

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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Новосибирск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Сибирский федеральный научный центр агробιοтехнологий
Российской академии наук (СФНЦА РАН)

Научный консультант

член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор
Иванов Николай Михайлович

Официальные оппоненты:

Булатов Сергей Юрьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технический сервис», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет»

Сабиев Уахит Калижанович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Агроинженерия», ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет»

Садов Виктор Викторович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Механизация производства и переработки с.-х. продукции», ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет»

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока)

Защита состоится « 24 » декабря 2024 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.211.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирский федеральный научный центр агробιοтехнологий Российской академии наук по адресу: 630501, Новосибирская обл. Новосибирский район, р. п. Краснообск, ул. Центральная, зд. 7, СФНЦА РАН.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью вашего учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 630501, Новосибирская обл., Новосибирский район, р. п. Краснообск, ул. Центральная, зд. 7, СФНЦА РАН (ДС 24.1.211.01), а/я 463. Телефон (факс): 8(383) 348-12-09; e-mail: sibime@sfsc.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Сибирской научной сельскохозяйственной библиотеки, автореферат и диссертация размещены на сайтах: <https://www.sfsc.ru>, <https://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  Вахрушев Владимир Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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. Благодаря измельчению значительно улучшается взаимодействие корма с пищеварительными органами животных, причем его усвояемость находится в прямой зависимости от крупности частиц.

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. Такой продукт не в полной мере отвечает физиологии животных. Кроме этого, переизмельчение обуславливает повышенную энергоемкость рабочего процесса (до 15 кВт-ч/т).

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. Однако при измельчении кормового 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 приrost вновь образованной поверхности - в 2 раза. В то же время почти вдвое снижается потребление электроэнергии на 1 т перерабатываемого материала.

Такие положительные результаты побуждают искать применение вибрационных измельчителей 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. Констатировано, что конструкции, разработанные 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 дробилок 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 кормового 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, реализующие процесс вибрационного измельчения зерна по патентам РФ №№ 2262984, 2688424, 2759864, 2787723.

Теоретическая и практическая значимость работы. 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.

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;

- 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 кормового зерна, обосновании лабораторных установок, проведении опытов и обработке экспериментальных данных, обобщении и структуризации научного материала по теме исследования, формулировке основных выводов и положений диссертации

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 источник, из которых 218 отечественных и 19 иностранных авторов, 11 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, показана степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, представлены теоретическая и практическая значимость, изложены методы исследования, научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

Первая глава «Состояние проблемы, цель и задачи исследований» посвящена анализу роли зерна в кормлении сельскохозяйственных животных, требований нормативных документов к процессу измельчения кормового зерна, основным закономерностям измельчения твердых тел, особенностям технологических свойств фуражного зерна и механизмам его разрушения.

Анализ большого количества научной и патентной литературы позволил построить морфологическую таблицу и соответствующую морфологическую матрицу. 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. Морфологическую таблицу можно рассматривать как классификацию вибрационных дробилок, в которую, однако, заложены и возможные (будущие) технические решения. В нашем случае число вариантов исполнения измельчителей составило около полумиллиона.

Наиболее эффективные технические решения из множества всех возможных вариантов можно выбрать путем последовательного сокращения этого множества за счет исключения неперспективных технических решений.

Проведенный морфологический анализ известных конструкций вибрационных измельчителей кормового зерна позволил предложить их новые конструктивные решения, защищенные патентами РФ №№ 2262984, 2688424, 2759864, 2787723.

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.

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.

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.

В главе дан анализ состояния теоретических и экспериментальных исследований в области вибрационного измельчения зерна.

В трудах С. Н. Васильева, О. Ю. Маркина, С. А. Мартыанова, И. Я. Федоренко содержатся элементы теории измельчения кормового зерна вибрационными рабочими органами, на базировании которых проведено данное исследование.

Научная гипотеза была сформулирована в следующем виде: 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.

Представленный обзор состояния проблемы позволил также сформулировать цель и задачи исследования, которые приведены во введении диссертации.

Вторая глава «Математическое моделирование рабочего процесса вибрационных измельчителей» посвящена разработке и анализу математических моделей, характеризующих взаимодействие рабочих органов с кормовым зерном.

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 стадий сжатия-разгрузки зерновок, энергия затрачивается на преодоление неупругих сопротивлений, иницирование и рост внутренних трещин. Наиболее важен в энергетическом отношении инкубационный период.

При измельчении зерновки несколькими стадиями 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.

Обратимся далее к реальной картине деформирования зерновки вибрационными нагрузками (Рисунок 1). В цикле сжатия, поскольку рабочие поверхности плоские, а зерновки округлые, в последних образуется своего рода конус нормальных напряжений. 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 является задачей измельчения.

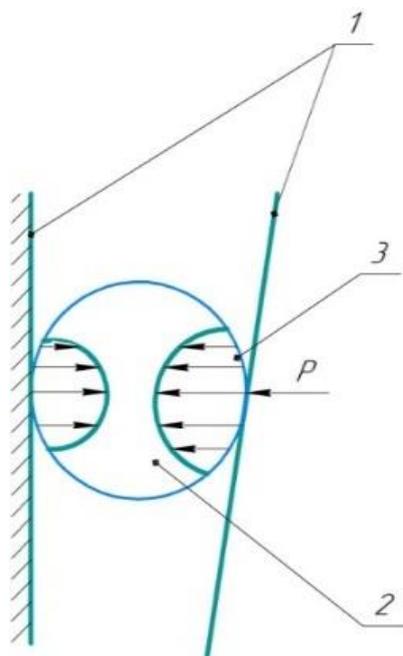
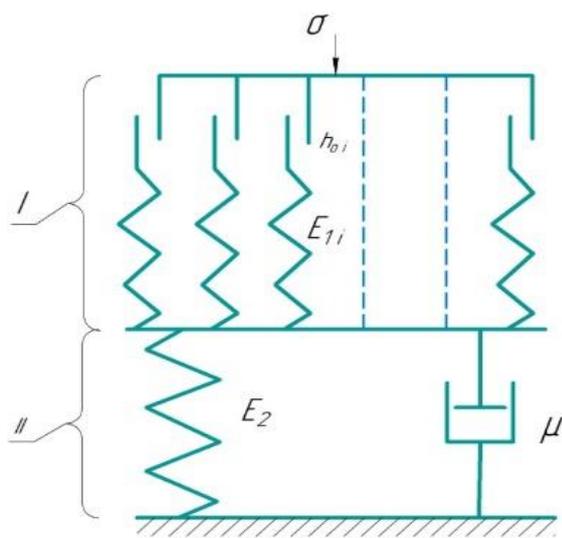


Рисунок 1- Сжатие зерновки вибрационными рабочими органами: 1- рабочие органы; 2- зерновка; 3- эпюра нормальных напряжений

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. Однако в отношении измельчения зернового материала эти эффекты, насколько нам известно, никогда не рассматривались.

В научной 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 надеяться на снижение энергозатрат в вибрационном измельчителе по сравнению с молотковыми дробилками.



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

Предлагаемая модель содержит два блока (Рисунок 2).

Рисунок 2. Реологическая модель зерновки

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

$$h_i < h_{0i} - \text{нет деформации}; \quad h_i > h_{0i} - \text{течение (скольжение)}. \quad (1)$$

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

$$h_{0i} = \tau_{0i} / E_{1i}, \quad (2)$$

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

Поскольку наша модель содержит набор тел Сен-Венана, то и пределы текучести у них разные ($h_{01} < h_{02} < \dots < h_{0i} < h_{0\infty}$, ($i=1 \dots \infty$, см. Рисунок 2). 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.

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.

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

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 - E_1 \int_0^\infty \varepsilon_h p(h) dh; \quad (3)$$

$$h \operatorname{sgn}(\dot{\varepsilon}_h) + \varepsilon_h = \varepsilon_1, \quad (4)$$

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

ε_h - пластическая деформация в плече h .

Функция $\operatorname{sgn}(\dot{\varepsilon}_h)$ 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: I — нормальный отрыв (разрыв); II — поперечный сдвиг (или просто сдвиг) III — продольный сдвиг (срез). Очевидно, что блок I реологической модели (см. Рисунок 2) отражает второй тип растрескивания (Рисунок 3), который мы считаем основным в зерновке.

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. Не все трещины раскрываются при первичном разрушении зерновки, часть трещин остается в осколках.

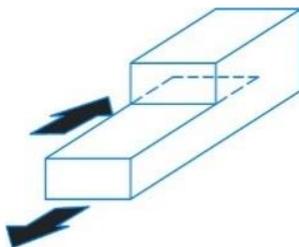


Рисунок- 3. Появление и рост трещины по типу поперечного сдвига (тип II)

Именно такой тип возникновения трещин подразумевается в известной гипотезе Р. А. Родина.

Математический анализ исходных предпосылок (1)...(4) позволил получить выражение, связывающее σ и ε

$$\sigma = E\left(\varepsilon - \frac{\varepsilon^{\beta+1}}{\beta+1}\right), \quad (5)$$

где β – эмпирический коэффициент.

По форме полученное выражение является формулой Н. Н. Давиденкова, которая описывает не только кривую нагружения, но и кривую разгрузки материала в цикле (Рисунок 4).

Сопоставление вида этой зависимости с имеющимися экспериментальными данными показывает, по крайней мере, хорошее качественное совпадение.

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

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

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

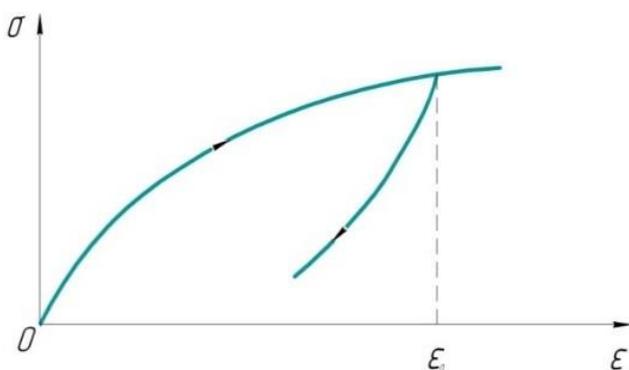


Рисунок 4 - Кривая петли гистерезиса, описываемая формулой (5)

На основе предложенной реологической модели зерновки (см. Рисунок 2) 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.

Если в i -том теле Сен- Венана (см. Рисунок 2). происходит скольжение пластинок, то по отношению к медленной скорости V сдвигания зерновки, обусловленной сужающейся камерой измельчения, и вибрационным воздействием с максимальной скоростью $A\omega$, будем иметь уменьшенное сопротивление указанного тела.

$$\langle h_{0i} \rangle = h_{0i} \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{V}{A\omega}.$$

По механике процесса вибрационного измельчения зерна нетрудно заключить, что $V < A\omega$. Следовательно, всегда сопротивление тела Сен- Венана при вибрациях $\langle h_{0i} \rangle$ меньше, чем при безвибрационном деформировании.

Определен, исходя из энергетического критерия, рациональный профиль рабочих поверхностей камеры измельчения и число вибровоздействий, потребных для разрушения

исходной зерновки. Для этого рассмотрен энергетический баланс первичного разрушения единичной зерновки по формуле, напоминающей закон Ребиндера:

$$A = A_V + A_S, \quad (6)$$

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:

$$A_V = \psi_V(\sigma) U_{max}, \quad (7)$$

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 вибровоздействии, достаточном для разрушения зерновки, выражение (6) можно записать в виде:

$$A = \psi_V(\sigma_*) \frac{\sigma_*^2 V}{2E} + A_S, \quad (8)$$

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

Очевидно, что в случае разрушения несколькими воздействиями можно применять пониженные напряжения, т.е. $\sigma_n < \sigma_*$. Можно заметить, что σ_n зависит от числа воздействий n , т.е. $\sigma_n = f(n)$. Данную функцию для зерна можно представить в виде кривой Вёлера.

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

$$A = n\psi_V(\sigma_n) \frac{\sigma_n^2 V}{2E} + A_S \rightarrow \min, \quad (9)$$

где n – число вибровоздействий;

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

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

$$F(n) = n\psi_V(\sigma_n) \left[\sigma_f + (\sigma_* - \sigma_f) e^{-\frac{n-1}{n_0-1}} \right]^2, \quad (10)$$

где σ_f , σ_* , n_0 – параметры экспериментальной кривой Вёлера.

При анализе исполнения вибрационных рабочих органов и их воздействия на материал возможны два случая (Рисунок 5):

1. Напряжение увеличивается от цикла к циклу нагружения по арифметической прогрессии (это соответствует Рисунку 5а - зазор между *прямолинейными* щеками уменьшается сверху-вниз);

2. Напряжение увеличивается по геометрической прогрессии (зазор между *криволинейными* щеками уменьшается также сверху-вниз, Рисунок 5б).

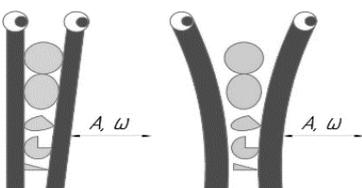


Рисунок 5- Принципиальные схемы вибрационных измельчителей: а) с плоскими; б) с криволинейными рабочими поверхностями

а б

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

Случай 1. В вибрационных измельчителях (см. Рисунок 5а) воздействие обычно неоднородно и усиливается по мере продвижения материала вниз. Это изменение можно учесть формулой для арифметической прогрессии при линейных рабочих органах

$$\sigma_* = \sigma_1 (1 + k_1(n - 1)), \quad (11)$$

где σ_1 – максимальное напряжение в материале при первом вибровоздействии;

k_1 – разность арифметической прогрессии.

Соответствующая подстановка приводит к выражению

$$F(n) = n(1 - \exp\left(-2 \alpha \sqrt{(\sigma_f + [\sigma_1 (1 + k_1(n - 1)) - \sigma_f] \left(e^{-\frac{n-1}{n_*-1}}\right))/\rho}\right) * \left\{ \sigma_f + [\sigma_1 (1 + k_1(n - 1)) - \sigma_f] \left(e^{-\frac{n-1}{n_*-1}}\right) \right\}^2 \quad (12)$$

Эту функцию необходимо минимизировать. Для этого на основе математической модели (12) была создана компьютерная модель в программе *MathCAD*, позволяющая проводить вычислительные эксперименты и визуализировать результаты. Функция $F(n)$ имеет сложный характер поведения. 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.

Искомая зависимость имеет локальный минимум при $n \approx 50$, 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 (см. Рисунок 5б) применима геометрическая прогрессия

$$\sigma_* = \sigma_1 (k_2^{n-1}), \quad (13)$$

где k_2 – знаменатель геометрической прогрессии.

Оптимизируемая функция имеет в данном случае вид

$$F(n) = n\{1 - \exp\left(-2 \alpha \sqrt{(\sigma_f + [\sigma_1 k_2^{n-1} - \sigma_f] \left(e^{-\frac{n-1}{n_*-1}}\right))/\rho}\right) * \left\{ \sigma_f + [\sigma_1 k_2^{n-1} - \sigma_f] \left(e^{-\frac{n-1}{n_*-1}}\right) \right\}^2 \quad (14)$$

Численные эксперименты показывают, что при любых исходных параметрах функция $F(n)$ имеет в этом случае монотонно-восходящий вид. При этом экстремумов не наблюдается.

Анализ этих данных показал, что 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.

Третья глава «**Моделирование взаимодействия механических систем вибрационных измельчителей с технологической средой в виде слоя кормового зерна**» посвящена динамическим особенностям предложенных схем измельчителей.

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 отличие от дробилок, используемых в горном деле, предложенные нами измельчители для кормового зерна 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.

$$J_1 = \int \int [\psi(x, y) - \psi^*(x, y)]^2 dx dy \rightarrow \min, \quad (15)$$

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 (по И. И. Блехману):

$$L^* = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} L dt = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} (T - \Pi) dt \rightarrow \min, \quad (16)$$

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.

$$A_n \rightarrow \min. \quad (17)$$

Это требование обусловлено снижением инерционных нагрузок на дебалансный привод.

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

$$A_p \rightarrow \max. \quad (18)$$

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

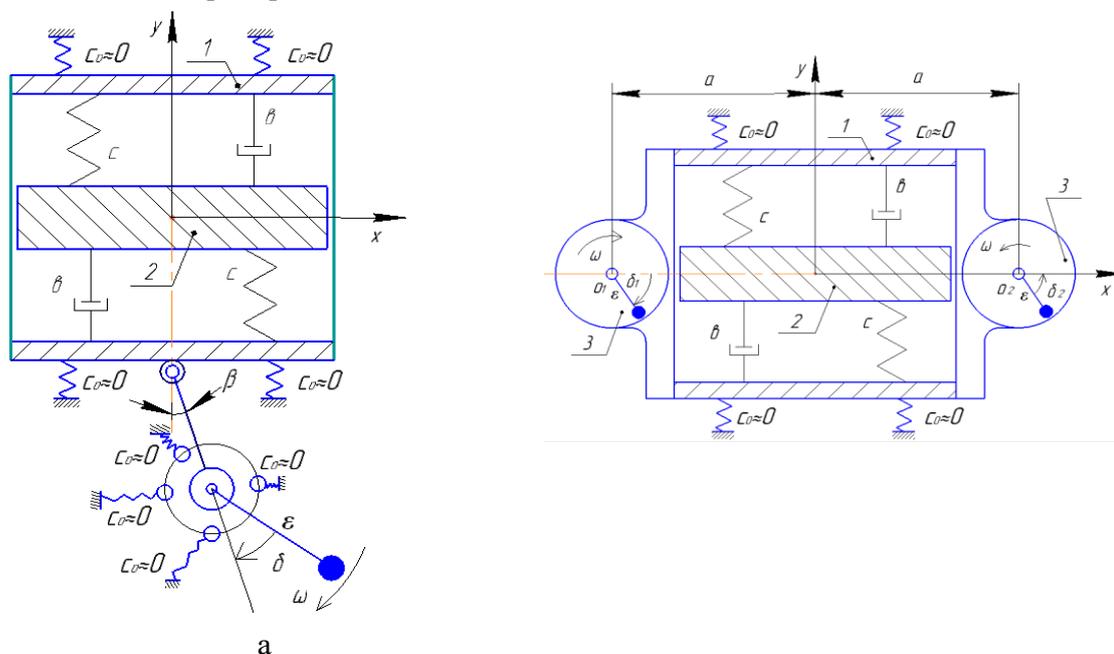
$$J_2 = \frac{Ax Bx C}{A_0 x B_0 x C_0} \rightarrow \min, \quad (19)$$

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.

По этим критериям были проанализированы динамические свойства предложенных нами вибрационных измельчителей кормового зерна. При анализе использованы расчетные схемы, представленные на Рисунке 6. Динамику вибрационных измельчителей рассматривали с позиций вибрационной механики и теории самосинхронизации вращающихся неуравновешенных роторов.



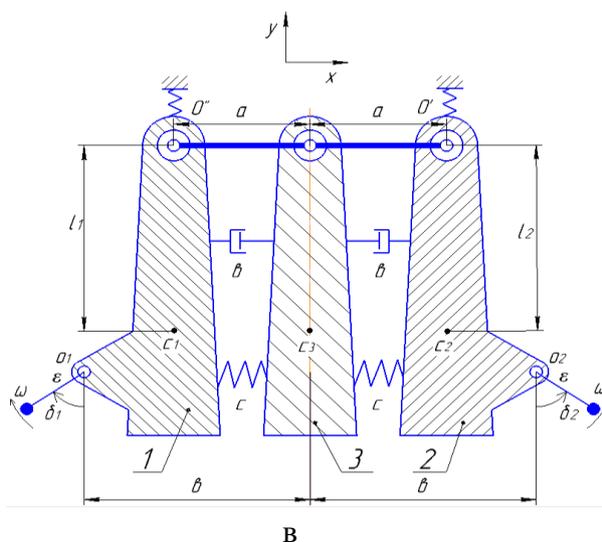


Рисунок 6 - Расчетные динамические схемы вибродвухмассных измельчителей: а) с маятниковым вибровозбудителем, двухмассная; б) с двумя самосинхронизирующимися вибровозбудителями, двухмассная; в) с двумя самосинхронизирующимися вибровозбудителями, трехмассная

Для выяснения особенностей динамики *измельчителя с маятниковым вибровозбудителем* (см. Рисунок 6а) 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

$$\delta = \omega t. \quad (20)$$

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

Искомые уравнения имеют вид:

$$M\ddot{x} + m_0 l\ddot{\beta} + (m_1 + m_2)h\ddot{\varphi} = m_0 \varepsilon \omega^2 \cos \omega t; \quad (21)$$

$$M\ddot{y}_1 + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + c(y_1 - y_2) = m_0 \varepsilon \omega^2 \sin \omega t; \quad (22)$$

$$m_2 \ddot{y}_1 - b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) - c(y_1 - y_2) = 0; \quad (23)$$

$$[I_1 + (Mh^2)]\ddot{\varphi} + b_1 \dot{\varphi} + c_1 \varphi + m_0 l h \ddot{\beta} = m_0 \varepsilon \omega^2 h \sin \omega t; \quad (24)$$

$$[I_2 + (m_0 l^2)]\ddot{\beta} + b_1 \dot{\beta} + c_1 \beta + m_0 l \ddot{x} + m_0 l h \ddot{\varphi} = m_0 \varepsilon \omega^2 l \sin \omega t, \quad (25)$$

где $M = m_1 + m_2 + m_0$;

l - расстояние $O_1 O_2$ 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.

При анализе *виброизмельчителя с двойным виброприводом* (см. Рисунок 6б) считаем, что 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

$$\delta_1 = q_1 \omega t; \delta_2 = q_2 (\omega t + \alpha), \quad (26)$$

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

$$M\ddot{x} = \Phi_0 [q_1 \cos \omega t + q_2 \cos (\omega t + \alpha)]; \quad (27)$$

$$I\ddot{\varphi} = \Phi_0 a [q_1 \sin \omega t - q_2 \sin (\omega t + \alpha)]; \quad (28)$$

$$M_1 \ddot{y}_1 + c(y_1 - y_2) + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = -\Phi_0 [q_1 \sin \omega t + q_2 \sin (\omega t + \alpha)]; \quad (29)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 - c(y_1 - y_2) - b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = 0, \quad (30)$$

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.

Составим также математическую модель динамики *виброщекового измельчителя* с двумя самосинхронизирующимися вибровозбудителями, см. Рисунок 6в. 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

$$\delta_1 = \omega t; \delta_2 = \omega t + \alpha, \quad (31)$$

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:

$$M\ddot{x} + Ml_1(\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_3) = m_0 \varepsilon \omega^2 [\sin \omega t - \sin(\omega t + \alpha)]; \quad (32)$$

$$M\ddot{y} = m_0 \varepsilon \omega^2 [\cos \omega t + \cos(\omega t + \alpha)]; \quad (33)$$

$$Ma^2 \ddot{\varphi} = -m_0 \varepsilon \omega^2 a [\cos \omega t - \cos(\omega t + \alpha)]; \quad (34)$$

$$(I + ml_1^2) \ddot{\varphi}_1 + ml_1 \ddot{x} + mgl_1 \varphi_1 + b(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3)l_1^2 + c(\varphi_1 - \varphi_3)l_1^2 = m_0 \varepsilon \omega^2 l_2 \sin \omega t; \quad (35)$$

$$(I + ml_1^2) \ddot{\varphi}_2 + ml_1 \ddot{x} + mgl_1 \varphi_2 + b(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)l_1^2 + c(\varphi_2 - \varphi_3)l_1^2 = -m_0 \varepsilon \omega^2 l_2 \sin(\omega t + \alpha); \quad (36)$$

$$(I_3 + m_3 l_1^2) \ddot{\varphi}_3 + m l_1 \ddot{x} + m g l_1 \varphi_3 + b(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 - 2\dot{\varphi}_3) l_1^2 + c(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\varphi_3) l_1^2 = 0, \quad (37)$$

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 (32)...(33). Уравнение (34) моделирует угловые колебания рамы в плоскости чертежа. Наконец, уравнения (35)...(36) характеризуют вынужденные качания активных щек вокруг своих точек подвеса. Уравнение (37) описывает возможные угловые колебания пассивной щеки.

На основе проведенных динамических исследований по полученным уравнениям всех трех конструкций вибрационного измельчителя кормового зерна заполнили таблицу, в которой представлены итоговые результаты (см. Таблицу 1). 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 провели на основе использования известного принципа Эджворта-Парето. Согласно этому принципу, всякий выбираемый вариант должен быть Парето-оптимальным.

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 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	Самосинхронизация невозможна,		

вибровозбудителей	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 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 б). Она предполагает двойной самосинхронизированный вибропривод и режим антирезонанса рабочих органов.

Подтвердим наш вывод несколько усложненной, но более приближенной к реальной конструкции расчетной схемой данного измельчителя.

Рабочие органы измельчителя (Рисунок 7) 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 может регулироваться изменением кинетических моментов дебалансов, которыми оснащены центробежные вибровозбудители 2.

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

$$\text{Рисунок 6)} \quad \Phi = 2\Phi_0 \sin \omega t$$

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

Расчетную динамическую схему вибрационного измельчителя представим в виде двойного маятника (Рисунок 8). 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.

При составлении дифференциальных уравнений будем 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. Рисунок 8).

Уравнения вынужденных угловых колебаний первого (внешнего) маятника, а также второго (внутреннего) маятника запишем в виде

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_1 + 2n_1(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + \omega_{12}^2(\varphi_1 - \varphi_2) + \omega_{01}^2 \varphi_1 = K_1 \cdot \omega^2 \sin \omega t; \\ \ddot{\varphi}_2 + 2n_2(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) + \omega_{21}^2(\varphi_2 - \varphi_1) + \omega_{02}^2 \varphi_2 = -K_2 \ddot{\varphi}_1, \end{cases} \quad (38)$$

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

$$\omega_{21} = \sqrt{\frac{cl}{I_2}}; \quad K_1 = \frac{2m_d \varepsilon L}{I_1}; \quad K_2 = \frac{m_2 l(L-l)}{I_2};$$

I_1, I_2 - моменты инерции маятников относительно точки O_1 ;

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

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

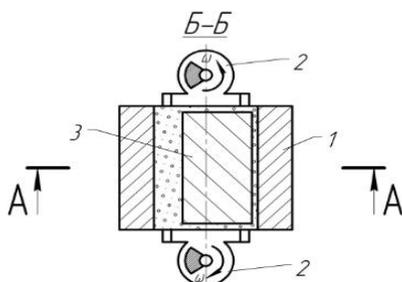
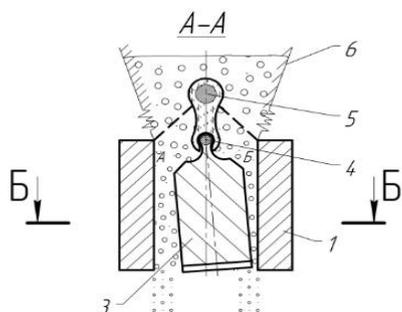


Рисунок 7 - Схема работы вибрационного
измельчителя фуражного зерна

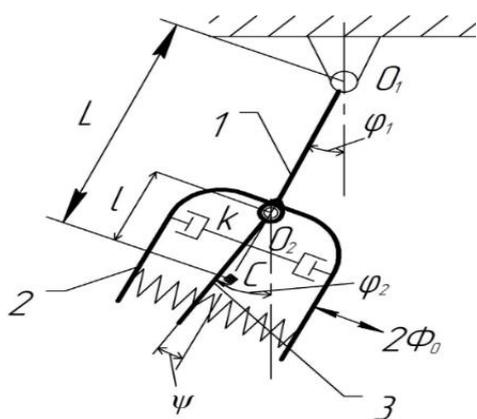


Рисунок 8- Расчетная схема угловых колебаний рабочих
органов измельчителя

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.

Численный метод решения дифференциальных уравнений был реализован в программе MathCAD. Полученная компьютерная модель позволила провести вычислительные эксперименты, показавшие работоспособность данной динамической схемы измельчителя.

Наиболее эффективным является режим работы измельчителя при осуществлении антирезонанса в системе. Этот режим в данной конструкции означает, что тяжелая корзина с прикрепленными вибровозбудителями (первый маятник, см. Рисунки 7 и 8) совершает очень малые колебания, а пассивный элемент (маятник 2), наоборот, - очень большие. Вычислительный эксперимент показывает возможность осуществления такого режима (Рисунок 9).

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 и может ограничиваться зазором между маятниками.

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

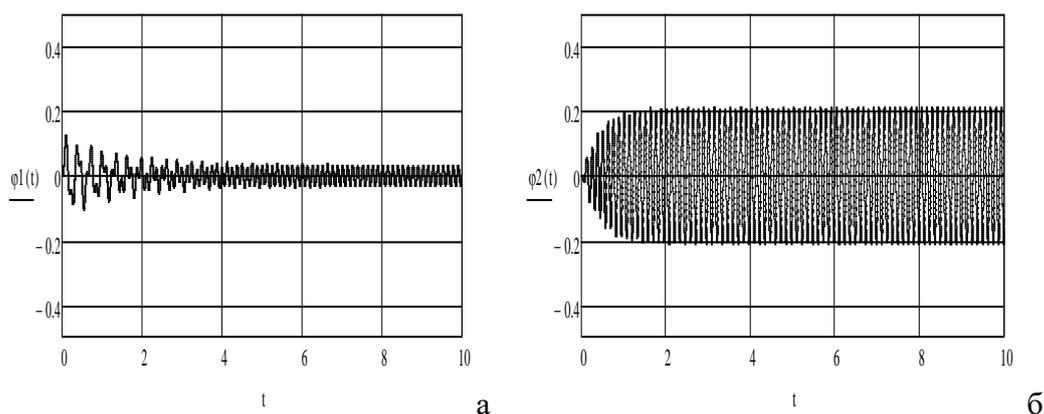


Рисунок 9 - Угловые колебания (в радианах) активного φ_1 (а), пассивного φ_2 (б) маятников при антирезонансе

В связи со сказанным возникла необходимость опытной проверки теоретических положений. В режиме антирезонанса проверяли синхронное вращение дебалансов на экспериментальном образце вибрационного измельчителя кормового зерна. Верхние крышки вибровозбудителей были сняты (Рисунок 10) 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.

В четвертой главе «Методологические и методические аспекты моделирования и оптимизации процесса вибрационного измельчения кормового зерна в эксперименте» введены новые оценки и приемы опытного исследования процесса измельчения кормового зерна.

Коэффициент соответствия измельчителя или его режима настройки зоотехническим требованиям (для определенного вида животных). Существующие регламентирующие документы предписывают оценивать качество работы измельчителей по средневзвешенному размеру частиц полученной дерты (модулю размола) и коэффициенту вариации модуля размола. 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.

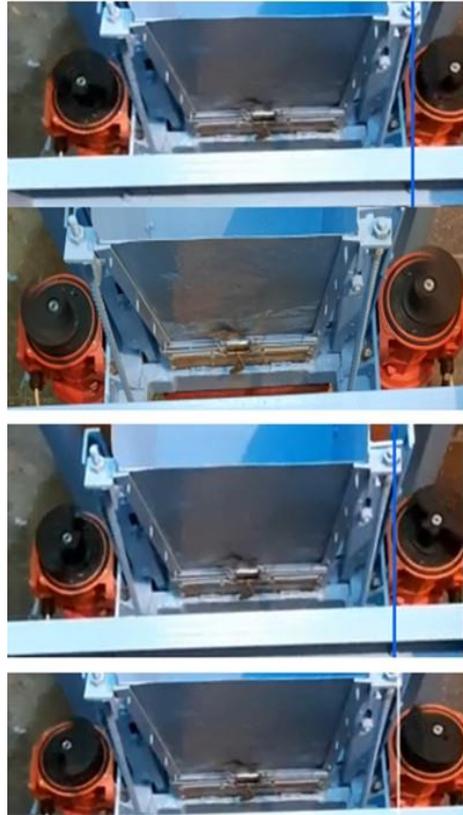


Рисунок 10 - Взаимное положение дебалансных валов измельчителя в случайные моменты времени (вид сверху, крышки дебалансов вибровозбудителей сняты)

Согласно регламентирующим документам и зоотехническим требованиям, 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.

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 11).

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

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx = F(x_1) - F(x_2). \quad (40)$$

Геометрически указанную вероятность можно истолковать как площадь заштрихованной

на Рисунке 11 фигуры.

Соответственно вероятность получения: мелкого (для данного вида животных) размола составляет

$$P(x < x_1) = \int_0^{x_1} f(x)dx, \quad (41)$$

крупного (для данного вида животных) размола

$$P(x > x_2) = \int_{x_2}^{\infty} f(x)dx. \quad (42)$$

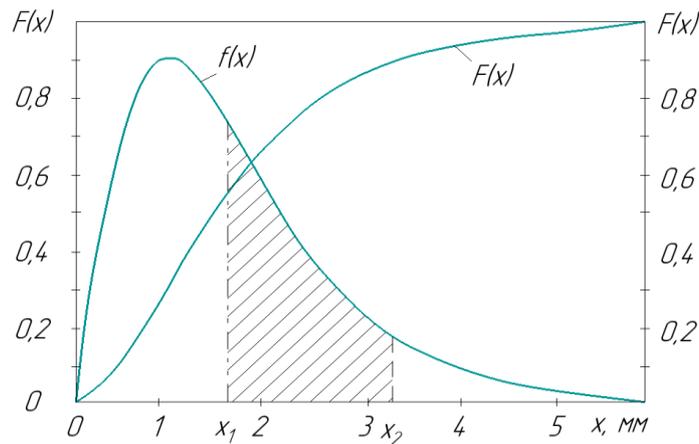


Рисунок 11-Теоретическое распределение размеров x частиц дерти

Как видно из Рисунка 11, 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. Аналитически можно определить 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.

$$\frac{dP}{dx} = F'(x_2) - F'(x_1) = 0. \quad (43)$$

Пригодность конкретного измельчителя для определенного вида животных предлагается оценивать по выражению

$$\xi = \frac{\int_{x_1}^{x_2} f(x)dx}{\int_0^{\infty} f(x)dx}.$$

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

$$\xi = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx. \quad (44)$$

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

$$\xi = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \rightarrow \max. \quad (45)$$

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 дополнительном 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.

Сравнение энергетических показателей измельчителей кормового зерна на основе рациональной формулы В. П. Горячкина. Нами предлагается трактовка использования формулы Горячкина для перечня сил, действующих на рабочие органы при измельчении кормового зерна, а именно:

$$P = F_a + kabv + \varepsilon abv^2, \quad (46)$$

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 хотя и слабый, но 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. Рабочие органы и создают эти дисперсные потоки, и вынуждены с ними взаимодействовать, затрачивая энергию.

Второй член формулы (46) 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 (46) на скорость рабочего органа v , то получим энергетический баланс измельчающей машины в виде мощностей

$$N = (\mu v^2)v + kab v^2 + \varepsilon abv^3 \quad (47)$$

где N – мощность, развиваемая приводом измельчителя (за исключением мощности на преодоление потерь в подшипниках и передаточных устройствах).

Из выражения (47) 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

$$N = (\mu + \varepsilon ab)v^3 + kabv^2, \quad (48)$$

Данное выражение в полной мере справедливо для молотковых дробилок и вибрационных измельчителей. Квадрат второго члена для молотковых дробилок доказал сам В. П. Горячкин в своей работе «Графическое изображение уравнений удара».

Для вибрационных рабочих органов квадрат второго члена этой формулы доказывается следующим. Дело в том, что вибрационный рабочий орган отдает энергию рабочей среде 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 рекуперировать, 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

$$N = (\mu + \varepsilon ab)(A\omega)^3 + kab(A\omega)^2, \quad (49)$$

Сравним далее процессы измельчения в молотковом и вибрационных измельчителях по первому члену выражения (49). 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_b , поэтому, не превосходят величины $A\omega = 0,005 \cdot 300 = 1,5$ м/с. Таким образом, скорости рабочих органов молотковых дробилок примерно в

$$v_m / v_b = 70 / 1,5 \approx 47$$

раз превышают скорости вибрационных рабочих органов.

Еще более разительно соотношение кубов этих скоростей, фигурирующих в первом члене обсуждаемой формуле (49):

$$v_m^3 / v_b^3 = 70^3 / 1,5^3 \approx 102400.$$

На основании этих цифровых данных и анализа формулы В. П. Горячкина для зернодробилок (49) 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 (49) на $Q\lambda$, где Q – производительность измельчающей машины, λ – степень измельчения. Тогда в левой части будем иметь показатель энергоемкости Ξ процесса с учетом достигнутой степени измельчения λ . В целом же получили рабочую формулу для расчета показателя энергоемкости процесса измельчения

$$\Xi = \frac{1}{Q\lambda} [(\mu + \varepsilon ab)v^3 + kabv^2]. \quad (50)$$

Конкретно для вибрационного измельчителя формула примет вид

$$\Xi = \frac{1}{Q\lambda} [(\mu + \varepsilon ab)(A\omega)^3 + kab(A\omega)^2].$$

С учетом малости члена $(\mu + \varepsilon ab)(A\omega)^3$ последнюю формулу можно упростить

$$\Xi = \frac{kab}{Q\lambda} A^2 \omega^2. \quad (51)$$

В этой формуле только один подгоночный коэффициент, в этом ее положительное свойство. Но она должна быть проверена экспериментально.

Оценка эффективности однократного механического воздействия на слой 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.

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.

Если обратиться к известным кривым нагружения зерна, то можно выделить две характерные точки. Первая точка определяет собой предел текучести σ_T слоя, а вторая – 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

$$\sigma = \sigma_u + \sigma_y, \quad (52)$$

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.

Напряжение от инерционного сопротивления слоя можно найти по известной формуле

$$\sigma_u = \rho v^2, \quad (53)$$

где ρ – плотность слоя;

v – скорость нагружения слоя.

После этих предварительных положений сформулируем условия отнесения нагружения слоя к статическому или динамическому типу:

$$\rho v^2 < \sigma_T \text{ – статическое нагружение;} \quad (54)$$

$$\sigma_{II} > \rho v^2 > \sigma_T \text{ – динамическое нагружение;} \quad (55)$$

$$\rho v^2 > \sigma_{II} \text{ – супердинамическое нагружение.} \quad (56)$$

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 (по С. В. Мельникову): $\rho=130 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_T=9-10 \text{ МПа}$; $\sigma_{II}=12-14 \text{ МПа}$. 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 (54), 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 $80-100 \text{ м/с}$. Для скорости $v=90 \text{ м/с}$ имеем: $\rho v^2=1300*90^2=10,53 \text{ МПа}$. Тут выполняется условие (56), следовательно, нагружение зерна в молотковых дробилках является динамическим.

Применение условий (54) - (56) для слоя подтвердили 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 параллельно с выяснением роли скоростного и сжимающего факторов в общей картине разрушения слоя зерновок.

Для проведения экспериментальных исследований была изготовлена специальная ударная установка (Рисунок 12). 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.

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.

В качестве выходных характеристик процесса использовали:

1) эффективность η однократного удара

$$\eta = \frac{P_1 - P_2}{P_1} = 1 - \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{h_2}{h_1}, \quad (57)$$

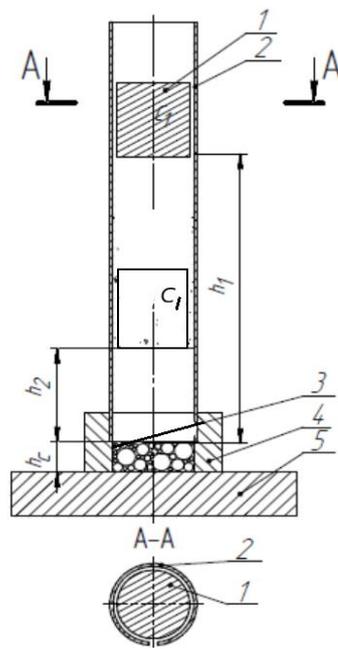
где P_1 - запас потенциальной энергии ударника в момент его опускания;

P_2 - запас потенциальной энергии ударника в верхней точке отскока

2) относительная масса разрушенных зерен ζ

$$\zeta = (m_2^*/m_2) 100\%, \quad (58)$$

где m_2^* - масса поврежденных зерен (по массе) в слое после удара.



а

б

Рисунок 12 - 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

Величину ξ определяли при помощи ситового анализа.

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(57));
- 3) энергия одиночного удара, изменяемая в эксперименте посредством m_1 .

Уровни и кодированные значения факторов приведены в Таблице 2.

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.

Показатель эффективности y_1 оказался очень высоким – 0,96...0,99, что согласуется с теоретическими расчетами, приведенными в исследованиях И. Я. Федоренко и А. А. Смышляева. 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.

Таблица 2 - Уровни и кодированные значения факторов

Факторы	$A(x_1) \sim n$,	$B(x_2) \sim v_1$,	C

		<i>m/c</i>	$(x_3) \sim \Pi_1, \text{ Дж}$
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

В то же время показатель эффективности y_1 оказался совершенно неинформативным в плане построения уравнения регрессии. Для этих целей использовали второй показатель y_2 – 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

$$y_2 = 63,5 - 15,3X_1 + 4,6X_3 + 1,4X_1X_2 - 5,2X_1X_3 + 3,3X_2X_3 + 10,1X_1^2 + 4,1X_2^2 - 3,2X_3^2. \quad (59)$$

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.

Численная оптимизация изучаемого процесса по максимуму разрушенных зерновок в слое, проведенная при помощи функции *minimize* программы *Mathcad 15*, дает граничные значения факторов. Процесс измельчения зерна ударом по данной схеме нужно вести так, чтобы толщина слоя составляла один размер зерна ($X_1 = -1$), скорость удара была минимальной ($X_2 = -1$), а энергия удара, наоборот, максимальной ($X_3 = 1$). 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.

- 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.

Моделирование процесса вибрационного измельчения кормового зерна на основе теории размерности. Для правильной постановки и обработки экспериментов, результаты которых позволяли бы установить общие закономерности и могли бы быть приложенными к случаям, в которых эксперимент не проводился 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.

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

$$\mathcal{E} = \varphi_1(A, \omega, \rho, Q, \sigma_n, I, b, d, l), \quad (60)$$

где A – амплитуда колебаний активной щеки по нижнему ее обрезу;

ω – угловая частота колебаний;

ρ – плотность материала зерновки;

Q – производительность измельчителя;

σ_n – предел прочности материала зерновки.

I – момент инерции пассивной щеки относительно оси качания;

b, l – размеры выпускной щели измельчителя в статическом положении (Рисунок 13);

d – размер зерновки.

Зависимости, которая связала бы воедино все эти величины, получено не было, что объясняется сложностью рассматриваемого процесса.

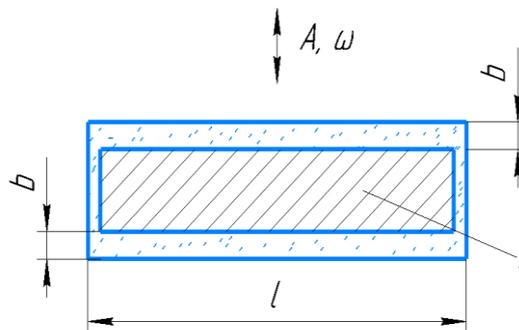


Рисунок 13 - Сечение по нижнему обрезу рабочих органов

Аналогично, для других показателей имеем

$$M = \varphi_2(A, \omega, \rho, Q, \sigma_n, I, b, d, l); \quad (61)$$

$$v = \varphi_3(A, \omega, \rho, Q, \sigma_n, I, b, d, l); \quad (62)$$

$$Ц = \varphi_4(A, \omega, \rho, Q, \sigma_n, I, b, d, l), \quad (63)$$

где M – величин модуля размола, мм;

v – коэффициент вариации размеров частиц, %;

$Ц$ – содержание целых зерен, %.

Перечисленные величины M, v и $Ц$ характеризуют качественную сторону измельчения. Их применение обусловлено различными регламентирующими документами. В дополнение к этому рассчитывался предложенный нами коэффициент ξ соответствия данного измельчителя или его режима настройки зоотехническим требованиям, определяемый выражением (44).

В свете сказанного, для получения требуемых зависимостей остается экспериментальный путь. Чтобы облегчить здесь задачу, воспользуемся методами теории размерности, 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.

Выберем в качестве основных следующие единицы: A, ω и ρ . В результате применения π -теоремы получили критерии

$$\pi_1 = \frac{Q}{\rho b l A \omega}, \pi_2 = \frac{\rho A^2 \omega^2}{\sigma_n}, \pi_3 = \frac{I \omega^2}{\sigma_n b l A}, \pi_4 = \frac{b}{d}, \pi_5 = \frac{b}{A}, \pi_6 = \frac{d}{l}.$$

После проведения отсеивающего эксперимента осталось три фактора, которые переобозначили следующим образом:

$$\pi_1 = \frac{Q}{\rho d l A \omega} (\text{«A»}), \pi_2 = \frac{I \omega^2}{\sigma_n b l A^2} (\text{«B»}), \pi_3 = \frac{b}{d} (\text{«C»}). \quad (64)$$

Таким образом, с 9 первоначальных факторов мы понизили их число сначала до 6, а после отсеивания факторов – до 3, 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 обоснованные численные значения критериев подобия, то на их основе можно строить типоразмерный ряд машин с одинаковыми технико-экономическими показателями. Очевидно, что для всех этих машин должно быть равенство критериев подобия. Условия подобия принято записывать в форме

$$\pi_k = idem (k = 1, \dots, n), \quad (65)$$

где *idem* (фр.) означает «одно и то же».

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 σ_n);
- в) геометрические и физические параметры рабочих органов (момент инерции I пассивной щеки относительно оси качания, размеры выпускной щели измельчителя в статическом положении b, l).

Перечисленные выше критерии имеют следующий физический смысл. Так, первый критерий π_1 выражает соотношение реальной производительности Q и некоторой характерной (эталонной) производительности $Q_0 = b l \rho A \omega$ 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 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 $U \sim \sigma_n b l A$, запасенной при сжатии слоя материала сечением bl , на перемещении A .

Физический смысл критерия π_3 ясен без каких-либо комментариев.

Программа экспериментальных работ. Для подтверждения теоретических выводов по технологическому процессу вибрационного измельчения фуражного зерна, а также с целью определения рациональных конструктивно-режимных параметров вибрационного измельчителя составлена программа исследований, включающая:

- 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.

С целью снижения числа опытов в качестве основного экспериментального материала использовали ячмень и пшеницу. Критериями выбора ячменя как модельного материала явились его высокие прочностные характеристики, типичность формы и геометрических размеров.

Обоснование и выбор матрицы планирования основного эксперимента, методики его проведения и обработки. 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 3).

Таблица 3 – Уровни варьирования факторов в основном эксперименте

Фактор	$\pi_1(x_1)$	$\pi_2(x_2)$	$\pi_3(x_3)$
+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, мы должны для каждой культуры получить по четыре уравнения регрессии: для \mathcal{E} , M , v и \mathcal{C} .

Успех эксперимента во многом определяется выбором его плана (матрицы). Выбор плана является неформальной процедурой.

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 уравнений регрессии второго порядка.

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. 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.

Функция *boxbehnken(n)* возвращает n -факторную матрицу плана Бокса — Бенкена. Эта функция работает только с планами, у которых $3 \leq n \leq 7$.

Методика оптимизации процесса вибрационного измельчения кормового зерна в эксперименте. 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 , $\text{Вт} \cdot \text{ч} / (\text{кг} \lambda)$;
2. модуль размола M , мм;
3. неравномерность измельченного продукта (коэффициента вариации модуля помола) v , %.
4. содержание целых зерен в измельченном продукте (по массе) \mathcal{C} , %.

Эти показатели и были приняты первоначально в качестве *критериев оптимальности* процесса вибрационного измельчения фуражного зерна. Прочие показатели получаются в качестве промежуточных расчетов при вычислении критериев оптимальности. Выделим $\mathcal{E}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ в качестве главного критерия, а остальные критерии переведем в ограничения.

С учетом сказанного *математическую модель оптимизации*, основанную на экспериментальных данных, записываем в виде

$$\begin{aligned} \mathcal{E}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= N/Q \lambda \rightarrow \min, \\ [M_1] &< M(x_1, x_2, \dots, x_n) < [M_2], \\ v(x_1, x_2, \dots, x_n) &< [v], \\ \mathcal{C}(x_1, x_2, \dots, x_n) &< [\mathcal{C}], \end{aligned} \quad (66)$$

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);

$[v]$ – допускаемые значения неравномерности размеров измельченного продукта (коэффициента вариации модуля размола), %;

$[\mathcal{C}]$ – допускаемое содержание целых зерен в измельченном продукте (по массе), %.

Величины \mathcal{E} , M , \mathcal{C} и v в совокупности дают энергетическую и качественную оценку процесса измельчения фуражного зерна.

Для проведения экспериментальных испытаний был создан *лабораторный (экспериментальный) образец вибрационного измельчителя фуражного зерна.*

Лабораторный измельчитель содержит раму 1 (Рисунок 14), 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 15. Здесь дополнительно показан загрузочный бункер, куда загружали исходное зерно.

В процессе проведения экспериментальных исследований были использованы различные измерительные и регистрирующие приборы, перечень которых представлен в диссертации.

В пятой главе «**Анализ экспериментальных исследований и оптимизация параметров процесса измельчения**» изложены результаты опытов, характеризующих процесс вибрационного измельчения фуражного зерна.

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 16). 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, характерных для процесса плющения. Остальная часть продукта содержит бесформенные частицы, характерные для работы молотковой дробилки. Увеличение влажности измельчаемого зерна примерно до (14,0-14,5) % повышает количество пластинок (по массе) до 75-85%. Это так называемое сухое плющение кормового зерна.

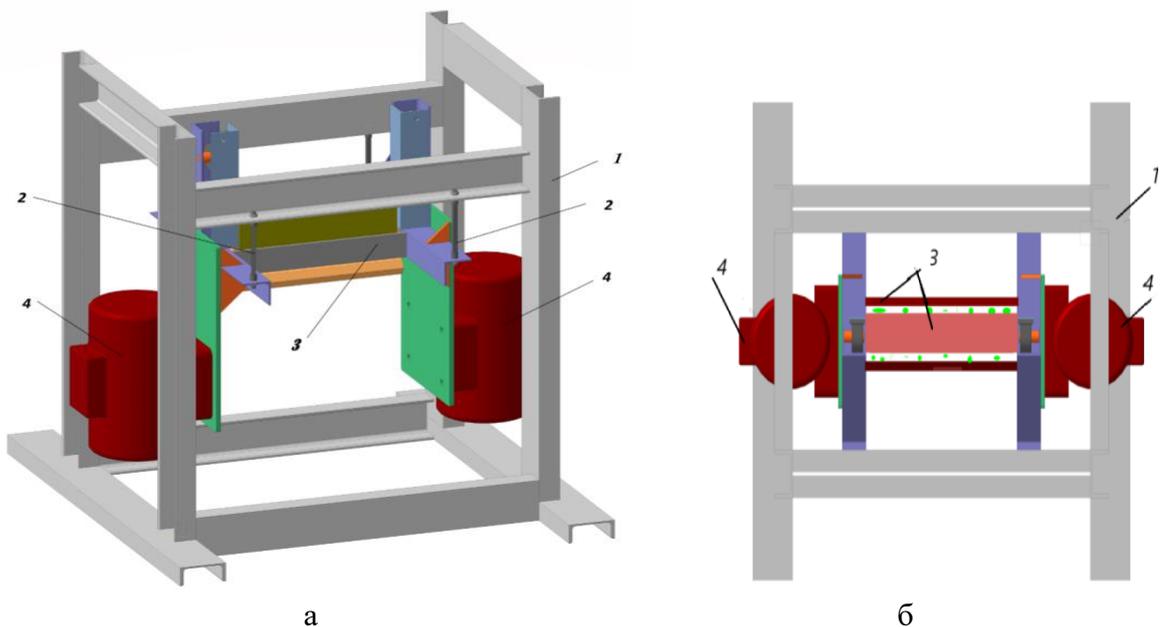


Рисунок 14.- 3D -модель: общий вид (а) и вид сверху (б) лабораторного образца вибрационного измельчителя (бункер условно снят): 1- рама; 2-подвески вибрирующей системы; 3- рабочие органы; 4- вибровозбудители



Рисунок 15- Общий вид
экспериментального вибрационного
измельчителя

Даже такое 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 (Рисунок 16), но и происходит разрыв на клеточном уровне. Если посмотреть на клетку плющеного зерна под микроскопом, можно увидеть, что она вся покрыта микротрещинами, именно поэтому его усвоение лучше.



Рисунок 16 - Вид разрушенных вибрацией зерновок
пшеницы влажностью 14,3 %

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) (по Н. В. Пристачу).

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 (соответствует режиму опыта №1 основного эксперимента) на пшенице $W=10,9\%$ рассматривается ниже. Полученные данные были представлены в виде гистограммы и аппроксимированы затем нормальным законом распределения модуля размола, как случайной величины (Рисунок 17).

Проверка по критерию Пирсона показала правомерность такой аппроксимации.

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 $W=10,2\%$.

Экспериментальная гистограмма и теоретическая плотность нормального распределения остатков на ситах

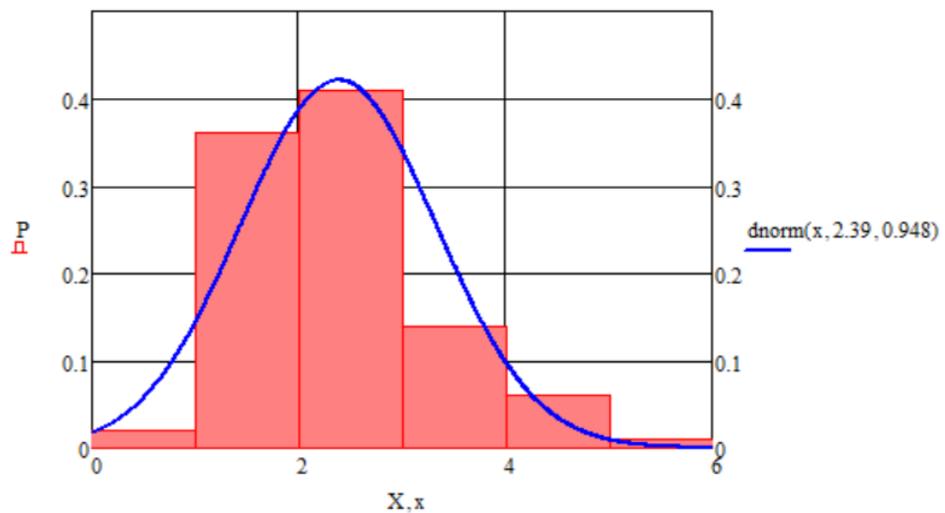


Рисунок 17 – Экспериментальная гистограмма и теоретическая плотность распределения остатков на ситах (пшеница, $W=10,9\%$)

Зависимость энергоёмкости процесса измельчения от параметров вибрации. Основным подходом к теоретическому расчету удельной энергоёмкости процесса измельчения кормового зерна явилась рациональная формула В. П. Горячкина, на основе которой была получена зависимость (51), отражающая особенности вибрационного измельчения. Энергоёмкость зависит от многих факторов, но для изучаемых типов измельчителей важно установить влияние параметров вибрации рабочих органов. Указанная формула (51) дает параболическую зависимость, как и теория размерности.

На рисунках 18 и 19 представлены теоретические зависимости энергоёмкости от параметров вибрации, а также экспериментальные точки.

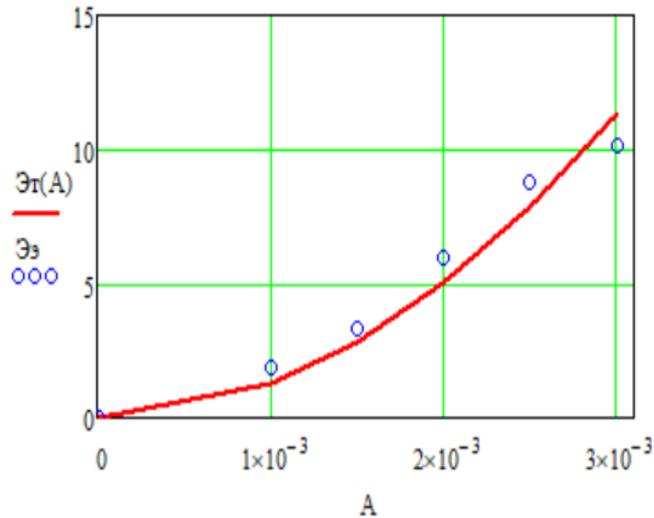


Рисунок 18 - Зависимость энергоемкости (кВт*ч/т) процесса вибрационного измельчения от амплитуды A колебаний (м) рабочих органов: точки-эксперимент, линия-теория; измельчаемый материал - пшеница влажностью 10,9%.

Из графиков видно, что эксперимент качественно и количественно подтверждает теоретические зависимости. Следовательно, механико-технологические предпосылки, использованные при построении теории, являются обоснованными.

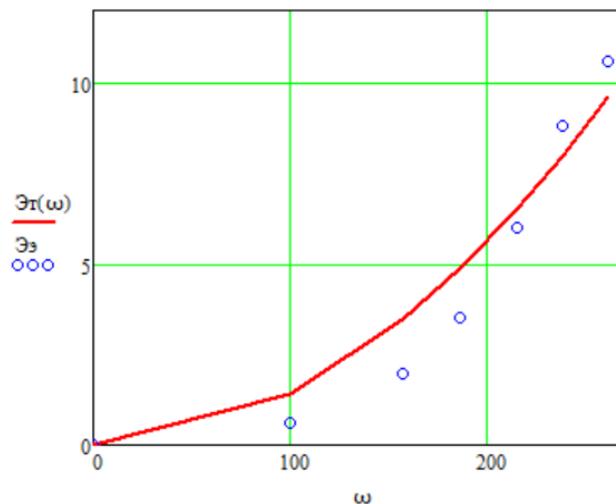


Рисунок 19 - Зависимость энергоемкости (кВт*ч/т) процесса вибрационного измельчения от частоты колебаний (ω , рад/с) рабочих органов: точки-эксперимент, линия-теория; измельчаемый материал - пшеница влажностью 10,9%.

Анализ процесса вибрационного измельчения кормового зерна. Проведение эксперимента по плану Бокса-Бенкена и его последующая обработка позволили получить адекватные уравнения регрессии в виде полиномов второй степени:

а) для процесса измельчения ячменя (в кодированном виде):

- удельная энергоемкость процесса измельчения зерна с учетом достигнутой степени измельчения

$$y_1 = 3,24 + 0,29x_1 - 0,37x_2 - 0,33x_3 + 0,22x_1x_2 + 0,25x_1x_3 - 0,72(x_1)^2 + 0,42(x_2)^2 - 0,57(x_3)^2, \text{Вт} \cdot \text{ч}/(\text{кг} \cdot \lambda). \quad (67)$$

- модуль помола

$$y_2 = 1,74 + 0,31x_1 - 0,36x_2 - 0,08x_3 + 1,10x_1x_2 - 0,18(x_1)^2 + 0,13(x_2)^2 - 0,06(x_3)^2, \text{ мм.} \quad (68)$$

- коэффициент вариации модуля помола

$$y_3 = 45,59 - 2,84x_1 + 2,04x_2 + 1,10x_1x_2 + 1,90(x_2)^2 - 5,83(x_3)^2, \%. \quad (69)$$

- содержание целых зерен в измельченном продукте

$$y_4 = 2,53 + 1,83x_1 - 0,89x_2 - 1,10x_1x_2 - 0,85(x_2)^2, \%. \quad (70)$$

б) для процесса измельчения пшеницы (в кодированном виде):

$$y_1 = 2,90 + 0,30x_1 - 0,38x_2 - 0,20x_3 + 0,18x_1x_2 - 0,54(x_1)^2 + 0,32(x_2)^2 - 0,74(x_3)^2, \text{ Вт*ч/(кг*л)}. \quad (71)$$

$$y_2 = 1,55 + 0,34*x_1 - 0,37*x_2 - 0,07*x_3 - 0,12*(x_1)^2 + 0,12*(x_2)^2 - 0,13*(x_3)^2, \text{ мм.} \quad (72)$$

$$y_3 = 43,65 - 2,73x_1 + 2,07x_2 + 1,67x_1x_2 + 2,15(x_2)^2 - 4,94(x_3)^2, \%. \quad (73)$$

$$y_4 = 2,38 + 1,98x_1 - 1,11x_2 - 1,37x_1x_2 + 0,62x_1x_3 - 0,68(x_2)^2, \%. \quad (74)$$

Изучение перечисленных уравнений регрессии для ячменя 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 ячменя с учетом достигнутой степени измельчения (с 2,90 до 3,24 Вт ч/(кг л), 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. Это сказывается и на работе вибрационного измельчителя.

Из анализа уравнений регрессии следует, что все отобранные в отсеивающем эксперименте факторы значимы, наибольшее влияние на выходные характеристики оказывают факторы x_1 и x_2 . Третий фактор x_3 имеет меньшее влияние, и его действие проявляется весьма сложным образом.

Графическая иллюстрация уравнений регрессии представлена в диссертации. Рассмотрим, например, уравнение (71) для энергоёмкости пшеницы. 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 20). Такая сложная картина линий равного уровня обусловлена наличием в уравнении регрессии (71) как линейных, так и квадратичных членов с факторами x_1 и x_2 . При этом знаки линейных и квадратичных членов по каждому фактору разные.

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 $x_3=1$. 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 $\mathfrak{E} = N / (Q\lambda)$.

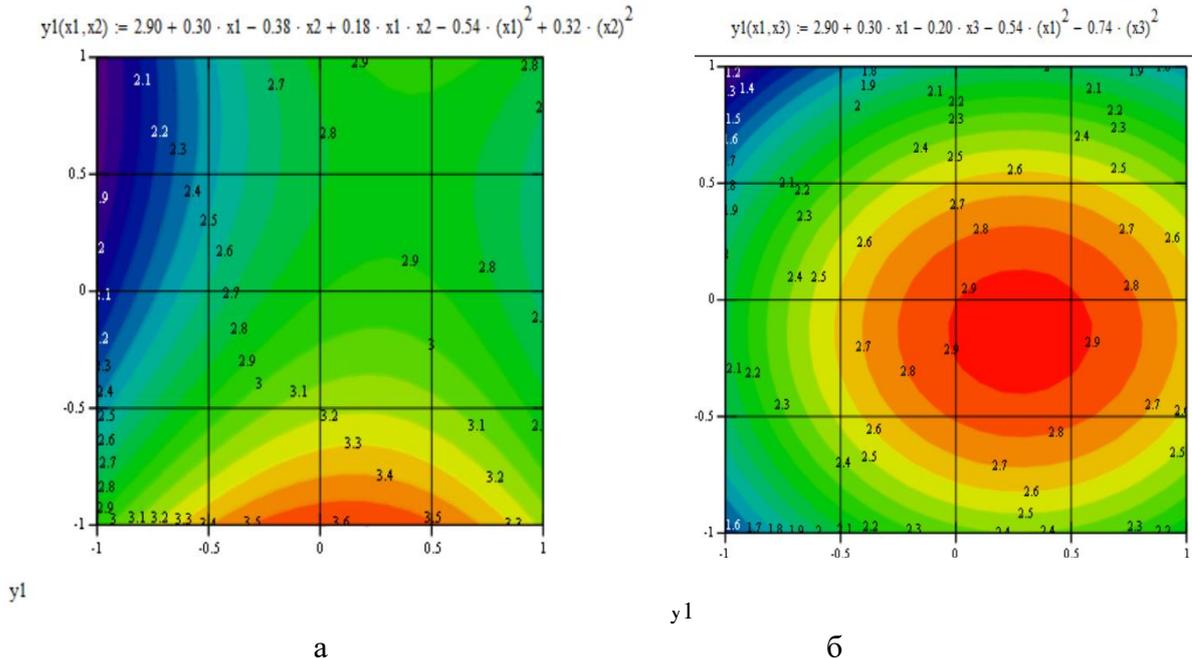


Рисунок 20 - Линии равного уровня для уравнения регрессии (71):

а) при $x_3=0$; б) при $x_2=0$

В качестве примера анализа рассмотрим также уравнение регрессии (72). Уравнение адекватно, поскольку 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 x_1 и x_2 , причем рост первого фактора увеличивает модуль размола, а рост второго фактора, наоборот, уменьшает этот показатель. Третий фактор x_3 имеет меньшее влияние, и его действие проявляется весьма сложным образом.

Графическая иллюстрация этого уравнения представлена на Рисунке 21.

На рисунке 21 по оси абсцисс отложен фактор x_1 , по оси ординат – фактор x_2 . Видно, что при минимальных значениях этих факторов модуль размола пшеницы составляет около 1,6 мм. По мере роста фактора x_1 при неизменном x_2 модуль размола достигает величины 2,0 мм. Увеличение фактора x_2 при неизменном x_1 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.

Оптимизация процесса измельчения. По ранее изложенной методике (66) нашли оптимальную (по критерию энергозатрат) точку для измельчения ячменя в факторном пространстве с координатами

$$x_1 = -0,231; x_2 = 0,827; x_3 = 1, \quad (75)$$

которая рекомендуется в качестве компромиссной и при измельчении кормовой пшеницы. В этом случае параметры правильнее называть не оптимальными, а рациональными.

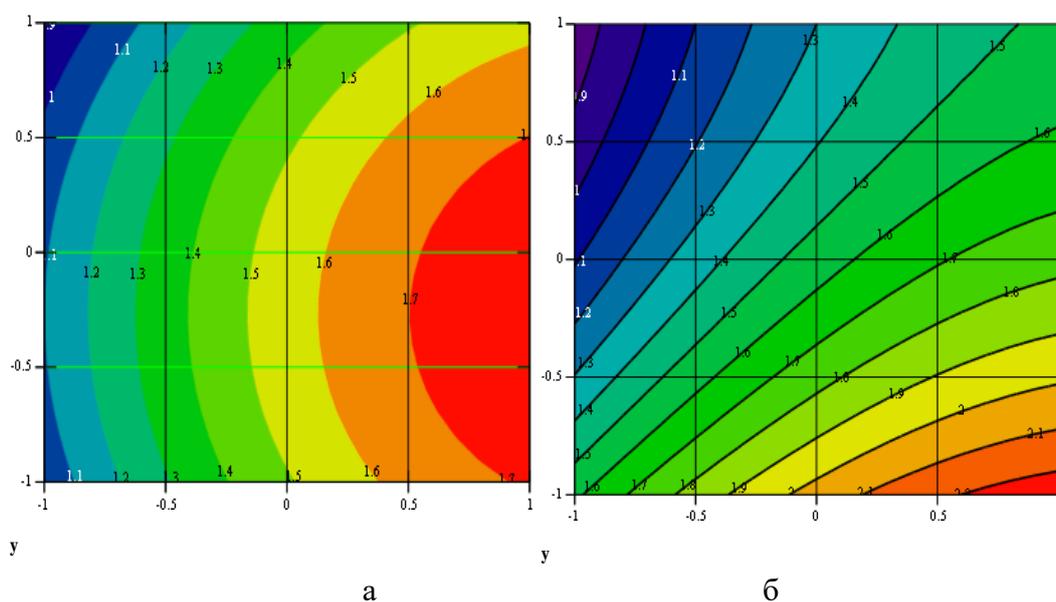


Рисунок 21 – Линии равного уровня для уравнения регрессии (72):
а) при $x_3=0$; б) при $x_2=0$

Раскодирование рациональных значений параметров (75) 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, представленные в виде значений критериевподобия.

Энергоёмкость собственно процесса измельчения ячменя с учетом достигнутой степени измельчения при рациональных параметрах составляет $2,116 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/(\text{кг} \cdot \lambda)$. В привычных для производства единицах это составляет $2,116 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/(\text{т} \cdot \lambda)$, в системе СИ – $7,618 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \lambda)$.

Для пшеницы этот показатель составляет

$$\mathcal{E} = 1,732 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/(\text{кг} \cdot \lambda) = 1,732 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/(\text{т} \cdot \lambda) = 5,196 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \lambda).$$

Таким образом, энергоёмкость измельчения пшеницы на рациональных режимах работы вибрационного измельчителя практически на треть меньше энергоёмкости измельчения ячменя $(7,618 - 5,196)/7,618 = 0,318$ (31,8%).

1. Качество полученной дерти при этом 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 размер. Для молотковых дробилок этот показатель не превышает 45-50%.

В пятой главе «**Экономическая эффективность и реализация результатов исследования**» приведены показатели сравнительной экономической эффективности вибрационного измельчителя, рассчитанные согласно ГОСТ 34393-2018 «Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки».

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 лабораторных испытаний в Алтайском ГАУ и опытно-конструкторских работ в ООО «Еврогруп - Сибирь».

Расчеты показывают, что использование в реальном производстве вибрационного измельчителя вместо молотковой дробилки позволяет снизить потребность в электроэнергии на 26,7%. Себестоимость производства 1 т зерновой дерти снижается на 12,4%. Расчетный срок окупаемости капиталовложений составляет около 1,2 года. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения вибрационного измельчителя на фермах крупного рогатого скота Сибирского федерального округа составляет около 23 млн рублей

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 технологии измельчения, 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:

- подготовлены и изданы рекомендации *«Совершенствование процесса измельчения кормового зерна»*, включающие технологические схемы вибрационных измельчителей кормового зерна и основные положения расчетной методики определения их параметров (утверждены заместителем министра сельского хозяйства Алтайского края Лукьяновым Ю. С. 19 мая 2023 года). Рекомендации получили положительные отзывы от государственных органов Новосибирской и Омской областей, Республики Алтай;

- проведено эскизное проектирование (прототипирование), изготовление и испытание вибрационного измельчителя кормового зерна производительностью 200-250 кг/час;

- при использовании наших разработок ООО "Глобал Инжиниринг" (г. Барнаул) разработало экспериментальный образец вибрационного измельчителя кормового зерна производительностью 0,3 т/час (Рисунок 22), предусматривающий проведение ОКР по дальнейшей отработке различных схем вибрационных измельчителей. В дальнейшем этим предприятием предусматривается разработка измельчителя производительностью 3 т/час);

- ООО «СТ-Проект» (г. Ставрополь) приступило к проектированию и изготовлению вибрационного измельчителя кормового зерна производительностью 2 - 3 т/час.



Рисунок 22 - Вибрационный измельчитель кормового зерна производительностью 300 кг/час (разработка ООО "Глобал Инжиниринг", г. Барнаул)

Некоторые результаты наших исследований вошли в лабораторный практикум «Моделирование вибрационных процессов и устройств АПК. - Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2020. -

198 с.», 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».

Материалы исследований используются в учебном процессе:

- 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

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Отсеивающий эксперимент показал, что существенными для процесса вибрационного измельчения кормового зерна являются факторы, представленные в виде критериев подобия: $\pi_1 = \frac{Q}{\rho d l A \omega}$, $\pi_2 = \frac{l \omega^2}{\sigma l A^2}$, $\pi_3 = \frac{b}{d}$. Основным экспериментом, проведенным 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 $7,618 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \lambda)$, пшеницы - $5,196 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \lambda)$. Качество полученной дерти 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 для животных размер. Для молотковых дробилок этот показатель не превышает 45-50%.

9. 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. 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.

2. 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. - №1. - С. 46-51. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-0-0. EDN: OZIKUK.

3. 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.

4. **Левин А. М.** Экспериментальная оптимизация процесса вибрационного измельчения кормового зерна // Вестник Омского ГАУ. 2023. № 1 (49). С. 161–168. DOI 10.48136/2222-0364_2023_1_161.

5. Бесполденов, Р. В. Виброактивность молотковых зернодробилок с оппозитной загрузкой исходного материала / Р. В. Бесполденов, **А. М. Левин**, И. Я. Федоренко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2023. - №6(224). - С. 79-86. DOI: 10.53083/1996-4277-2023-224-6-78-85.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах цитирования Scopus:

11. Fedorenko, I. Y. Dynamic properties of vibration crusher of feed grain taking into account technological loading / I. Y. Fedorenko, **А. М. 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.

12. Fedorenko, I. Y. Modeling elastic and dissipative properties of feed grain subjected to vibration / I. Y. Fedorenko, **А. М. 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.

Патентах РФ:

13. 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). – EDN CCOWXF.

14. 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.

15. 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". – EDN DSRVWK.

16. 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 NKZXVI.

17. 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.

Монографии и рекомендации:

18. 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. – 1 CD-R (6 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.

19. 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.

Публикации в других изданиях:

1. **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.

2. **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– 10 февраля 2023 года. Книга 1. – Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2023. – С. 134-137. – EDN NMQJOK.

2. 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.

3. 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.

4. Федоренко, И. Я. Реологическая модель единичной частицы фуражного зерна / И. Я. Федоренко, **А. М. Левин**, А. В. Табаев// Теория и практика современной аграрной науки: Сборник III национальной (Всероссийской) научной конференции с международным участием, Новосибирск, 28 февраля 2020 года / Новосибирский государственный аграрный университет. – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2020. – С. 476-479.

5. 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.

6. Федоренко, И. Я. Инновационные конструкции вибрационных дробилок фуражного зерна/ И. Я. Федоренко, **А. М. Левин**, А. В. Табаев// Главный агроном. – 2020. – С.5.-7.

7. **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. -

8. **Левин А.М.** Использование вибрационного воздействия для измельчения зерна // Молодежь-Барнаулу: Материалы пятой городской научно-практической конференции молодых ученых (20-21 ноября 2003 г.). Барнаул: Аз Бука, 2003. С. 316.

9. **Левин А.М.** Обоснование конструктивно-кинематических параметров вибрационно-ударного измельчителя фуражного зерна // Молодежь-Барнаулу: Материалы научно-практической конференции (22-23 ноября). - Барнаул: Аз Бука, 2004. - С. 296-298.

10. **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.

11. Федоренко, И. Я., **Левин А.М.** Особенности конструкции вибрационно-ударного измельчителя зерна // Материалы XLIII научно-технической конференции Челябинского государственного агроинженерного университета. -Часть 2. -Челябинск: ЧГАУ, 2004. - С. 47-51.

12. Карманов Н.Г., **Левин А.М.** Использование уравнения Лагранжа 2-го рода для описания динамики вибрационно-ударного измельчителя фуражного зерна // 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.

13. 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.

14. Федоренко, И. Я. Энергетические соотношения при ударном измельчении зерна/ И. Я. Федоренко, **А. М. Левин** // Механизация и электрификация сел. хоз-ва, 2002.- №11.- С.31-32.