 0 до 1 включительно. По умолчанию $conf = 0.95$ для доверительного интервала 95 %.

В дополнение к рассмотренной функции возможно использование функций $polyfit(X, Y, n/'terms'/M)$ и $polyfitstat(X, Y, n/'terms'/M, [conf])$.

$Polyfit(X, Y, n/'terms'/M)$ определяет функцию, описывающую поверхность многомерной полиномиальной регрессии, которая подгоняет результаты, записанные в матрице Y , к данным, найденным в матрице X . Уравнение полиномиальной регрессии можно определить, задав степень полинома n , а также при помощи его членов, как указано в строке “ $terms$ ” или в матрице M . Используется матрица M , если не требуется включать пересечение в аппроксимацию полиномом.

Рассмотрим, например, функцию полиномиальной регрессии p :

$$p := polyfit(X, Y, 1) \\ p(v) = 1.075$$

Функция p берет векторный аргумент v , указывающий значение для каждой независимой переменной p , как описывается матрицей X . Каждая переменная вектора v должна иметь единицы, совместимые с соответствующим столбцом матрицы X . Единицы измерения, возвращаемые аппроксимирующей функцией p , совместимы с единицами измерения матрицы Y .

Функция *polyfitstat*(*X*, *Y*, *n*/*"terms"*/*M*, [*conf*]) возвращает статистические данные о модели полиномиальной регрессии, аппроксимирующей результаты, записанные в матрице *Y*, к данным, содержащимся в матрице *X*. Уравнение полиномиальной регрессии можно определить, задав степень полинома *n*, или при помощи его членов, как указано в строке *"terms"* или в матрице *M*. Используется матрица *M*, если в аппроксимацию полиномом не требуется включать пересечение. Используется дополнительный аргумент *conf*, чтобы указать доверительный интервал, отличающийся от заданного по умолчанию значения 95 %.

Второй столбец матрицы, возвращаемой функцией *polyfitstat*, содержит следующие элементы (таблица 3.11).

Таблица Г.2 – Элементы матрицы, возвращаемой функцией *polyfitstat*

Строка	Описание
1	Среднеквадратическое отклонение для <i>Y</i>
2, 3, 4	R^2 , скорректированный R^2 и предсказанный R^2
5	PRESS — сумма квадратов ошибок по предсказанию (применяется для масштабирования остатков)
6	Статистика Дарбина-Уотсона для автокорреляции
7	Матрица коэффициентов регрессии, возвращенных функцией <i>polyfitc</i>
8	Матрица ANOVA для модели регрессии с такими же столбцами, как в таблице результатов, возвращаемой функцией <i>anova</i> и следующими строками. <ul style="list-style-type: none"> Регрессия — промежуточная сумма, которая затем разбивается по всем элементам (исключая пересечение). Остаток (погрешность) — промежуточная сумма, которая затем разбивается на погрешность аппроксимации и чистую погрешность эксперимента. Общая сумма для модели регрессии.
9	Матрица диагностики со следующими столбцами. <ol style="list-style-type: none"> Нумерация каждого выполнения или точки данных.

	<p>2. Наблюдаемый результат по каждому выполнению или точке данных.</p> <p>3. Предсказанный в ходе исследования результат с помощью модели регрессии.</p> <p>4. Остаток — разность между наблюдаемым и предсказанным результатом.</p> <p>5. Сила — мера расстояния от наблюдаемого результата до точки, находящейся в центре всех наблюдаемых результатов.</p> <p>6. Остаток по Стьюденту — остаток, деленный на дисперсию, рассчитанную по наблюдаемым результатам.</p> <p>7. R-Стьюдент — остаток, деленный на дисперсию, рассчитанную по набору данных, из которого удалены наблюдаемые результаты.</p> <p>8. Расстояние Кука — мера влияния наблюдаемых результатов на все другие точки данных.</p> <p>9. DFFITS — разность между результатом, предсказанным с помощью модели регрессии, построенной по набору данных, в который включены наблюдаемые результаты, и результатом, предсказанным с помощью другой модели, из которой наблюдаемые результаты исключены.</p>
--	--

Аргументы функции содержат следующие компоненты:

- X — матрица плана или матрица, в которой каждый столбец представляет независимую переменную. Каждый столбец X должен иметь совместимые единицы измерения.

- Y — вектор или матрица с результатами измерений или моделирования, где каждая строка содержит результаты отдельного выполнения или точку данных, определенную в X . Если строки содержат неодинаковое число реплик, необходимо заполнить пустые элементы Y значениями *NaN*. Элементы Y должны иметь совместимые единицы измерения.

- n — целое число, определяющее степень полинома. Оно должно быть меньше общего числа точек данных: $1 \leq n \leq \text{length}(Y) - 1$. В противном случае задача окажется под ограничением, которое не позволит получить уникальное решение.

- “*terms*” — строка, содержащая элементы или факторы и взаимодействия, которые требуется включить в полиномиальную регрессию. Строка "A B AB AA BB" означает, что полином содержит следующие члены:

$$c_0 + c_1 \cdot A + c_2 \cdot B + c_3 \cdot A \cdot B + c_4 \cdot A^2 + c_5 \cdot B^2.$$

В качестве разделителя можно использовать пробел, запятую, двоеточие или точку с запятой.

• M — матрица, задающая полином, с начальными значениями коэффициентов в первом столбце и показателями степени независимых переменных для каждого члена в остальных столбцах.

Приложение Д
Программа и пример выполнения статистической обработки ситового анализа

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СИТОВОГО А Н-АЛИЗА (на примере опыта № 1, пшеница W=10,9%)

Полученные экспериментальные данные

$$\begin{array}{c}
 \text{ORIGIN} := 1 \\
 \text{-----} \\
 i := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix} \quad X := \begin{pmatrix} 0.5 \\ 1.5 \\ 2.5 \\ 3.5 \\ 4.5 \\ 5.5 \end{pmatrix} \quad P := \begin{pmatrix} 0.02 \\ 0.36 \\ 0.41 \\ 0.14 \\ 0.06 \\ 0.01 \end{pmatrix} \\
 i := 1, 2, \dots, 6
 \end{array}$$

Расчет модуля размола

$$M(i) := \sum_{k=1}^i (X_k \cdot P_k) \quad M(6) = 2.39$$

Оценка дисперсии

$$D(i) := \sum_{k=1}^i \left[(X_k - M(i))^2 \cdot P_k \right] \quad D(6) = 0.898$$

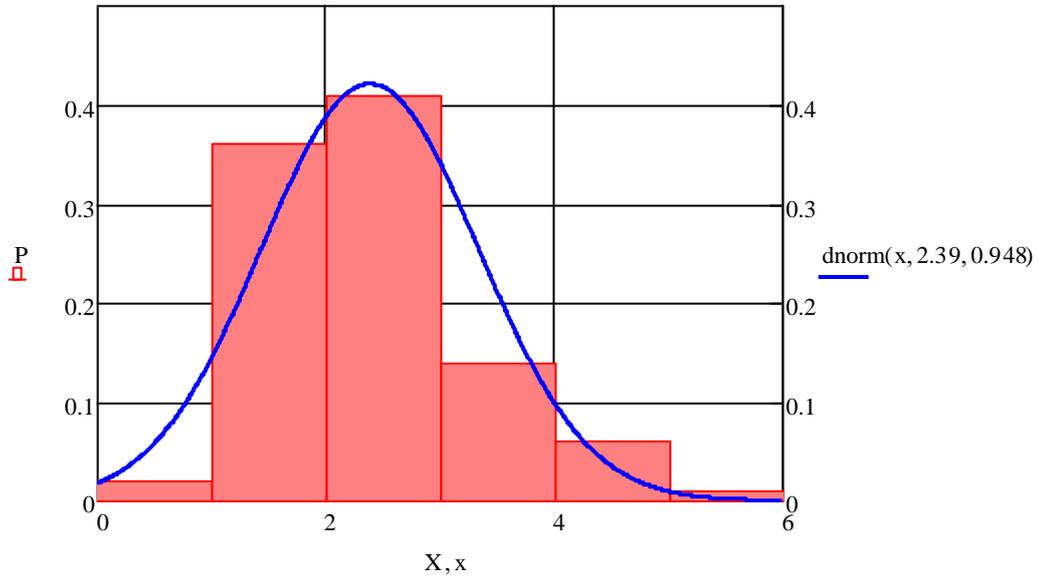
Оценка среднеквадратического отклонения

$$\sigma := \sqrt{D(6)} \quad \sigma = 0.948$$

Коэффициент вариации модуля размола (%)

$$v := \frac{\sigma \cdot 100}{M(6)} \quad v = 39.648$$

Экспериментальная гистограмма и теоретическая плотность нормального распределения остатков на ситах



Расчет критерия согласия хи-квадрат
Пирсона

Исходные данные для расчета:

ORIGIN:= 1

i := 1,2..6

M := 2.39

$\sigma := 0.948$

$i := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix}$

$X := \begin{pmatrix} 0.5 \\ 1.5 \\ 2.5 \\ 3.5 \\ 4.5 \\ 5.5 \end{pmatrix}$

$P := \begin{pmatrix} 0.02 \\ 0.32 \\ 0.37 \\ 0.22 \\ 0.06 \\ 0.01 \end{pmatrix}$

$$x := \begin{pmatrix} 0.5 \\ 1.5 \\ 2.5 \\ 3.5 \\ 4.5 \\ 5.5 \end{pmatrix} \quad \text{dnorm}(i, M, \sigma) = \begin{pmatrix} 0.144 \\ 0.387 \\ 0.342 \\ 0.099 \\ 9.509 \times 10^{-3} \\ 2.987 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Переобозначение экспериментальных и теоретических частот

$$\underline{Y1} := F \quad Y2 := \text{dnorm}(i, M, \sigma)$$

Расчет критерия согласия хи-квадрат

$$\chi^{(i)} := \sum_{k=1}^i \left[(Y1 - Y2)^2 \cdot \frac{1}{Y2} \right] \quad \chi(6) = 5.096$$

Табличное значение $\chi_{\text{табл}}$ при уровне значимости $\alpha=0.05$ и степенях свободы $i-1=5$ составляет 11,1. Поскольку $\chi(6)$ меньше $\chi_{\text{табл}}$, то гипотеза о нормальном законе распределения остатков на ситах не отвергается.

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СИТОВОГО
АНАЛИЗА (на примере опыта № 1, ячмень W=10,2
%)**

Полученные экспериментальные данные

$$\begin{array}{ccc}
 & & \text{ORIGIN} := 1 \\
 & & \text{XXXXXXXXXX} \\
 i := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix} & X := \begin{pmatrix} 0.5 \\ 1.5 \\ 2.5 \\ 3.5 \\ 4.5 \\ 5.5 \end{pmatrix} & P := \begin{pmatrix} 0.02 \\ 0.36 \\ 0.41 \\ 0.14 \\ 0.06 \\ 0.01 \end{pmatrix} \\
 & i := 1, 2, \dots, 6 &
 \end{array}$$

Расчет модуля размола

$$M(i) := \sum_{k=1}^i (X_k \cdot P_k) \qquad M(6) = 2.39$$

Оценка дисперсии

$$D(i) := \sum_{k=1}^i \left[(X_k - M(i))^2 \cdot P_k \right] \qquad D(6) = 0.898$$

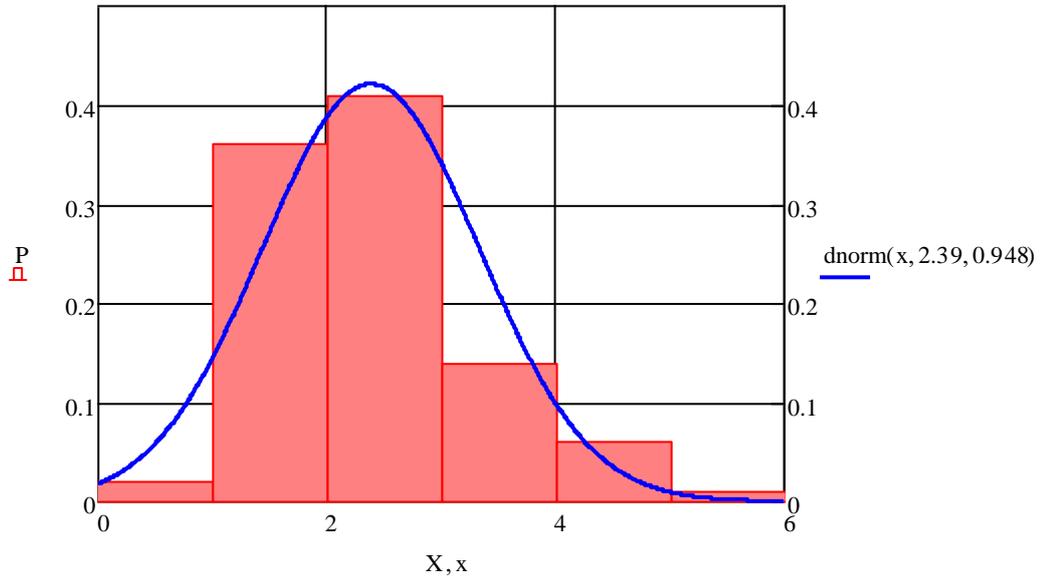
Оценка среднеквадратического отклонения

$$\sigma := \sqrt{D(6)} \qquad \sigma = 0.948$$

Коэффициент вариации модуля помола (%)

$$v := \frac{\sigma \cdot 100}{M(6)} \qquad v = 39.648$$

Экспериментальная гистограмма и теоретическая плотность нормального распределения остатков на ситах



Расчет критерия согласия хи-квадрат
Пирсона

Исходные данные для расчета:

ORIGIN:= 1

i := 1,2..6

M := 2.39

$\sigma := 0.948$

$i := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix}$

$X := \begin{pmatrix} 0.5 \\ 1.5 \\ 2.5 \\ 3.5 \\ 4.5 \\ 5.5 \end{pmatrix}$

$P := \begin{pmatrix} 0.02 \\ 0.32 \\ 0.37 \\ 0.22 \\ 0.06 \\ 0.01 \end{pmatrix}$

$$x := \begin{pmatrix} 0.5 \\ 1.5 \\ 2.5 \\ 3.5 \\ 4.5 \\ 5.5 \end{pmatrix} \quad \text{dnorm}(i, M, \sigma) = \begin{pmatrix} 0.144 \\ 0.387 \\ 0.342 \\ 0.099 \\ 9.509 \times 10^{-3} \\ 2.987 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Переобозначение экспериментальных и теоретических частот

$$\underline{Y1} := F \quad Y2 := \text{dnorm}(i, M, \sigma)$$

Расчет критерия согласия хи-квадрат

$$\chi^{(i)} := \sum_{k=1}^i \left[(Y1 - Y2)^2 \cdot \frac{1}{Y2} \right] \quad \chi(6) = 5.096$$

Табличное значение $\chi_{\text{табл}}$ при уровне значимости $\alpha=0.05$ и степенях свободы $i-1=5$ составляет 11,1. Поскольку $\chi(6)$ меньше $\chi_{\text{табл}}$, то гипотеза о нормальном законе распределения остатков на ситах не отвергается.

Приложение Е
Сводная ведомость результатов основного эксперимента на пшенице

Сводная ведомость результатов основного эксперимента на пшенице

№ п/п	1	2	3	N, Вт	Q, $\frac{\text{кг}}{\text{ч}}$	$\mathcal{E}_{\text{изм}} = \frac{N \text{ кВт} \cdot \text{ч}}{Q, \text{ кг}}$	λ	y1	y2	y3	y4
	x1 («А»)	x2 («В»)	x3 («С»)					\mathcal{E} $= \frac{N \text{ Вт} \cdot \text{ч}}{Q \lambda \text{ кг} \cdot \lambda}$	M, мм	v, %	Ц, %
1	-1	-1	0	76,9	10	7,69	2,71	2,84	1,47	48,54	0,51
2	1	-1	0	170,4	30	5,68	1,67	3,40	2,39	39,65	6,73
3	-1	1	0	78,7	10	7,87	4,91	1,60	0,81	47,32	0,00
4	1	1	0	225,3	30	7,51	2,62	2,87	1,52	45,10	0,74
5	-1	0	-1	62,8	10	6,28	3,52	1,78	1,13	41,23	0,00
6	1	0	-1	130,8	30	4,36	2,33	1,87	1,71	35,12	3,21
7	-1	0	1	51,3	10	5,13	4,28	1,20	0,93	40,27	0,14
8	1	0	1	137,4	30	4,58	2,80	1,64	1,42	35,64	5,84
9	0	-1	-1	123,4	20	6,17	2,06	3,00	1,93	37,73	2,31
10	0	1	-1	162,4	20	8,12	3,46	2,35	1,15	45,26	1,45
11	0	-1	1	111,6	20	5,58	2,16	2,58	1,84	37,83	1,54
12	0	1	1	131,6	20	6,58	3,29	2,00	1,21	42,64	0,03
13	0	0	0	149,6	20	7,48	2,58	2,90	1,54	43,17	2,71
14	0	0	0	139,6	20	6,98	2,47	2,83	1,61	44,82	2,17
15	0	0	0	159,0	20	7,95	2,67	2,98	1,49	42,95	2,26

Приложение Ж
Программы и результаты компьютерной обработки основного эксперимента
на пшенице

ЭНЕГОЕМКОСТЬ ВИБРАЦИОННОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПШЕНИЦЫ

+

X := boxbehnken(3) =

	0	1	2	3	4
0	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"
1	1	1	-1	-1	0
2	2	1	1	-1	0
3	3	1	-1	1	0
4	4	1	1	1	0
5	5	1	-1	0	-1
6	6	1	1	0	-1
7	7	1	-1	0	1
8	8	1	1	0	1
9	9	1	0	-1	-1
10	10	1	0	1	-1
11	11	1	0	-1	1
12	12	1	0	1	1
13	13	1	0	0	0
14	14	1	0	0	0
15	15	1	0	0	0

Y :=

2.84
3.40
1.60
2.87
1.78
1.87
1.20
1.64
3.00
2.35
2.58
2.00
2.90
2.83
2.98

polyfitc(X, Y, 2) =

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"p"
1	"Intercept"	2.903	0.131	2.565	3.241	NaN	22.088	1.766·10 ⁻⁶
2	"A"	0.295	0.08	0.088	0.502	1	3.665	7.26·10 ⁻³
3	"B"	-0.375	0.08	-0.582	-0.168	1	-4.659	2.769·10 ⁻³
4	"C"	-0.198	0.08	-0.404	9.415·10 ⁻³	1	-2.454	0.029
5	"AB"	0.178	0.114	-0.115	0.47	1	1.559	0.09
6	"AC"	0.087	0.114	-0.205	0.38	1	0.769	0.238
7	"BC"	0.017	0.114	-0.275	0.31	1	0.154	0.442
8	"AA"	-0.543	0.118	-0.847	-0.238	1.011	-4.582	2.968·10 ⁻³
9	"BB"	0.317	0.118	0.013	0.622	1.011	2.676	0.022
10	"CC"	-0.738	0.118	-1.042	-0.433	1.011	-6.228	7.807·10 ⁻⁴

polyfitstat(X, Y, 2) =

	0	1	2
0	"Regression Analysis"	"Value"	
1	"Standard Deviation"	0.228	
2	"R2"	0.957	
3	"Adjusted R2"	0.88	
4	"Predicted R2"	0.342	
5	"PRESS"	3.992	
6	"Durbin-Watson"	3.213	
7	"Coefficients"	[11, 8]	
8	"ANOVA"	[15, 6]	
9	"Diagnostics"	[16, 9]	
10			
11			

МОДУЛЬ РАЗМОЛА ВИБРАЦИОННОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПШЕНИЦЫ

X := boxbehnken(3) =

	0	1	2	3	4
0	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"
1	1	1	-1	-1	0
2	2	1	1	-1	0
3	3	1	-1	1	0
4	4	1	1	1	0
5	5	1	-1	0	-1
6	6	1	1	0	-1
7	7	1	-1	0	1
8	8	1	1	0	1
9	9	1	0	-1	-1
10	10	1	0	1	-1
11	11	1	0	-1	1
12	12	1	0	1	1
13	13	1	0	0	0
14	14	1	0	0	0
15	15	1	0	0	0

Y :=

1.47
2.39
0.81
1.52
1.13
1.71
0.93
1.42
1.93
1.15
1.84
1.21
1.54
1.61
1.49

polyfitc(X, Y, 2) =

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"p"
1	"Intercept"	1.547	0.071	1.365	1.728	NaN	21.915	1.836·10 ⁻⁶
2	"A"	0.338	0.043	0.226	0.449	1	7.809	2.76·10 ⁻⁴
3	"B"	-0.368	0.043	-0.479	-0.256	1	-8.503	1.85·10 ⁻⁴
4	"C"	-0.065	0.043	-0.176	0.046	1	-1.504	0.096
5	"AB"	-0.053	0.061	-0.21	0.105	1	-0.859	0.215
6	"AC"	-0.023	0.061	-0.18	0.135	1	-0.368	0.364
7	"BC"	0.037	0.061	0.12	0.195	1	0.614	0.283
8	"AA"	-0.117	0.064	-0.281	0.046	1.011	-1.84	0.063
9	"BB"	0.118	0.064	-0.046	0.281	1.011	1.854	0.061
10	"CC"	-0.132	0.064	-0.296	0.031	1.011	-2.076	0.046

polyfitstat(X, Y, 2) =

	0	1
0	"Regression Analysis"	"Value"
1	"Standard Deviation"	0.122
2	"R2"	0.967
3	"Adjusted R2"	0.909
4	"Predicted R2"	0.523
5	"PRESS"	1.096
6	"Durbin-Watson"	2.018
7	"Coefficients"	[11, 8]
8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]

КОЭФФИЦИЕНТ ВАРИАЦИИ МОДУЛЯ РАЗМОЛА

+

X := boxbehnken(3) =

	0	1	2	3	4
0	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"
1	1	1	-1	-1	0
2	2	1	1	-1	0
3	3	1	-1	1	0
4	4	1	1	1	0
5	5	1	-1	0	-1
6	6	1	1	0	-1
7	7	1	-1	0	1
8	8	1	1	0	1
9	9	1	0	-1	-1
10	10	1	0	1	-1
11	11	1	0	-1	1
12	12	1	0	1	1
13	13	1	0	0	0
14	14	1	0	0	0
15	15	1	0	0	0

Y :=

48.54
39.65
47.32
45.10
41.23
35.12
40.27
35.64
37.73
45.26
37.83
42.64
43.17
44.82
42.95

polyfitc(X, Y, 2) =

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"p"
1	"Intercept"	43.647	0.851	41.459	45.835	NaN	51.275	2.667·10 ⁻⁸
2	"A"	-2.731	0.521	-4.071	-1.391	1	-5.24	1.677·10 ⁻³
3	"B"	2.071	0.521	0.731	3.411	1	3.974	5.3·10 ⁻³
4	"C"	-0.37	0.521	-1.71	0.97	1	-0.71	0.255
5	"AB"	1.667	0.737	-0.227	3.562	1	2.262	0.037
6	"AC"	0.37	0.737	-1.525	2.265	1	0.502	0.319
7	"BC"	-0.68	0.737	-2.575	1.215	1	-0.922	0.199
8	"AA"	-0.647	0.767	-2.619	1.325	1.011	-0.843	0.219
9	"BB"	2.153	0.767	0.181	4.125	1.011	2.806	0.019
10	"CC"	-4.935	0.767	-6.907	-2.962	1.011	-6.431	6.751·10 ⁻⁴

polyfitstat(X, Y, 2) =

	0	1
0	"Regression Analysis"	"Value"
1	"Standard Deviation"	1.474
2	"R2"	0.954
3	"Adjusted R2"	0.87
4	"Predicted R2"	0.38
5	"PRESS"	145.172
6	"Durbin-Watson"	2.585
7	"Coefficients"	[11, 8]
8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]

СОДЕРЖАНИЕ ЦЕЛЫХ ЗЕРЕН В ПШЕНИЧНОЙ ДЕРТИ

	0	1	2	3	4
0	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"
1	1	1	-1	-1	0
2	2	1	1	-1	0
3	3	1	-1	1	0
4	4	1	1	1	0
5	5	1	-1	0	-1
6	6	1	1	0	-1
7	7	1	-1	0	1
8	8	1	1	0	1
9	9	1	0	-1	-1
10	10	1	0	1	-1
11	11	1	0	-1	1
12	12	1	0	1	1
13	13	1	0	0	0
14	14	1	0	0	0
15	15	1	0	0	0

$X := \text{boxbehnken}(3) =$

0.51
6.73
0
0.74
0
3.21
0.14
5.84
2.31
1.45
1.54
0.03
2.71
2.17
2.26

$Y :=$

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"p"
1	"Intercept"	2.38	0.625	0.775	3.985	NaN	3.811	$6.243 \cdot 10^{-3}$
2	"A"	1.984	0.382	1.001	2.967	1	5.187	$1.752 \cdot 10^{-3}$
3	"B"	-1.109	0.382	-2.092	-0.126	1	-2.899	0.017
4	"C"	0.073	0.382	-0.911	1.056	1	0.19	0.429
5	"AB"	-1.37	0.541	-2.76	0.02	1	-2.533	0.026
6	"AC"	0.623	0.541	-0.768	2.013	1	1.151	0.151
7	"BC"	-0.163	0.541	-1.553	1.228	1	-0.3	0.388
8	"AA"	0.29	0.563	-1.157	1.737	1.011	0.515	0.314
9	"BB"	-0.675	0.563	-2.122	0.772	1.011	-1.199	0.142
10	"CC"	-0.373	0.563	-1.82	1.075	1.011	-0.662	0.269

$\text{polyfitc}(X, Y, 2) =$

	0	1
0	"Regression Analysis"	"Value"
1	"Standard Deviation"	1.082
2	"R2"	0.901
3	"Adjusted R2"	0.722
4	"Predicted R2"	0
5	"PRESS"	91.299
6	"Durbin-Watson"	1.741
7	"Coefficients"	[11, 8]
8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]

$\text{polyfitstat}(X, Y, 2) =$

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПШЕНИЦЫ

ФУНКЦИЯ ЦЕЛИ

$$\check{Y}(x_1, x_2, x_3) := 2.90 + 0.30 \cdot x_1 - 0.38 \cdot x_2 - 0.20 \cdot x_3 + 0.18 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0.54 \cdot (x_1)^2 + 0.32 \cdot (x_2)^2 - 0.74 \cdot (x_3)^2$$

ТОЧКИ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ

$$x_1 := 1 \quad x_2 := 1 \quad x_3 := 0$$

Given

Ограничения

$$1.1 \leq 1.55 + 0.34 \cdot x_1 - 0.37 \cdot x_2 - 0.07 \cdot x_3 - 0.12 \cdot (x_1)^2 + 0.12 \cdot (x_2)^2 + 0.13 \cdot (x_3)^2 \leq 1.8$$

$$0 \leq 43.65 - 2.73 \cdot x_1 + 2.07 \cdot x_2 + 1.67 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2.15 \cdot (x_2)^2 - 4.94 \cdot (x_3)^2 \leq 50$$

$$0 \leq 2.38 + 1.98 \cdot x_1 - 1.11 \cdot x_2 - 1.37 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.62 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0.68 \cdot (x_2)^2 \leq 1$$

$$-1 \leq x_1 \leq 1$$

$$-1 \leq x_2 \leq 1$$

$$-1 \leq x_3 \leq 1$$

ВСТРОЕННАЯ ФУНКЦИЯ МАТНСАД ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ

$$\text{opt}\check{Y}(x_1, x_2, x_3) := \text{Minimize}(\check{Y}, x_1, x_2, x_3)$$

РЕЗУЛЬТАТ ОПТИМИЗАЦИИ

$$\text{opt}\check{Y}(x_1, x_2, x_3) = \begin{pmatrix} -0.906 \\ 0.311 \\ 1 \end{pmatrix}$$

ПРОВЕРКА ОГРАНИЧЕНИЙ

$$x_1 := -0.906$$

$$x_2 := 0.311$$

$$x_3 := 1$$

$$1.55 + 0.34 \cdot x_1 - 0.37 \cdot x_2 - 0.07 \cdot x_3 - 0.12 \cdot (x_1)^2 + 0.12 \cdot (x_2)^2 + 0.13 \cdot (x_3)^2 = 1.1$$

$$43.65 - 2.73 \cdot x_1 + 2.07 \cdot x_2 + 1.67 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2.15 \cdot (x_2)^2 - 4.94 \cdot (x_3)^2 = 41.565$$

$$2.38 + 1.98 \cdot x_1 - 1.11 \cdot x_2 - 1.37 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.62 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0.68 \cdot (x_2)^2 = -5.609 \times 10^{-4}$$

ЗНАЧЕНИЕ ФУНКЦИИ ЦЕЛИ В ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЧКЕ

$$\check{Y}(x_1, x_2, x_3) = 1.107$$

Приложение 3
Сводная ведомость результатов основного эксперимента на ячмене

Сводная ведомость результатов основного эксперимента на ячмене

№ п/п	1	2	3	N, Bm	$Q, \frac{кг}{ч}$	$\mathcal{E}_{изм} = \frac{N \cdot Bт \cdot ч}{Q}, \frac{Вт \cdot ч}{кг}$	λ	$y1$	$y2$	$y3$	$y4$
	$x1$ («А»)	$x2$ («В»)	$x3$ («С»)					\mathcal{E} $= \frac{N \cdot Bт \cdot ч}{Q \cdot \lambda}, \frac{Вт \cdot ч}{кг \cdot \lambda}$	$M, мм$	$v, \%$	$\Pi, \%$
1	-1	-1	0	79,1	10	7,91	2,59	3,05	1,65	51,23	0,00
2	1	-1	0	190,2	30	6,34	2,75	3,62	2,45	43,54	5,33
3	-1	1	0	84,2	10	8,47	4,60	1,84	0,93	50,43	0,00
4	1	1	0	243,9	30	8,13	2,47	3,29	1,73	47,12	0,93
5	-1	0	-1	71,7	10	7,17	3,05	2,35	1,41	43,32	0,00
6	1	0	-1	149,4	30	4,98	3,49	2,00	1,72	38,91	3,53
7	-1	0	1	53,7	10	5,37	3,79	1,42	1,13	43,27	0,25
8	1	0	1	150,3	30	5,10	2,49	2,05	1,72	35,93	5,13
9	0	-1	-1	147,6	20	7,38	1,84	4,01	2,33	37,16	2,41
10	0	1	-1	179,2	20	8,96	2,95	3,04	1,45	46,66	1,63
11	0	-1	1	122,6	20	6,13	2,13	2,88	2,01	39,41	1,91
12	0	1	1	144,2	20	7,21	2,95	2,44	1,45	43,46	0,00
13	0	0	0	159,0	20	7,95	2,50	3,18	1,71	45,71	2,93
14	0	0	0	162,6	20	8,13	2,47	3,29	1,73	45,12	2,14
15	0	0	0	155,8	20	7,79	2,39	3,26	1,79	45,95	2,51

Приложение И
Программы и результаты компьютерной обработки основного эксперимента
на ячмене

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ВИБРАЦИОННОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЯЧМЕНЯ

	0	1	2	3	4	
0	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"	
1	1	1	-1	-1	0	3.05
2	2	1	1	-1	0	3.62
3	3	1	-1	1	0	1.84
4	4	1	1	1	0	3.29
5	5	1	-1	0	-1	2.35
6	6	1	1	0	-1	2.00
7	7	1	-1	0	1	1.42
8	8	1	1	0	1	2.05
9	9	1	0	-1	-1	4.01
10	10	1	0	1	-1	3.04
11	11	1	0	-1	1	2.88
12	12	1	0	1	1	2.44
13	13	1	0	0	0	3.18
14	14	1	0	0	0	3.29
15	15	1	0	0	0	3.26

X := boxbehnken(3) =

Y :=

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"P"
1	"Intercept"	3.243	0.178	2.785	3.702	NaN	18.181	4.626·10 ⁻⁶
2	"A"	0.288	0.109	6.688·10 ⁻³	0.568	1	2.632	0.023
3	"B"	-0.369	0.109	-0.65	-0.088	1	-3.376	9.885·10 ⁻³
4	"C"	-0.326	0.109	-0.607	-0.045	1	-2.987	0.015
5	"AB"	0.22	0.154	-0.177	0.617	1	1.424	0.107
6	"AC"	0.245	0.154	-0.152	0.642	1	1.586	0.087
7	"BC"	0.132	0.154	-0.265	0.53	1	0.858	0.215
8	"AA"	-0.715	0.161	-1.129	-0.302	1.011	-4.449	3.354·10 ⁻³
9	"BB"	0.422	0.161	8.739·10 ⁻³	0.835	1.011	2.625	0.023
10	"CC"	-0.573	0.161	-0.986	-0.16	1.011	-3.563	8.082·10 ⁻³

polyfitc(X, Y, 2) =

	0	1
0	"Regression Analysis"	"Value"
1	"Standard Deviation"	0.309
2	"R2"	0.936
3	"Adjusted R2"	0.821
4	"Predicted R2"	0
5	"PRESS"	7.549
6	"Durbin-Watson"	3.183
7	"Coefficients"	[11, 8]
8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]

polyfitstat(X, Y, 2) =

Модуль вибращионного размола ячменя

polyfitc(X,

X := boxbehnken(3) =

	0	1	2	3	4
0	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"
1	1	1	-1	-1	0
2	2	1	1	-1	0
3	3	1	-1	1	0
4	4	1	1	1	0
5	5	1	-1	0	-1
6	6	1	1	0	-1
7	7	1	-1	0	1
8	8	1	1	0	1
9	9	1	0	-1	-1
10	10	1	0	1	-1
11	11	1	0	-1	1
12	12	1	0	1	1
13	13	1	0	0	0
14	14	1	0	0	0
15	15	1	0	0	0

Y :=

1.65
2.45
0.93
1.73
1.41
1.72
1.13
1.72
2.33
1.45
2.01
1.45
1.71
1.73
1.79

7
"p"
$7.152 \cdot 10^{-7}$
$2.847 \cdot 10^{-4}$
$1.462 \cdot 10^{-4}$
0.061
0.5
0.137
0.11
0.013
0.039
0.164

polyfitstat(X, Y, 2) =

	0	1
0	"Regression Analysis"	"Value"
1	"Standard Deviation"	0.114
2	"R2"	0.97
3	"Adjusted R2"	0.917
4	"Predicted R2"	0.548
5	"PRESS"	0.991
6	"Durbin-Watson"	3.08
7	"Coefficients"	[11, 8]
8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]

Коэффициент вариации модуля помола ячменя

	0	1	2	3	4	
0	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"	(51.23
1	1	1	-1	-1	0	43.54
2	2	1	1	-1	0	50.43
3	3	1	-1	1	0	47.12
4	4	1	1	1	0	43.32
5	5	1	-1	0	-1	38.91
6	6	1	1	0	-1	43.27
7	7	1	-1	0	1	35.93
8	8	1	1	0	1	37.16
9	9	1	0	-1	-1	46.66
10	10	1	0	1	-1	39.41
11	11	1	0	-1	1	43.46
12	12	1	0	1	1	45.71
13	13	1	0	0	0	45.12
14	14	1	0	0	0	45.95
15	15	1	0	0	0	

X := boxbehnken(3) =

Y :=

+

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"p"
1	"Intercept"	45.593	1.016	42.982	48.204	NaN	44.888	5.18·10 ⁻⁸
2	"A"	-2.844	0.622	-4.443	-1.245	1	-4.572	2.996·10 ⁻³
3	"B"	2.041	0.622	0.442	3.64	1	3.282	0.011
4	"C"	-0.497	0.622	-2.096	1.101	1	-0.8	0.23
5	"AB"	1.095	0.88	-1.166	3.356	1	1.245	0.134
6	"AC"	-0.733	0.88	-2.994	1.529	1	-0.833	0.221
7	"BC"	-1.362	0.88	-3.624	0.899	1	-1.549	0.091
8	"AA"	0.586	0.916	-1.768	2.939	1.011	0.64	0.275
9	"BB"	1.901	0.916	-0.453	4.254	1.011	2.076	0.046
10	"CC"	-5.822	0.916	-8.175	-3.468	1.011	-6.359	7.108·10 ⁻⁴

polyfitc(X, Y, 2) =

	0	1
0	"Regression Analysis"	"Value"
1	"Standard Deviation"	1.759
2	"R2"	0.944
3	"Adjusted R2"	0.844
4	"Predicted R2"	0.128
5	"PRESS"	242.585
6	"Durbin-Watson"	2.273
7	"Coefficients"	[11, 8]
8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]

polyfitstat(X, Y, 2) =

Содержание целых зерен при измельчении ячменя

	0	1	2	3	4	
0	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"	0.00
1	1	1	-1	-1	0	5.33
2	2	1	1	-1	0	0.00
3	3	1	-1	1	0	0.93
4	4	1	1	1	0	0.00
5	5	1	-1	0	-1	3.53
6	6	1	1	0	-1	0.25
7	7	1	-1	0	1	5.13
8	8	1	1	0	1	2.41
9	9	1	0	-1	-1	1.63
10	10	1	0	1	-1	1.91
11	11	1	0	-1	1	0.00
12	12	1	0	1	1	2.93
13	13	1	0	0	0	2.14
14	14	1	0	0	0	2.51
15	15	1	0	0	0	

X := boxbehnken(3) =

Y :=

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"p"
1	"Intercept"	2.527	0.464	1.333	3.721	NaN	5.44	1.424·10 ⁻³
2	"A"	1.834	0.284	1.103	2.565	1	6.447	6.676·10 ⁻⁴
3	"B"	-0.886	0.284	-1.617	-0.155	1	-3.116	0.013
4	"C"	-0.035	0.284	-0.766	0.696	1	-0.123	0.453
5	"AB"	-1.1	0.402	-2.134	-0.066	1	-2.735	0.021
6	"AC"	0.338	0.402	-0.696	1.371	1	0.839	0.22
7	"BC"	-0.282	0.402	-1.316	0.751	1	-0.702	0.257
8	"AA"	-0.111	0.419	-1.187	0.965	1.011	-0.265	0.401
9	"BB"	-0.851	0.419	-1.927	0.225	1.011	-2.032	0.049
10	"CC"	-0.188	0.419	-1.265	0.888	1.011	-0.45	0.336

polyfitc(X, Y, 2) =

	0	1
0	"Regression Analysis"	"Value"
1	"Standard Deviation"	0.804
2	"R2"	0.928
3	"Adjusted R2"	0.798
4	"Predicted R2"	0
5	"PRESS"	47.477
6	"Durbin-Watson"	1.642
7	"Coefficients"	[11, 8]
8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]

polyfitstat(X, Y, 2) =

**ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЯЧМЕНЯ
ФУНКЦИЯ ЦЕЛИ**

$$\dot{Y}(x_1, x_2, x_3) := 3.24 + 0.29x_1 - 0.37x_2 - 0.33x_3 + 0.22x_1x_2 + 0.25x_1x_3 - 0.72(x_1)^2 + 0.42(x_2)^2 - 0.57(x_3)^2$$

ТОЧКИ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ

$$x_1 := 1$$

$$x_2 := 0$$

$$x_3 := 0$$

Given

$$1.1 \leq 1.74 + 0.31x_1 - 0.36x_2 - 0.08x_3 + 1.10x_1x_2 - 0.18(x_1)^2 + 0.13(x_2)^2 - 0.06(x_3)^2 \leq 1.8$$

$$0 \leq 45.59 - 2.84x_1 + 2.04x_2 + 1.10x_1x_2 + 1.90(x_2)^2 - 5.82(x_3)^2 \leq 50$$

$$0 \leq 2.53 + 1.83x_1 - 0.89x_2 - 1.10x_1x_2 - 0.85(x_2)^2 \leq 1$$

$$-1 \leq x_1 \leq 1$$

$$-1 \leq x_2 \leq 1$$

$$-1 \leq x_3 \leq 1$$

ВСТРОЕННАЯ ФУНКЦИЯ MATHCAD ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ

$$\text{opt}\dot{Y}(x_1, x_2, x_3) := \text{Minimize}(\dot{Y}, x_1, x_2, x_3)$$

РЕЗУЛЬТАТ ОПТИМИЗАЦИИ

$$\text{opt}\dot{Y}(x_1, x_2, x_3) = \begin{pmatrix} -0.231 \\ 0.827 \\ 1 \end{pmatrix}$$

ПРОВЕРКА ОГРАНИЧЕНИЙ

$$x_1 := -0.231$$

$$x_2 := 0.827$$

$$x_3 := 1$$

$$1.55 + 0.34x_1 - 0.37x_2 - 0.07x_3 - 0.12(x_1)^2 + 0.12(x_2)^2 + 0.13(x_3)^2 = 1.301$$

$$43.65 - 2.73x_1 + 2.07x_2 + 1.67x_1x_2 + 2.15(x_2)^2 - 4.94(x_3)^2 = 42.204$$

$$2.38 + 1.98x_1 - 1.11x_2 - 1.37x_1x_2 + 0.62x_1x_3 - 0.68(x_2)^2 = 0.658$$

ЗНАЧЕНИЕ ФУНКЦИИ ЦЕЛИ В ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЧКЕ

$$\dot{Y}(x_1, x_2, x_3) = 2.116$$

Приложение К
Патенты на изобретения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) **RU**⁽¹¹⁾ **2 262 984**⁽¹³⁾ **C2**
(51) МПК⁷ **B 02 C 19/16**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2003129141/03, 29.09.2003
(24) Дата начала действия патента: 29.09.2003
(45) Опубликовано: 27.10.2005 Бюл. № 30
(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: РЕВНИВЦЕВ В.И. и др. Вибрационная дезинтеграция твердых материалов. - М.: Недра, 1992, с. 309, 310, рис. 7.5.
SU 332859 A, 19.06.1972.
SU 573188 A, 29.10.1977.
RU 223498 C2, 27.08.2004.
FR 2641478 A1, 13.07.1980.
FR 2702970 A1, 30.09.1994.
DE 2218318 C2, 25.10.1973.
AT 378698 A, 10.09.1985.

Адрес для переписки:
656031, г.Барнаул, ул. Папанинцев, 122,
кв.14, И.Я. Федоренко

(72) Автор(ы):
Федоренко И.Я. (RU),
Левин А.М. (RU),
Желтунов М.Г. (RU)

(73) Патентообладатель(ли):
Федеральное государственное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования "Алтайский
государственный аграрный университет"
(АГАУ) (RU)

2 2 6 2 9 8 4 C 2

(54) ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ ЗЕРНОВЫХ И СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

(57) Реферат:
Изобретение относится к сельскохозяйственному машиностроению, в частности к оборудованию для дробления зерновых и сыпучих материалов. Измельчитель сыпучих материалов включает молот с двумя дробящими щеками, выполненный в виде маятника и подвешенный на оси внутри корпуса, крепящийся на поддерживающих элементах и состоящий из двух рабочих щек и двух боковых стенок, две камеры измельчения, образованные дробящими

щеками молота и корпуса, вибропривод, загрузочный бункер, при этом в центральной части молота выполнен разветвляющийся канал, соединяющий загрузочный бункер с камерами измельчения, а поддерживающие элементы выполнены в виде тросов. В боковых стенках корпуса могут быть выполнены регулировочные отверстия. Изобретение позволяет упростить конструкцию, снизить динамические нагрузки и шум. 1 з.п. ф-лы, 2 ил.

RU 2 2 6 2 9 8 4 C 2

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 688 424** ⁽¹³⁾ **C1**
(51) МПК
B02C 19/16 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B02C 19/16 (2018.08)

(21)(22) Заявка: **2018105815**, **15.02.2018**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
15.02.2018

Дата регистрации:
21.05.2019

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **15.02.2018**

(45) Опубликовано: **21.05.2019** Бюл. № 15

Адрес для переписки:
**656048, г. Барнаул, ул. Авиаторов, 36,
Федоренко И.Я.**

(72) Автор(ы):

**Федоренко Иван Ярославович (RU),
Левин Алексей Михайлович (RU),
Табаев Алексей Викторович (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

Левин Алексей Михайлович (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: **RU 2262984 C2, 27.10.2005. RU
2249484 C2, 10.04.2005. FR 2702970 A1,
30.09.1994. SU 884721 A, 30.11.1981. EP 0348830
A2, 03.01.1990.**

(54) Измельчитель зернового материала

(57) Реферат:

Измельчитель относится к средствам для дробления зернового материала и может использоваться, например, в качестве оборудования для дробления фуражного зерна и других зернистых материалов. Измельчитель содержит раму 1, загрузочный бункер 2, вибропривод, маятниковый трапецевидный молот 4, подвешенный на оси к корпусу и размещенный между двумя вертикальными дробильными щеками 7. Дробильные щеки 7 крепятся к корпусу на гибких поддерживающих элементах 8 с образованием между ними и трапецевидным молотом 4 двух рабочих камер

9 и 10 и выполнены с возможностью изменения их положения относительно верхней кромки молота, а к днищу трапецевидного молота 4 консольно закреплен вал 12 с одной или несколькими лопастями 20 с возможностью вращения лопастей 20 за счет эффекта вибрационного поддержания вращения неуравновешенного ротора для создания направленного вниз потока воздуха. В нижней части дробильных щек 7 установлены ограничители хода молота. Измельчитель обеспечивает повышение качества дробления. 1 з.п. ф-лы, 3 ил.

RU 2 6 8 8 4 2 4 C 1

RU 2 6 8 8 4 2 4 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 759 864**⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
B02C 1/00 (2006.01)
B02C 19/16 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B02C 1/00 (2021.05); *B02C 19/16* (2021.05)

(21)(22) Заявка: 2020142291, 21.12.2020
(24) Дата начала отчета срока действия патента:
21.12.2020
Дата регистрации:
18.11.2021
Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 21.12.2020
(45) Опубликовано: 18.11.2021 Бюл. № 32
Адрес для переписки:
656049, г. Барнаул, пр-т Красноармейский, 98,
Алтайский ГАУ

(72) Автор(ы):
Федоренко Иван Ярославович (RU),
Левин Алексей Михайлович (RU)
(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Алтайский государственный
аграрный университет" (ФГБОУ ВО
Алтайский ГАУ) (RU)
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: SU 988330 A, 15.01.1983. SU 534247
A, 05.11.1976. US 4406412 A1, 27.09.1983. US
4756483 A1, 12.07.1988. RU 2228221 C2,
10.05.2004.

(54) Вибрационно-щелевая дробилка для измельчения зернового материала

(57) Реферат:

Изобретение относится к щелевым дробилкам, в частности к вибрационным щелевым, и может быть использовано для измельчения зернового материала. Дробилка содержит корпус 1 с пружинными опорами 2. На корпусе 1 на торсионных осях 3 подвешены активные дробящие щеки 4 с дебалансными вибровозбудителями 5 и размещенные между ними маятниковые пассивные щеки 6, количество которых нечетно. Маятниковые пассивные щеки 6 в вертикальном сечении выполнены в виде трапеции, обращенной большим основанием 7 вниз, или в виде треугольника, обращенного вниз

своим основанием. На обеих боковых сторонах маятниковых пассивных щек 6 и внутренних сторонах активных щек 4 размещены съемные пластины 8 с вертикальными рифлями 9. Шаг рифлей 9 меньше размера измельчаемых частиц. На корпусе 1 размещен загрузочный бункер 10 зернового материала. Каждая из четных щек выполнена с возможностью изменения своего положения по высоте относительно нечетных щек посредством установленных в маятниковом механизме 11 винтовых регуляторов 12. Дробилка обеспечивает повышение производительности и снижение энергетических затрат. 2 з.п. ф-лы, 4 ил.

RU 2 759 864 C1

RU 2 759 864 C1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 787 723**⁽¹³⁾ **C1**
(51) МПК
B02C 1/02 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B02C 1/02 (2022.08)

(21)(22) Заявка: 2022112164, 04.05.2022

(24) Дата начала отчета срока действия патента:
04.05.2022

Дата регистрации:
12.01.2023

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 04.05.2022

(45) Опубликовано: 12.01.2023 Бюл. № 2

Адрес для переписки:

656049, г. Барнаул, пр-кт Красноармейский, 98,
Алтайский ГАУ

(72) Автор(ы):

Федоренко Иван Ярославич (RU),
Левин Алексей Михайлович (RU),
Кардашевский Евгений Евгеньевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Алтайский государственный
аграрный университет" (ФГБОУ ВО
Алтайский ГАУ) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2759864 C1, 18.11.2021. RU
2621357 C1, 02.06.2017. RU 2056166 C1,
20.03.1996. SU 904769 A1, 15.02.1982. SU 377167
A1, 17.04.1973. US 4936520 A1, 26.06.1990.

(54) Вибрационно-щечковая дробилка

(57) Реферат:

Изобретение относится к сельскому хозяйству. Предложена вибрационно-щечковая дробилка для измельчения зернового материала, содержащая пружинные опоры, раму, к которой на торсионных осях подвешены активные дробящие щеки, пассивные дробящие щеки, дебалансные вибровозбудители, загрузочный бункер. В горловине загрузочного бункера установлен побудитель зерна в виде треугольной призмы, выполненной с возможностью поворота вокруг оси и направленной вершиной вверх. Пассивная дробящая щека выполнена в виде размещенных друг над другом двухразновеликих

трапецидальных призм, направленных меньшими основаниями навстречу друг другу, в месте их соединения установлен горизонтальный шарнир. Основание верхней трапецидальной призмы пассивной дробящей щеки размещено с зазором под треугольной призмой побудителя зерна, при этом величина зазора между основанием треугольной призмы побудителя зерна и верхней трапецидальной призмой пассивной дробящей щеки меньше радиуса поворота последней. Устройство обеспечивает высокую эффективность при измельчении кормового зерна. 1 ил.

RU 2 7 8 7 7 2 3 C 1

RU 2 7 8 7 7 2 3 C 1

Приложение Л
Акты внедрения

Министерство сельского хозяйства Алтайского края
ФГБОУ ВО Алтайский государственный аграрный университет

СОГЛАСОВАНО:

Проректор по научной и
инновационной работе
ФГБОУ ВО Алтайский
государственный аграрный
университет

Попов Е.С.

« 17 »

05

2023 года



СОГЛАСОВАНО:

Заместитель министра
сельского хозяйства
Алтайского края, начальник
отдела технической политики

Лукьянов Ю.С.



2023 года

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ
КОРМОВОГО ЗЕРНА**

РЕКОМЕНДАЦИИ

Разработчики:

д.т.н, профессор Алтайского ГАУ

к.т.н, докторант СФНЦА РАН

Федоренко И. Я.

Левин А. М.

Барнаул - 2023

«Утверждаю»

Министр сельского хозяйства, пищевой и
перерабатывающей промышленности
Омской области

Н.В. Дрофа

РЕЦЕНЗИЯ

**на рекомендации «Совершенствование процесса
измельчения кормового зерна»
(Авторы: И.Я. Федоренко, А. М. Левин)**

Рекомендации посвящены разработке вибрационных измельчителей кормового зерна, которые в последнее время вызывают повышенное внимание в агропромышленном комплексе. Академический интерес к этой проблеме объясняется желанием ученых преодолеть недостатки молотковых дробилок, которые доминируют сейчас на производстве. С практической точки зрения привлекательной выглядит возможность получать кормовое средство в виде полуплющенного продукта.

Из-за небольшого количества опубликованных отечественными и зарубежными исследователями работ по данной теме, авторам самим пришлось провести комплекс теоретических и экспериментальных работ, найти уникальные подходы к их анализу и решению, опубликовать первую, насколько нам известно, монографию по данной тематике. В результате глубокого и методически логичного анализа проблемы авторам удалось развить механикотехнологические и практические основы процесса вибрационного измельчения кормового зерна. В данных же рекомендациях раскрываются основные принципы проектирования вибрационных измельчителей. При этом используются методы размерности и подобия, дифференциальное и интегральное исчисление.

В рамках проведенного исследования авторами осуществлен морфологический анализ существующих конструкций вибрационных измельчителей, на основе которого предложен ряд новых конструкций этих машин. В рекомендуемой для промышленного освоения конструкции измельчителя заложены интересные динамические эффекты, такие как самосинхронизация вибровозбудителей и антирезонансный режим работы рабочих органов. Несомненно, что данная конструкция измельчителя имеет все признаки технической новизны, поэтому защищена патентом РФ.

Данные рекомендации найдут своего читателя в кластере сельскохозяйственного машиностроения, конструкторских организациях, в научной сфере, среди студентов старших курсов технических вузов.

Все сказанное позволяет нам рекомендовать разработанные материалы к публикации.

Рецензию подготовил начальник отдела
животноводства и племенного надзора

Н.А. Галицкий

«Утверждаю»
 Первый Заместитель министра
 сельского хозяйства
 Республики Алтай
 Таханов В.В.

Печать

Отзыв на рекомендации
«Совершенствование процесса измельчения кормового зерна»
 (Авторы: И. Я. Федоренко, А. М. Левин)

В большинстве технологий приготовления кормов именно их измельчение определяет как качество готового продукта, так и энергетические затраты, необходимые для осуществления процесса. При этом измельчение считается наиболее сложным из всех механических процессов.

Традиционные подходы в технологиях измельчения столкнулись с непреодолимым противоречием. С одной стороны, для интенсификации процессов измельчения требуется увеличивать скорости рабочих органов, с другой стороны, с увеличением скоростей возрастают потери энергии, обусловленные генерированием сопутствующего воздушного потока. Новые возможности ресурсосбережения и повышения качества подготовленных кормов открывают перед измельчительной техникой ударно-вибрационные технологии.

Многочисленные исследования по теории и технике измельчения касаются в основном молотковых дробилок и дают только частные закономерности отдельного влияния факторов. Приоритет систематических исследований и ОКР по вибрационному измельчению кормового зерна принадлежит авторам данных рекомендаций.

Содержание данных рекомендаций заключается в том, что показаны пути подбора параметров ударно-вибрационного способа измельчения по критериям эффективности процесса. Методики проектирования данного типа измельчителей базируются на ранее полученных авторами данных, в том числе с помощью критериального анализа. В целом рецензируемые рекомендации дают исчерпывающую информацию, необходимую для разработки опытного образца вибрационного измельчителя кормового зерна.

Название рекомендаций отражает их содержание. Рекомендации имеют высокий научный-производственный уровень, являются итогом проведенной авторами ОКР.

Оформление рекомендаций соответствует установленным требованиям.

В силу сказанного, данная рукопись рекомендуется к опубликованию в открытой печати.

Начальник отдела
 животноводства МСХ РА

И.Л. Каланакова
 12.04.25

И.Л. Каланакова

СОГЛАСОВАНО

Заместитель Председателя Правительства
Новосибирской области - министр сельского
хозяйства Новосибирской области,
канд. техн. наук, доцент



А.В. Шинделов

**ОТРАСЛЕВОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ
на рекомендации**

**«СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ
КОРМОВОГО ЗЕРНА»**

(Авторы: И.Я. Федоренко, А. М. Левин)

В большинстве технологий приготовления кормов именно их измельчение определяет как качество готового продукта, так и энергетические затраты, необходимые для осуществления процесса. При этом измельчение считается наиболее сложным из всех механических процессов.

В настоящее время основным оборудованием для измельчения фуражного зерна являются молотковые дробилки, однако при тонком размоле они дают до 30 % пылевидной фракции, а при грубом - до 20% недоизмельченных частиц и целых зерен. Кроме этого, переизмельчение обуславливает повышенную энергоемкость рабочего процесса (до 15 кВт·ч/т).

В связи со сказанным, особую актуальность приобретают вопросы разработки измельчителей вибрационного действия, позволяющих получать более однородный состав готового продукта, при минимизации энергоемкости и металлоемкости процесса.

Традиционные подходы в технологиях измельчения столкнулись с непреодолимым противоречием. С одной стороны, для интенсификации процессов измельчения требуется увеличивать скорости рабочих органов, с другой стороны, с увеличением скоростей возрастают потери энергии, обусловленные генерированием сопутствующего воздушного потока. Новые возможности ресурсосбережения и повышения качества подготовленных кормов открывают перед измельчительной техникой ударно-вибрационные технологии.

Рекомендации состоят из пяти разделов, которые в совокупности характеризуют состояние вопроса и вклад авторов в развитие механико-технологических и практических основ вибрационного измельчения кормового зерна. В Рекомендациях в комплексе рассмотрен целый круг вопросов, связанных с применением вибрации при измельчении зерновых материалов. Это приобретает особую актуальность, так как в отечественной и зарубежной литературе данные вопросы освещены недостаточно.

В работе продемонстрирован весь арсенал современных средств научного исследования: математическое и компьютерное моделирование, методы подобия и размерности, активный эксперимент. На их основе убедительно показано, что вибрационная нагрузка на измельчаемое кормовое зерно, использование явлений самосинхронизации и антирезонанса в динамической схеме дают возможность создать измельчитель, превосходящий по энерго-и ресурсоэффективности доминирующие сейчас молотковые дробилки.

Содержание данных рекомендаций заключается в том, что показаны пути подбора параметров ударно-вибрационного способа измельчения по критериям эффективности процесса. Методики проектирования данного типа измельчителей базируются на ранее полученных авторами данных, в том числе с помощью критериального анализа. В целом рецензируемые рекомендации дают исчерпывающую информацию, необходимую для разработки опытного образца вибрационного измельчителя кормового зерна.

Название рекомендаций отражает их содержание. Рекомендации имеют высокий научно-производственный уровень, являются итогом проведенной авторами ОКР.

Рекомендации, несомненно, имеют достаточно весомое научное и практическое значение, будут способствовать прогрессу в области измельчения кормового зерна, ее с интересом прочтут научные работники, производственники, специалисты сферы сельскохозяйственного машиностроения.

В связи со сказанным, данная работа рекомендуется к публикации.

Заведующий лабораторией инновационной и информационной
деятельности СибИМЭ СФНЦА РАН

И.О. Корниенко

УТВЕРЖДАЮ
 Директор СФНЦА РАН
 К.С. Голохваст
 Член-корреспондент РАН, профессор РАН.
 «26» ноября 2023 г.

УТВЕРЖДАЮ
 Директор ООО «Глобал Инжиниринг»
 Дьяконов В.В.
 «26» ноября 2023 г.

А К Т
**внедрения результатов научно-исследовательских,
 опытно-конструкторских и технологических работ**

«26» ноября 2023 г.

№ 013

Мы, нижеподписавшиеся, представитель Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук (СФНЦА РАН)
докторант Левин А. М.

(должность, фамилия, имя, отчество)

с одной стороны, и представитель Общества с ограниченной ответственностью «Глобал Инжиниринг» конструктор Бруннер А.В.

с другой стороны,

составили настоящий акт о том, что в период с 01.02 по 26.11.2023 г в результате проведения в СФНЦА РАН научных и конструкторских работ по теме «РАЗВИТИЕ МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ОСНОВ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КОРМОВОГО ЗЕРНА»

создана документация для проектирования измельчителя кормового зерна вибрационного типа.

В процессе внедрения выполнены следующие работы: осмотрен и опробован в работе экспериментальный образец вибрационного измельчителя производительностью 0.3 т/час; переданы на предприятие Рекомендации по совершенствованию процесса измельчения кормового зерна, а также методика инженерного расчета вибрационного измельчителя; согласованы исходные требования на проектирование и изготовление вибрационного измельчителя производительностью 3 т/час согласно патенту РФ №2688424.

Акт составлен в четырех экземплярах:

1-й и 3-й экз. – СФНЦА РАН

2-й и 4-й экз. – ООО «Глобал Инжиниринг»

Представитель СФНЦА РАН

 Левин А. М.

Представитель ООО «Глобал Инжиниринг»

 Бруннер А.В.



А К Т

внедрения результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ

«26» марта 2024 г.

№ 013 _____

Мы, нижеподписавшиеся, представитель Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирский федеральный научный центр агrobiотехнологий Российской академии наук (СФНЦА РАН)
докторант Левин А. М.

(должность, фамилия, имя, отчество)

с одной стороны, и представитель Общества с ограниченной ответственностью «СТ-Проект» начальник производства Ильин С.Б.

с другой стороны,

составили настоящий акт о том, что в период с 01.02.2023 по 26.03.2024 г в результате проведения в СФНЦА РАН научных и конструкторских работ по теме **«РАЗВИТИЕ МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ОСНОВ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КОРМОВОГО ЗЕРНА»**

создана документация для проектирования измельчителя кормового зерна вибрационного типа.

В процессе внедрения выполнены следующие работы: переданы на предприятие Рекомендации по совершенствованию процесса измельчения кормового зерна, а также методика инженерного расчета вибрационного измельчителя; согласованы исходные требования на проектирование и изготовление вибрационного измельчителя производительностью 3 т/час согласно патенту РФ №2688424.

Акт составлен в четырех экземплярах:

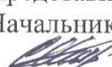
1-й и 3-й экз. – СФНЦА РАН

2-й и 4-й экз. – ООО «СТ-Проект»

Представитель СФНЦА РАН

 Левин А. М.

Представитель ООО «СТ-Проект»

Начальник производства
 Ильин С.Б.



УТВЕРЖДАЮ

Глава крестьянского хозяйства «ФОКИН»

Крестьянское
хозяйство
«ФОКИН»

С. Н. Фокина

Июля 2024 года

649100 Республика Алтай, Майминский район,
п. Алфёрово, ул. Центральная, д.13

Акт внедрения результатов исследования

Мы, нижеподписавшиеся, представители КХ «ФОКИН» инженер Теледеков С.А., зоотехник Бакиянова О. В., с одной стороны, и представитель СФНЦА РАН докторант Левин А. М., с другой стороны, составили настоящий акт о внедрении результатов исследования по теме: *Развитие механико-технологических и практических основ процесса вибрационного измельчения кормового зерна.*

В процессе внедрения были осуществлены следующие работы:

1. Проведены хозяйственные испытания предоставленного СФНЦА РАН вибрационного измельчителя кормового зерна на кормовой пшенице влажностью 12,3 %;
2. Проведены хозяйственные опыты по скармливанию откормочному поголовью крс измельченного продукта, полученного на вибрационном измельчителе (опытная группа), и дерти, полученной на молотковой дробилке (контрольная группа). В опытах использовали бычков возрастом 4-6 месяцев. Продолжительность опыта: 01.04.2024 – 30.06.2024 г.

Результаты испытаний и опытов:

Производительность вибрационного измельчителя	290-330 кг/час,
Удельные затраты энергии на измельчении пшеницы	4,4 кВт*ч/т;
Содержание плющенных частиц по массе	47- 55%;
Уровень шума на расстоянии 1 м от измельчителя	49-58 дБ А

Привесы молодняка в опытной группе по сравнению с контрольной группой суммарно за 3 месяца оказались на 7,1% выше, т. е. плющенное зерно от вибрационного измельчителя обладает большей эффективностью при откорме крс.

Представитель СФНЦА РАН

Представители КХ «ФОКИН»



Левин А. М.

Теледеков С.А.

Бакиянова О. В.

УТВЕРЖДАЮ

Начальник научно-исследовательской части
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Новосибирский
государственный аграрный университет»
канд. техн. наук

А.А.Диденко

« 22 » апреля 2024 г.

А К Т

о внедрении в образовательный процесс Новосибирского государственного аграрного университета результатов диссертационного исследования на соискание учёной степени доктора технических наук Левина Алексея Михайловича по теме «Развитие механико - технологических и практических основ процесса вибрационного измельчения кормового зерна»

Комиссия в составе: председателя - директора Инженерного института Новосибирского ГАУ, д-ра техн. наук, доцента Гуськова Ю.А., членов комиссии - заведующего кафедрой механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции Новосибирского ГАУ, канд. техн. наук, доцента Мезенова А.А., доцента кафедры автомобили и тракторы Новосибирского ГАУ, канд. техн. наук Крума В.А. свидетельствует о том, что в образовательный процесс ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ внедрены следующие результаты диссертационной работы:

- основы разработки и анализа математических моделей, характеризующих взаимодействие рабочих органов вибрационного измельчителя с кормовым зерном;

- основы применения систем автоматизированного проектирования при моделировании вынужденных колебаний в системах с двумя степенями свободы на примере вибрационного измельчителя кормового зерна;

- методология инженерного расчета модельного ряда вибрационных измельчителей на основе критериального анализа процесса измельчения кормового зерна вибрационной нагрузкой.

Председатель комиссии:

Директор Инженерного института Новосибирского ГАУ,
д-р техн. наук, доцент

Ю.А. Гуськов

Члены комиссии:

Заведующий каф. механизации животноводства и переработки с/х продукции,
канд. техн. наук, доцент

А.А. Мезенов

Доцент каф. автомобили и тракторы,
канд. техн. наук

В.А. Крум

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной и
инновационной работе
Е. С. Попов



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
С. И. Завалишин

« 31 » января 2024 г.

« 31 » января 2024 г.

А К Т

об использовании результатов докторской диссертационной работы Левина Алексея Михайловича в учебном процессе Алтайского государственного аграрного университета

Мы, представители Научно-инновационного управления
Алтайского ГАУ ведущий инженер

Демин Владимир Андреевич

(должность, фамилия, имя, отчество)

и методической комиссии Инженерного факультета _____

к. т. н., доцент Кривочуров Николай Тихонович

(должность, фамилия, имя, отчество)

с одной стороны, и представитель кафедры «Механизация производства и
переработки с/х продукции», заведующий кафедрой

(наименование структурного подразделения)

д. т. н., доцент Садов Виктор Викторович

а также докторант СФНЦА РАН

Левин Алексей Михайлович

(должность, фамилия, имя, отчество)

с другой стороны, составили настоящий акт о том, что результаты научно-
исследовательской работы на тему **«Развитие механико – технологических и
практических основ процесса вибрационного измельчения кормового зерна»**
(научный руководитель Иванов Н. М., д. т. н., профессор, член-корреспондент РАН,
руководитель СибИМЭ СФНЦА РАН, исполнитель докторант *Левин А.
М.*), _____

/название работы, тема работы; ее руководитель и исполнители/

выполненной в период с 20 сентября 2022 г. по 30 января 2024 г.

месяц

месяц

внедрены /использованы/ в учебном процессе Алтайского ГАУ:

а/ при чтении лекций по дисциплине «Компьютерное моделирование
технологических процессов АПК» _____

/название учебных дисциплин/

по теме /разделу/ «Вынужденные колебания в системах с двумя степенями
свободы (на примере вибрационного измельчителя кормового

зерна)»; _____
/тема лекции/

б/ при проведении практических занятий по одноименной дисциплине со студентами - магистрантами 2 курса направления «Агроинженерия» Инженерного факультета.

Настоящий акт составлен на основании рабочих программ, тематических планов лекций и лабораторно-практических занятий, методических материалов по курсу «Компьютерное моделирование технологических процессов АПК».

Представитель научно-инновационного
управления Демин В. А. _____
фамилия, имя, отчество


_____ подпись

Представитель методической комиссии
факультета Кривочуров Н. Т. _____
фамилия, имя, отчество


_____ подпись

Заведующий кафедрой Садов В. В. _____
фамилия, имя, отчество


_____ подпись

Докторант Левин А. М. _____
фамилия, имя, отчество


_____ подпись