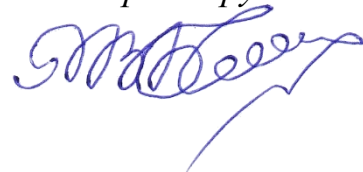


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



БЕСПОЛДЕНОВ РОМАН ВИКТОРОВИЧ

**КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОЛОТКОВОЙ
ЗЕРНОДРОБИЛКИ С ОППОЗИТНОЙ ЗАГРУЗКОЙ ИСХОДНОГО
МАТЕРИАЛА**

Специальность 4.3.1 – Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук,

профессор Федоренко Иван Ярославович

Барнаул 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ИЗМЕЛЬЧЕНИЮ ФУРАЖНОГО ЗЕРНА МОЛОТКОВЫМИ ДРОБИЛКАМИ.....	15
1.1. Требования к процессу измельчения фуражного зерна.....	15
1.2. Анализ способов измельчения фуражного зерна.....	22
1.3. Основные законы измельчения.....	25
1.4. Классификация молотковых дробилок с горизонтальным расположением ротора	35
1.5. Анализ работы молотковых дробилок с горизонтальным расположением ротора и их недостатки.....	44
1.6. Выводы по 1 главе.....	51
2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ВИБРОАКТИВНОСТЬ МОЛОТКОВЫХ ЗЕРНОДРОБИЛОК И ЕЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ.....	52
2.1. Общие замечания.....	52
2.2. Моделирование технологической виброактивности зернодробилок.....	53
2.3. Особенности динамики дробилок с оппозитной загрузкой исходного материала.....	64
2.4. Потери энергии в шарнирах молотков при их колебаниях.....	66
2.5. Качественное исследование непроизводительных затрат энергии при вибрациях продуктово-воздушного слоя.....	68
2.6. О непроизводительных потерях энергии молотковой зернодробилкой, обусловленных колебаниями грунта под её фундаментом.....	71
2.7. Выводы по 2 главе.....	79
3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ	

ИССЛЕДОВАНИЙ.....	80
3.1. Общая программа экспериментальных исследований и выбор зернового материала.....	80
3.2. Выбор факторов процесса измельчения на основе теории размерности	82
3.3. Отбор факторов для изучения в эксперименте	91
3.4. Описание экспериментальной установки для исследования процесса измельчения.....	93
3.5. Процесс измельчения как многокритериальная задача и объект проведения активного эксперимента.....	97
3.6. Описание приборной базы для исследования и оценка точности приборов.....	107
3.7. Методика обработки результатов эксперимента.....	113
3.8. Выводы по 3 главе.....	121
4. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	123
4.1. Влияние факторов на энергоемкость процесса измельчения....	123
4.2. Влияние сочетания факторов на модуль размола исходного материала в молотковой дробилке с оппозитной загрузкой исходного материала.....	131
4.3. Влияние факторов на коэффициент вариации модуля размола в молотковой дробилке с оппозитной загрузкой исходного материала.....	135
4.4. Качественная оценка получаемого продукта по относительному (по массе) количеству целых зерен.....	141
4.5. Влияние оппозитной загрузки материала на виброактивность молотковой дробилки.....	145
4.6. Характеристика шума молотковой дробилки с оппозитной загрузкой исходного материала.....	153

4.7. Оптимизация процесса измельчения зерна в дробилке с оппозитной загрузкой сырья.....	161
4.8. Выводы по 4 главе.....	164
5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И СОСТОЯНИЕ ВНЕДРЕНИЯ.....	166
5.1. Определение базовой стоимости дробилки.....	166
5.2. Оценка экономической эффективности предлагаемого измельчителя.....	169
5.3. Состояние внедрение предлагаемого измельчителя.....	179
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	181
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ.....	184
Приложение А1 к работе (результаты исследований при измельчении пшеницы).....	207
Приложение А2 к работе (результаты исследований при измельчении ячменя).....	208
Приложение Б 1 Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на энергоемкость процесса при измельчении пшеницы.....	209
Приложение Б 2 Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на энергоемкость процесса при измельчении ячменя.....	211
Приложение Б 3 Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на модуль размола исходного материала при измельчении пшеницы.....	213
Приложение Б 4 Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на модуль размола исходного материала при измельчении ячменя.....	215
Приложение Б 5 Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на коэффициент вариации	

модуля размола при измельчении пшеницы.....	217
Приложение Б 6 Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на коэффициент вариации модуля размола при измельчении ячменя.....	219
Приложение Б 7 Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на относительное (по массе) количество целых зерен в размоле при измельчении пшеницы.....	221
Приложение Б 8 Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на относительное (по массе) количество целых зерен в размоле при измельчении ячменя.....	223
Приложение Б 9 Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на виброактивность молотковой дробилки при измельчении пшеницы.....	225
Приложение Б 10 Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на виброактивность молотковой дробилки при измельчении ячменя.....	227
Приложение Б 11 Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на уровень шумовой обстановки (общий уровень звукового давления во всем спектре частот) при измельчении пшеницы.....	229
Приложение Б 12 Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на уровень шумовой обстановки (общий уровень звукового давления во всем спектре частот) при измельчении ячменя.....	231
Приложение Б 13 Листинг результатов оптимизации и проверки решения процесса измельчения пшеницы в среде MATHCAD.....	233
Приложение Б 14 Листинг результатов оптимизации и проверки решения процесса измельчения ячменя в среде MATHCAD.....	234
Приложение В1 к работе (Патент на изобретение).....	235

Приложение В 2 к работе (Описание полезной модели к патенту).....	236
Приложение № Г 1 к работе (Протокол испытаний зернодробилки).....	237
Приложение № Г2 к работе (Протокол испытаний зернодробилки).....	239
Приложение № Д к работе (Декларация о соответствии ЕАС).....	254
Приложение № Е к работе (Сертификат соответствия ЕАС).....	255
Приложение № Ж к работе (Внедрение в учебный процесс).....	256
Приложение № И к работе (Внедрение в производство).....	258
Приложение № К 1 к работе (Апробация работы)	260
Приложение № К 2 к работе (Апробация работы)	261
Приложение № К 3 к работе (Апробация работы)	262
Приложение № К 4 к работе (Апробация работы)	263
Приложение № К 5 к работе (Апробация работы)	264
Приложение № К 6 к работе (Апробация работы)	265
Приложение № К 7 к работе (Апробация работы)	266
Приложение № К 8 к работе (Апробация работы)	267
Приложение № К 9 к работе (Апробация работы)	268
Приложение № К 10 к работе (Апробация работы)	269

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В целях научно-технического обеспечения развития сельского хозяйства и снижения технологических рисков в продовольственном секторе Указом Президента РФ от 21 июля 2016 г. N 350, была поставлена цель – разработать и реализовать комплекс мер, направленных на создание и внедрение до 2031 года конкурентноспособных отечественных технологий производства, переработки и хранения сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия и производства высококачественных кормов, исходя из новейших достижениях науки.

Для удовлетворения внутренних потребностей Российской Федерации в продукции животноводства и птицеводства к 2025 году необходимо производить не менее 12,1 млн. тонн мяса в убойной массе, 33,8 млн. тонн молока, 45,3 млрд. штук яиц, что потребует увеличения производства кормов всех видов, которое в 2019 году составляло 105,6 млн. тонн кормовых единиц, в том числе концентрированных – 54,9 млн. тонн кормовых единиц, объемистых – 50,7 млн. тонн кормовых единиц [105, 106].

Важнейшей составляющей животноводческой отрасли является производство кормов, так как по расчетам экономистов затраты в структуре себестоимости продукции составляют 60-75% от общей стоимости животноводческой продукции и продукции животноводства, от качества и стоимости которой полностью зависит национальная продовольственная безопасность [4, 68].

Поскольку уровень развития и экономическая эффективность отрасли животноводства во многом определяются обеспечением кормами этого сектора сельского хозяйства, важнейшими условиями успешного развития животноводческой отрасли для увеличения объемов ее производства и качества продукции с одновременным снижением себестоимости посредством сокращения затрат на производство является совершенствование средств механизации и автоматизации процесса производства, развитие и освоение современных

технологий переработки зерновых компонентов [65, 148].

Это позволит в значительной степени осуществить импортозамещение в области создания и выпуска технологического оборудования для комбикормовой промышленности, закупки семян кормовых растений, а также компонентов комбикормов и кормовых добавок.

Основной операцией в процессе переработки зерновых культур на комбикорма для скармливания животным и птицам является измельчение.

На сегодняшний день молотковые дробилки используются в качестве основного оборудования для дробления зерна фуражного назначения в большинстве хозяйств из-за их простой конструкции, широкого распространения в комбикормовой промышленности и сельском хозяйстве, обеспечивающие большой эффект измельчения [13, 16, 63, 75, 95, 113].

В настоящее время получившие широкое распространение молотковые дробилки с горизонтальной осью вращения, используемые в качестве основных измельчителей зерна фуражного назначения, не отвечают требованиям современного производства. Рядом авторов [1, 3, 7, 70, 96, 125, 131, 141, 155, 161, 164, 166, 168] отмечены негативные факторы шума и вибрации, возникающие в процессе переработки измельчаемого материала, в особенности в момент разрушения материала в рабочей камере после его загрузки, и высокая энергоёмкость процесса.

Что характерно, виброактивность дробилок наблюдается даже при тщательной статической и динамической балансировке молотковых барабанов, неизношенности молотков.

При этом повышенная виброактивность молотковых дробилок ведет к непроизводительным затратам энергии, сопутствующим основным затратам на измельчение.

По данным Росстата, в России в последние годы на корм скоту используют примерно 13,3 млн тонн зерна. Затраты на его измельчение составляют около 140-150 млн кВт-ч электроэнергии [147].

Огромные объемы расхода электроэнергии, наличие указанных выше

негативных факторов требуют разработки научных и конструктивных решений, способных снизить виброактивность дробилок и повысить эффективность технологического процесса измельчения.

В связи с этим научный и практический интерес представляют исследования, направленные на повышение эффективности измельчения зерновых кормов в дробилках горизонтального типа на основе снижения их виброактивности, что является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы в научной и научно-практической литературе. Основой теории измельчения материалов растительного происхождения являются труды академика В.П. Горячкина [21].

Решающий вклад в развитие теории измельчения зернового материала, совершенствование процессов измельчения фуражного зерна и приготовления кормов в целом внесли А. А. Артюшин, А. В. Алешкин, В. Р. Алешкин, Г. Ф. Бахарев, И. Ф. Василенко, В. А. Денисов, В. Д. Денисов, В. А. Елисеев, А. И. Завражнов, С. В. Золотарев, В. И. Земсков, Я. Н. Куприц, Г. М. Кукта, И. Н. Краснов, А. Т. Лебедев, П. И. Леонтьев, А. П. Макаров, С. В. Мельников, Е. А. Маркарян, В. Н. Нечаев, В. И. Пахомов, П. А. Ребиндер, У. К. Сабиев, П. А. Савиных, А. М. Семенихин, Н. С. Сергеев, В. А. Сысуев, Н. В. Сундеев, В. И. Сыроватка и другие ученые.

Исследования в области влияния вибрации на эффективность измельчения молотковыми дробилками, совершенствования машин данного типа и их структурных элементов, посвящены работы А. Е. Яблокова., А. Р. Казарова., И. И. Иванова.

Однако, несмотря на значимость выполненных исследований, некоторые аспекты данной проблемы изучены в незначительной степени. Заслуживают дальнейшего внимания вопросы рассмотрения причин и факторов, влияющих на виброактивность молотковых зернодробилок с горизонтальным барабаном, непроизводительных затрат энергии в конструктивных элементах зернодробилки при вибрации конструкции.

Целью исследования является повышение эффективности процесса

измельчения фуражного зерна на основе снижения технологической виброактивности молотковых дробилок с горизонтальным расположением барабана.

Задачи исследования:

1. Обосновать новую технологическую схему молотковой дробилки, в которой изменяется подвод зерна в зону измельчения, и выявить основные закономерности силового взаимодействия рабочих органов с измельчаемым материалом;

2. Оценить влияние параметров на роль технологической виброактивности, непроизводительных затратах энергии в шарнирах молотков, воздушно-продуктовом слое и грунте, прилегающем к фундаменту дробилки.

3. Разработать математические модели технологической виброактивности молотковых зернодробилок, оценить ее энергетические и другие негативные последствия;

4. Обосновать параметры и режимы молотковой дробилки с оппозитной загрузкой зерна;

5. Дать оценку эффективности основных результатов исследования.

Объектом исследований является технологический процесс измельчения фуражного зерна в дробилке молоткового типа с горизонтальным расположением барабана и оппозитной схемой загрузки, с учетом виброактивности.

Предмет исследований – закономерности, причины и факторы влияния вибрации молотковых зернодробилок на эффективность процесса измельчения.

Научную новизну диссертационной работы составляют:

– новая технологическая схема молотковой дробилки, в которой изменяется подвод зерна в зону измельчения, а также основные закономерности силового взаимодействия рабочих органов с измельчаемым материалом;

– новые математические модели технологической виброактивности зернодробилок, позволяющие выяснить происхождение вибрации, оценить непроизводительные затраты энергии и другие ее негативные последствия;

– критериальный анализ технологического процесса измельчения фуражного зерна, на основе которого существенно упрощается эксперимент и дается возможность построения типоразмерного ряда конструкций данных дробилок;

– обоснование параметров процесса измельчения фуражного зерна в дробилке с оппозитной загрузкой исходного сырья.

Новизна технических решений подтверждена двумя патентами на изобретение РФ и полезную модель (№ № 2746586, 2742509, 219913).

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что теоретически и экспериментально обосновано использование оппозитной загрузки измельчаемого материала через два зеркально расположенных относительно корпуса загрузочных устройства. Это позволяет путем незначительного переоснащения существующих и проектируемых молотковых дробилок снизить их виброактивность и излучаемый шум, получить измельченный продукт требуемого размола в соответствии со стандартами качества, с одновременным уменьшением удельных энергозатрат, что в конечном итоге снизит себестоимость получаемого продукта.

Методология и методы исследования. Теоретическая часть исследований выполнена с использованием методов и методик, применяемых в теоретической механике, теории машин и механизмов, сопротивлении материалов и математическом анализе.

Экспериментальная часть выполнялась в лабораторных условиях кафедры механизации производства и переработки сельскохозяйственной продукции ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет» с использованием теории планирования эксперимента, поверенных приборов и оборудования, приобретенных за счет средств финансовой поддержки Фонда содействия инновациям по программе «Студенческий стартап», в рамках федерального проекта «Платформа университетского технологического предпринимательства» (грант №462ГССС15-L/78541).

Полученные экспериментальные результаты обрабатывались методами математической статистики с использованием инженерного математического программного обеспечения «PTC Mathcad 15.0», программы для экономико-статистических расчетов «Microsoft Excel» и других пакетов прикладных программ для ЭВМ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели, характеризующие технологическую виброактивность молотковых зернодробилок:
 - колебаний молотка дробилки и рассеяния энергии в шарнире его подвеса;
 - рассеяния энергии в грунтовой массе под фундаментом дробилки;
2. Критерии подобия, характеризующие процесс измельчения фуражного зерна в молотковой дробилке с ее оппозитной загрузкой;
3. Обоснование основных конструктивно-режимных параметров измельчения фуражного зерна в дробилке с оппозитной загрузкой, проведенное на основе методики активного планирования эксперимента.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность подтверждается высоким объемом теоретических и экспериментальных исследований; использованием современных нормативных документов, ГОСТов, поверенных приборов и оборудования; сопоставлением результатов, полученных теоретическими и экспериментальными исследованиями; совпадением полученных результатов исследований с данными других ученых по соответствующей тематике; внедрением полученных результатов в производственные сферы; выступлениями с докладами на международных конференциях и семинарах с результатами исследований; публикацией и одобрением полученных материалов в научных журналах.

Основные положения материалы и результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались в ходе проведения кафедральных и факультетских заседаний, а также получили положительную оценку на городских, Всероссийских и Международных научно-практических конференциях и конкурсах:

- XXII городской научно-практической конференции молодых ученых «Молодежь – Барнаулу», г. Барнаул 2020г.;
- XVI Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» г. Барнаул 2021г.;
- VII Региональной молодежной научной конференции «Теория и практика инновационного развития в представлениях нового поколения», г. Барнаул 2021г.;
- Всероссийском конкурсе на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений Министерства сельского хозяйства России г. Москва 2021 г.;
- XVII Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» г. Барнаул 2022 г.;
- Международной студенческой научно-практической конференции «Современные направления повышения эффективности использования транспортных систем и инженерных сооружений в АПК», г. Рязань 2022 г.;
- полуфинальном и финальном этапе VII Всероссийского инженерного конкурса (ВИК), г. Москва 2022 г.;
- I, II и III этапе на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых ВУЗов Министерства сельского хозяйства РФ, г. Москва 2022 г.;
- Всероссийском конкурсе «Молодой ученый» им. Ивана Федорова 2022 г. (технические науки) на лучшую научно-исследовательскую работу, г. Москва 2022 г.;
- VIII Всероссийском инженерном конкурсе (ВИК), г. Москва 2023 г.

Реализация результатов исследований.

Материалы теоретических и экспериментальных исследований были использованы ООО "АгроТехНовации" при изготовлении молотковых зернодробилок с оппозитной загрузкой моделей ДМОЗИЗ-200 и ДМОЗИЗ-200У, прошедших затем производственные испытания в аккредитованных испытательных лабораториях "Гранум" и "Оникс" ООО «Открытый Сертификат». На основании протоколов испытаний данная продукция сертификатом соответствия РОСС RU.НЕ06.Н11153 № 0033218 признана соответствующей

установленным требованиям, а также задекларирована как продукция, соответствующая требованиям безопасности, стандартам и регламентам, утвержденным в ЕАЭС (декларация ЕАЭС N RU Д-RU.РА06.В.68685/23).

Результаты исследований применяются при проведении лекционных и практических занятий со студентами направления подготовки «Агроинженерия» Алтайского государственного аграрного университета.

Публикации. По теме работы опубликовано 15 печатных работ, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, 1 в зарубежных научных изданиях (Scopus), получено 2 патента на изобретения РФ №№ 2746586, 2742509 и 1 патент на полезную модель № 219 913.

Структура и объем диссертации: Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 171 источник, в том числе 15 на иностранном языке и 34 приложения. Работа содержит 269 страниц, 51 рисунок, 16 таблиц.

1. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ИЗМЕЛЬЧЕНИЮ ФУРАЖНОГО ЗЕРНА МОЛОТКОВЫМИ ДРОБИЛКАМИ

1.1. Требования к процессу измельчения фуражного зерна

Создание прочной кормовой базы является важными условиями для успешного развития животноводческого сектора. Высокоэнергетические корма, такие как зерновые с концентрированным источником питательных веществ, занимают особое место в рационе животных [61, 73, 78].

Комбикорм обычно определяется как однородная смесь различных кормовых ингредиентов, предназначенная для скармливания животным определенного вида, возраста и производственной цели [53].

Основное назначение комбикормов – оптимизация рационов по энергии, протеину, макро- и микроэлементам, витаминам и другим биологически активным веществам в соответствии с нормами кормления животных.

Основным компонентом для производства комбикормов для сельскохозяйственных животных является фуражное зерно злаковых культур, из которых в основном используют ячмень и пшеницу [59, 78, 128].

Продукты кормопроизводства растительного и животного происхождения содержат питательные вещества, биологически активные минеральные вещества и воду. При расщеплении органических веществ корма высвобождается энергия, необходимая для производства мяса, молока, яиц, шерсти и перьев. Углеводы, жиры и белки являются основными питательными веществами [4].

Сырье, поставляемое на предприятия кормопроизводства и переработки, должно соответствовать требованиям к качеству, определенным действующим стандартам, техническим условиям [4, 78].

Основным источником высокоэнергетических кормов растительного происхождения и компонентом используемого в кормлении

сельскохозяйственных животных концентрированных кормов является зерно злаковых культур, содержащее высокую концентрацию легкоперевариваемых углеводов, обеспечивающих высокую питательность зерна злаковых, – от 0,95 до 1,36 корм. ед. в 1 кг, которое применяется для кормления КРС, в свиноводстве и птицеводстве.

Зерновые компоненты – основной источник обеспечения животного крахмалом, он составляет две трети зерновой массы.

Основной и важнейшей операцией в технологическом процессе приготовления комбикормов является измельчение сырья. Измельчению подвергается основная часть сырья – фуражное зерно, жмыхи и шроты, минеральное сырье.

Измельчение имеет важную роль в процессе переваривания, которое способствует увеличению поверхностной величины для действия ферментов и смешивания корма.

Необходимость применения процесса измельчения зерна обусловлена физиологией пищеварительной системы животных в связи с тем, что питательные вещества, составные части корма лучше распадаются на простые элементы, которые способствуют усвоению организмом в процессе переваривания животными, легче пережевываются, что связано с переработкой измельченного продукта желудочным соком.

Как указывает автор [158], более мелкий размер частиц корма обеспечивает оптимальное использование питательных веществ и повышает продуктивность животного за счет увеличенной площади поверхности, что улучшает контакт с пищеварительными ферментами.

В процессе измельчения зерновых компонентов образуется разделение дробимого материала на большее количество частиц, с большей площадью поверхности, подлежащей обработке пищеварительной системой, что оказывает более положительный эффект при усвоении корма, так как скорость прямо пропорциональна общей площади поверхности пищеварительной системы животных.

Использование определенной степени размола для скармливания животным способствует положительным эффектам в животноводстве. Так, согласно [4], в процессе приема корма крупный рогатый скот лишь слегка прожевывает пищу. Эффективность процесса выращивания КРС была отмечена при использовании кормосмесей средней степени размола в пределах значений от 1,0 до 1,9 мм. Для кормления скота рекомендуется средняя и большая крупность размола зерна, величиной частиц 1,5-4 мм [110].

Свиньи в большей степени заглатывают корм, не пережевывая его более тщательно, поэтому их следует кормить хорошо измельченным кормом. Из-за этой особенности корм для свиней должен характеризоваться тониной размола и не должен содержать неразмолотых зерен. Поросятам-сосунам, как правило, применяют размер частиц 0,5-0,8 мм, поросятам-отъемышам – 0,9-1,1 мм. Для свиней беконного откорма размер частиц варьирует в диапазоне 1,2-1,6 мм [80, 146].

При этом увеличение продуктивности свиней наблюдается в результате кормления переработанным сырьем тонкого размола, пределы числовых значений фракций частиц которых варьируются от 0,5 до 1,0 мм.

В процессе выращивания птиц при кормлении необходимо использовать измельченный продукт крупного размола, с дифференциацией по размеру варьирующего в пределах числовых значений от 1,8 до 2,5 мм. При сухом кормлении величина частиц варьируется до 2-3 мм.

У всех животных измельченные корма стимулируют работу слюнных желез, приводя к выделению слюны. Изменение вышеуказанных показателей может снизить продуктивность животных на 20-30% [4, 63, 146].

Выбор ингредиентов и форма рациона уточняются для улучшения потребления корма и эффективности использования питательных веществ.

В работе [158] отмечены ограничения в отношении размера частиц, поскольку очень мелкие частицы негативно влияют на здоровье кишечника из-за более частых случаев язвенной болезни желудка у свиней и дисфункции желудка у домашней птицы.

Таким образом, на продуктивность животных в значительной мере влияет гранулометрический состав измельченного продукта.

Зерно должно быть размолото в соответствии с рекомендуемым оптимальным размером частиц для корма, а также с учетом возраста животного и его вида [86, 88, 132, 146, 148].

В источнике [127] приведены требования к показателям назначения и надежности дробилок для кормов, согласно которым средневзвешенный размер частиц не должен превышать следующие значения: для КРС – не более 3,0 мм, для свиней – не более 1,0 мм, для птицы – 2,0-3,0 мм.

Размеры частиц готового к скармливанию измельченного корма для каждого вида и половозрастных групп сельскохозяйственных животных установлены и нормируются соответствующими стандартами и требованиями, а также рекомендациями зоотехнических наук [22, 26, 27, 29, 30, 32, 37, 41, 43, 44, 45, 50, 52, 54, 88, 132], которые в том числе нормируют крупность размола. Долей остатка на лабораторном ситовом анализаторе с отверстиями диаметрами 5; 3; 2; 1 мм в процентном соотношении определяется крупность комбикорма для каждого вида животных и птицы с учетом возрастных особенностей (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Крупность размола составляющих компонентов рассыпных комбикормов, характеризующаяся долей остатка на сите в процентном соотношении

Животное	Диаметр отверстий сит, мм	
	3	5
Крупный рогатый скот:		
молодые телята до 4 месяцев и 4-18-месячный молодняк	10	2
быки-производители, дойные коровы, а также крупный рогатый скот для откорма	25	5
Овцы:		

ягнята возрастной группы до 4 месяцев	5	Не допускается
молодняк возрастной группы старше четырех месяцев, а также бараны-производители и матки	12	2
Свињи:		
поросята возрастной группы 10-60 суток	0,5	Не допускается
2-4-месячные поросята	5	Не допускается
взрослые свињи для мясного и беконного откорма	5	1
Птица:		
молодая и взрослая птица, а также бройлеры	2 (не менее)	4
цыплята, гусята, индюшата и утята от 1 до 4 недель	5	Не допускается

С целью определения качественной оценки получаемого продукта зернистость массы измельченного готового продукта комбикормового производства принято рассчитывать методом отбора по крупности содержания частиц, показателям среднего размера частиц или модулю крупности, рассчитываемому в результате ситового анализа на решетном классификаторе как статистической совокупности содержания в ней количественного соотношения фракций на лабораторном ситовом анализаторе с набором сит с соответствующими параметрами отверстий: 5, 4, 3, 2, 1 мм, и сборном дне, т. е. по гранулометрическому составу.

Для этого навеску образца продукта (например, 100 г) просеивают на лабораторном ситовом анализаторе с комплектом перфорированных сит с круглыми отверстиями диаметром: 5 мм, 4 мм, 3 мм, 2 мм, 1 мм, дно. Впоследствии устанавливается модуль размола исходного материала М, и

определяется соответствие полученных в результате измельчения средневзвешенных размеров частиц дерти зоотехническим требованиям для кормления сельскохозяйственных животных [22, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 37, 41, 43, 44, 45, 50, 51, 76 52, 54, 88, 132, 144, 146].

Средневзвешенный размер частиц (модуль) измельченного продукта, именуемый как показатель модуля размола M , определяется формулой [27, 28, 85,123, 146]:

$$M = \frac{(0,5G_0 + 1,5G_1 + 2,5G_2 + 3,5G_3 + 4,5G_4 + 5,5G_5)}{100}, \quad (1.1)$$

где G_0 – средний размер измельченного зерна определенной массы на сборном дне;

G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 – средний размер измельченного зерна определенной массы на ситах с соответствующим диаметром отверстий 1, 2, 3, 4 и 5 мм.

Тонину размола определяют взвешиванием остатков на сите после просеивания образца. Остаток на сите с соответствующими диаметрами отверстий регламентируется ГОСТом [22, 26, 27, 29, 30, 32, 41, 43-45, 50, 52, 54].

В последующем отсеянный материал применяют к скармливанию животным с учетом их индивидуальных половозрастных и зоотехнических особенностей.

Тонкий размол считается при остатке менее 5% на сите диаметром ячейки 2 мм и отсутствии остатка на сите 3 мм, средний размол – при наличии остатка менее 12% на сите с диаметром 3 мм и отсутствии остатков на сите с отверстиями 5 мм, грубый размол – при менее 5% остатка на сите с диаметром 5 мм и отсутствии целых зерен [63, 87, 110].

Степень размола зерна (тонина размола), которая является важным фактором, оказываемым влияние на продуктивность животных и поедаемость кормов, условно разделена на три группы:

- тонкий (0,2...1,0 мм);
- средний (1...1,8 мм);

- грубый (1,8...2,6 мм).

В процессе изготовления комбикормов на специализированных предприятиях агропромышленного сектора дифференцируют три группы зернистости размеров частиц измельченного зернового корма. Частицы в диапазоне размеров 0,55-0,6 мм определяются как первая группа в модуле размола, частицы в диапазоне 0,8-1,0 мм относятся ко второй группе, а частицы в диапазоне 1,4-1,7 мм – к третьей группе.

Чрезмерное измельчение зерновых компонентов и наличие очень мелкой (пылевидной) фракции в корме могут увеличить энергетическую плотность измельчения, повлиять на процесс приготовления корма и негативно отразиться на условиях труда работников животноводства, отрицательно повлиять на продуктивность и здоровье животных и способствовать увеличению падежа.

В совокупности данные показатели обуславливают эффективность работы измельчителей, а также энергоемкость процессов.

Данные факторы устанавливают обязательность зоотехнических требований для всех видов кормов, находящихся в прямой зависимости от особенностей животных.

Показателем, отражающим качественные характеристики корма, является выравненность параметров частиц гранулометрического структурного состава продуктов измельчения определенных размеров, которая может иметь существенные различия в процессе переработки и влиять на однородность измельчения готовой продукции по модулю размола.

Минимальная крупность и выравненность частиц гранулометрического состава различных фракций, входящих в конечную продукцию, обеспечивают лучшую потребительскую способность и оказывают благоприятный эффект, что отражается в зоотехнических требованиях к продукции.

При помоле зерна в комбикормовой промышленности необходимо различать физико-механические показатели, включающие геометрические размеры зерна, размер, расположение, форму и характеристики поверхности, а также технические показатели, такие как влажность, объем, текучесть,

способность к самосортировке, угол естественного откоса, коэффициент внутреннего и внешнего трения, перфорация, плотность и твердость.

Результаты измельчения характеризуются следующими показателями:

1. Показатели, характеризующие размерные характеристики продукта:
 - средний размер частиц измельчаемых продуктов (коэффициент тонкости);
 - общая площадь поверхности на единицу массы измельченного продукта;
 - величина уменьшения размера (степень измельчения).
2. Показатель, характеризующий качество процесса дробления:
 - зернистость состава;
 - доля частиц в измельченном продукте по заданному классу.
3. Показатель энергоемкости процесса:
 - энергопотребление на единицу вновь образованной поверхности;
 - потребление энергии на тонну сырья.
4. Показатель, характеризующий производительность операций:
 - производительность дробилки, единица массы в час.

1.2. Анализ способов измельчения фуражного зерна

Способы измельчения в производственном процессе могут быть классифицированы по процедуре воздействия элементов внешней среды на разделяемую поверхность. Среди них выделяют следующие: раскалывание, раздавливание, резание, свободный удар, разламывание, истирание, распиливание, стесненный удар и др., которые приведены на рисунке 1.1, что достаточно освещено в научной и практической литературе [63, 123, 132].

Эффективность процесса измельчения и качество получаемой продукции во многом зависят от способа измельчения. Наличие физических и механических свойств перерабатываемого материала, а также требования к параметрам готовой

продукции определяют предпочтение установления способа измельчения материала.

Рисунок 1.1 б отображает процесс раскалывания. Измельчение стесненным и свободным ударом представлено на рисунке 1.1 «ж» и «з», используются в большинстве случаев в целях получения продукции тонкого размола [63].

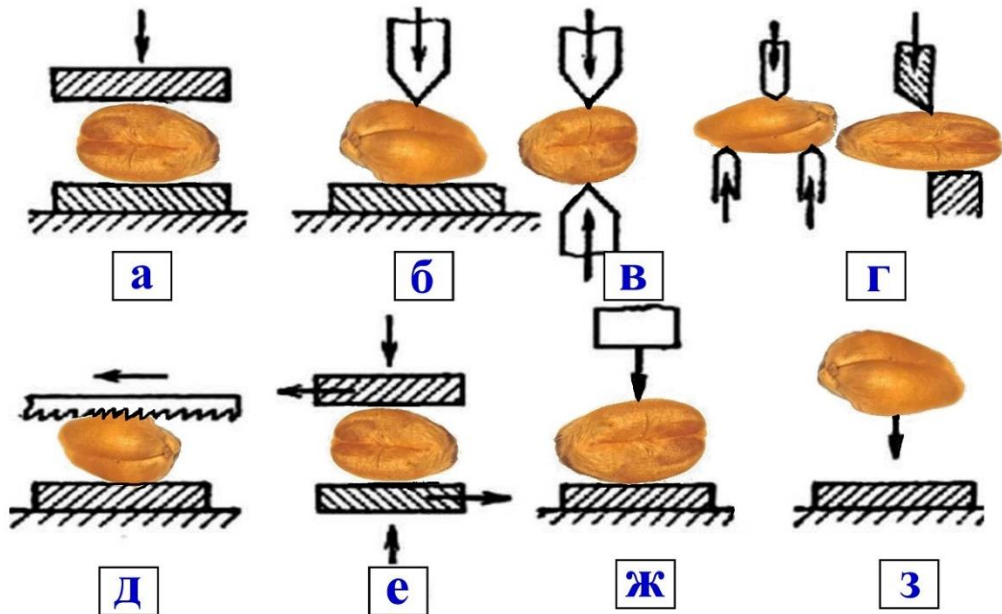


Рисунок 1.1 – Виды дробления зерна:

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

Биологическая специфика структуры зерновки фуражного зерна рассматривается многими авторами как сложная комплексная прочностная конструкция с двумя структурными элементами: каркасом (скелетом), обладающим упругостью и пластичностью, и наполнителем, имеющим вязкие свойства. Прочность этой конструкции зависит от многих факторов, включая структуру оболочек и эндоспермов, целостность всех компонентов конструкции.

Основными факторами, определяющими качество зерновых компонентов семейства злаковых, являются текстура эндосперма (твердость зерна), содержание белка и крепость клейковины. При этом структура эндосперма зерна – единственная наиболее важная и определяющая характеристика качества,

поскольку влияет на качество размола получаемого продукта и конечное использование в кормопроизводстве [162].

Процесс измельчения зерна фуражного назначения, в силу наличия данных характерных качеств, проходит чаще всего ударом, а также в незначительной степени другими способами разрушения.

Физические характеристики фуражного зерна способствуют получению искомого результата за счет многократного ударного воздействия вращающихся на больших скоростях молотков о продукт переработки, последующего удара о деку в результате передаваемого молотками движению частиц, и ударно-истирающего действия о подвижные элементы и взаимодействия частиц между собой.

С. В. Мельников в своих трудах обосновал эффективность дробления зерна ударного воздействия с использованием молотковых дробилок. Как отмечается исследователями, стоимость ударных дробилок, основанных на принципе свободного ударного воздействия, примерно в два раза меньше, чем у валковых дробилок, основанных на измельчении принципом раздавливания, при этом мощность электродвигателя может быть в три раза ниже [67].

В связи с этим технологическое оборудование для переработки зерна посредством его измельчения за счет ударного воздействия имеет практически одинаковую специфику. Предпочтения производителей животноводческой отрасли преимущественно определяются в пользу дробилок ударного типа, принцип работы которых основан на разрушении зернового материала с помощью силы сжатия и сдвига методом стесненного или свободного удара, к которым относятся молотковые дробилки.

При этом на предприятиях зерноперерабатывающего направления, осуществляющих переработку зерна в комбикорма, среди измельчителей пользуются спросом дробилки зерновых компонентов с горизонтальной осью вращения ротора, которым отдают предпочтения за счет эксплуатационных качеств и определенных преимуществ.

1.3. Основные законы измельчения

Изучение энергетической зависимости при измельчении зерна направлено на определение количественных характеристик, описывающих последовательность операций, происходящих в процессе взаимодействия рабочих элементов машин с зерновым материалом. Это включает затраты физических усилий, удельный расход энергии и результаты в качественных показателях.

Физические свойства и состояние обрабатываемого материала изменяются под воздействием рабочих элементов машин и могут проявляться в изменении формы и размера исходного материала.

Изменения данного характера связаны с физико-механическими свойствами зернового состава, основным элементом из структуры которых являются прочностные характеристики.

Как отмечено автором [159], молекулярно-генетическая основа твердости зерновых компонентов зависит от пуриноидиновых белков А и В, которые формируют молекулярную основу твердости или текстуры зерна, при этом когда оба пуриноидина находятся в их "функциональном" диком состоянии, текстура зерна мягкая. Когда любой из пуриноидинов отсутствует или изменен мутацией, в результате получается твердая текстура. В случае твердой пшеницы, в которой отсутствуют пуриноидины, текстура очень твердая. Пуриноидины представляют собой молекулярно-генетическую основу локуса твердости на хромосоме 5DS и аллелей мягкости (H_a) и твердости (h_a), присутствующих у гексаплоидных сортов хлебной пшеницы.

При производстве кормов, используя процесс измельчения, важными факторами являются физико-механические показатели зерновых компонентов, такие как его размер, форма, структурный состав и прочностные характеристики. Зерно неоднородно по своей структуре, которая включает в себя оболочку, эндосперм и зародыш. Анатомические части зерна могут обладать различными физико-механическими свойствами в зависимости от выращивания, сорта,

условий и других факторов. Оболочка имеет высокую твердость и склонна к разрушению при сжатии, тогда как эндосперм имеет более вязкую структуру, более хрупок и подвержен раздавливанию [150].

Напряжение, необходимое для разрушения внешней оболочки зерна, зависит от его размера и влажности, варьируется в диапазоне от 9,5 до 31,5 Мпа. Однако для разрушения внутреннего эндосперма зерна требуется гораздо меньшее напряжение – от 1.7 до 3.3 Мпа [88]. Удельный расход энергии при размоле зерна зависит от многих факторов, таких как форма зерна, его влажность, ориентация в горизонтальной и вертикальной плоскости при соударении, наличие микротрещин и консистенция эндосперма, а также пленчатость [167]. Стекловидный эндосперм из-за наличия крупных клеток с тонкими оболочками обладает большей прочностью, чем зерна с полустекловидными или мучнистым. Более высокой прочностью обладают зерна, имеющие круглую форму, по сравнению с выраженной ребристостью на поверхности.

Основные физико-механические характеристики зерновых культур семейства мятликовых (злаковых) приведены в таблице 1.2

Таблица 1.2 – Физико-механические свойства зерновых культур [64, 150]

Параметр	Культура			
	пшеница	рожь	овес	ячмень
Длина, мм	4,8-8,0	5,0-10,0	8,0-18,6	7,0-14,6
Ширина, мм	1,6-4,8	1,4-3,6	1,4-4,0	2,0-5,0
Толщина, мм	1,5-3,3	1,2-3,5	1,0-4,0	1,2-4,5
Плотность, г/см ³	1,2-1,5	1,2-1,5	1,2-1,4	1,2-1,4
Масса 1000 зерен, г	20-40	13-32	20-42	31-51
Натура, кг/л	0,76	0,73	0,45	0,65
Коэффициент внутреннего трения	0,47	0,49	0,51	0,51
Коэффициент трения по стали	0,37	0,37	0,37	0,37

Скорость удара начала разрушения зерна, м/с	43	45	56	70
Скорость удара полного разрушения зерна, м/с	115	92	105	130

Процесс измельчения способствует формированию новых форм мелких частиц переработанного зерна с более высокой концентрацией вновь образованных мелких фракций и сформировавшихся высокоразвитых поверхностей. Таким образом, измельчение можно рассматривать как способ образования и количественного приращения образованных поверхностей. Показатель дисперсности и развития поверхности измельченных частиц – удельная площадь поверхности, которая является количественной характеристикой.

Теорией измельчения, применимой к процессам, происходящим при измельчении зерновых компонентов, определяют такие значения, как [67, 123]:

- удельная площадь поверхности, отнесенная к его объему, как отношение площади поверхности образца к его объему:

$$S_{y.o} = 6/d, \text{ м}^{-1}; \quad (1.2)$$

- массовая удельная площадь, как площадь поверхности материала, отнесенная к его массе:

$$S_{y.o} = 6/pd, \text{ м}^2/\text{кг}, \quad (1.3)$$

где d – средний размер частиц, м;

p – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Степенью (дисперсности) измельчения возможно количественно оценить и глубину процесса диспергирования, воздействующую на энергетические затраты, а также оценить количественно, используя отношение удельной площади поверхности частиц конечного продукта $S_{y.o}$, к удельной площади поверхности кусков исходного материала S . Это выражается формулой:

$$\lambda_s = S_{o.e} / S. \quad (1.4)$$

Также степень измельчения материала λ может быть выражена как отношение среднего размера кусков исходного материала D к среднему размеру частиц продукта измельчения d [123, 150]:

$$\lambda_s = D/d. \quad (1.5)$$

Размер зерновых продуктов может быть охарактеризован величиной эквивалентного диаметра $D_э$, который учитывает структурное разнообразие продуктов и неоднобразные формы поверхности зерновых компонентов. Для определения эквивалентного диаметра зерен целесообразно использовать диаметр сферы, которая имеет объем, равный объему зерна.

При условии, если объем зерна соответствует значению v_c , то объем сферы с равным диаметром соответствует $\pi D^3 v_c / 6$, значения для определения эквивалентного диаметра зерна выглядит следующим образом:

$$D_э = \sqrt[3]{\frac{6v_з}{\pi}} = 1,24 \sqrt[3]{v_з}. \quad (1.6)$$

Согласно данной формуле, удельная площадь первичной поверхности зерновки S_H перед процессом измельчения будет определяться выражением $6 / (\pi D_э)$.

В процессе определения степени измельчения необходимо учитывать биологические особенности и свойства различных видов измельчаемого материала.

В целях установления параметров работы, затраченной на измельчение, предложены две основные концепции, используемые для описания процесса измельчения материалов – теория объемного и поверхностного измельчения. Согласно поверхностной теории, сформулированной П. Риттингером, при деформации тела происходят два типа деформаций: упругая, которая не приводит к изменению формы и размеров тела, и пластическая, при которой изменяются форма и размеры тела. Для определения работы A_R , затраченной на упругую деформацию характеризующуюся работой, равной изменению потенциальной энергии деформации тела, и пластическую деформации тела связанной с работой, затрачиваемой на преодоление сил трения и пластической деформации материала

переходящую в тепловую энергию, а также приращение поверхности измельчаемого тела, что прямо пропорционально площади вновь образованной поверхности ΔS , предложена формула:

$$A_R = f(\Delta S). \quad (1.7)$$

Эта формула позволяет определить, какую часть работы затрачивают на изменение формы и размеров материала, а какую - на пластическую деформацию. Чем больше изменение площади материала, тем больше работа затрачивается на пластическую деформацию и меньше - на упругую.

Суть ее заключается в том, что число полученных частиц при измельчении подсчитывается посредством деления тела кубической формы с ребром C (рисунок 1.2) до частиц-кубиков с меньшими размерами ребра c рассчитывается по выражению [67]:

$$N = C^3 / c^3 = \lambda^3. \quad (1.8)$$

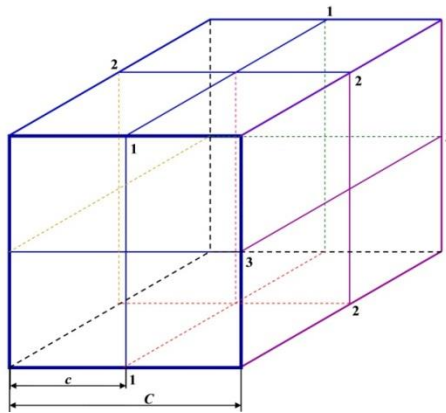


Рисунок 1.2 – Иллюстрация к определению вновь образованной поверхности при измельчении тела кубической формы:

1, 2, 3 – плоскости сечения куба

Тогда площадь вновь образованной поверхности составляет:

$$\Delta S = 6c^2 N_q - 6C^2 = 6C^2(\lambda - 1). \quad (1.9)$$

Полная работа, затраченная на процесс измельчения (по П. Риттингеру), с учетом работы расходуемой на образование единицы площади новой поверхности

A_R , рассчитывается по выражению.

$$A_R = A_0 \Delta S = 6A_0 C^2 (\lambda - 1). \quad (1.10)$$

Таким образом, поверхностный подход применим для оценки процесса тонкого измельчения в случае, когда продукт имеет высокоразвитую площадь поверхности. Однако при расчете энергии, затрачиваемой на измельчение кусковых материалов большого размера, эта теория дает большие погрешности, в связи с чем не применяется. Для приближения расчетов к истинным значениям при измельчении кусковых материалов большого размера русский ученый-механик В.Л. Кирпичев разработал объемную теорию, которая была проверена немецким ученым Ф. Киксом и показала свою эффективность на предмет применения в процессе измельчения минералов.

Указанная теория отражает, что затраты энергии A_K на измельчение поверхности прямо пропорциональны его первоначальному объему деформированной части тела ΔV :

$$A_K = f(\Delta V). \quad (1.11)$$

Так как деформированная часть объема тела ΔV пропорциональна первоначальному его объему V , соответственно работа записывается

$$A_K = K_b m, \quad (1.12)$$

где K_b – коэффициент пропорциональности;

m – масса разрушаемого куска, кг.

Однако обе теории не учитывают затрат энергии на деформирование тел и образование новых поверхностей, поэтому Ф. Бонд была разработана примирительная теория, где работа, затраченная на измельчение, пропорциональна усредненному значению объема и площади поверхности.

Изучив эти теории, мы можем заключить, что они описывают лишь отдельные аспекты процесса измельчения, не принимая во внимание конкретные факторы, влияющие на его энергоёмкость, такие как дисперсность материалов.

Академик П. А. Ребиндер, приняв во внимание недостатки поверхностно-объемной теории, изучив конструкции и режимы работы измельчителей, разработал методику оценки затраченной работы на измельчение с помощью

следующего выражения:

$$A = f(\Delta V) + f_i(\Delta S), \quad (1.13)$$

где ΔV – объем деформированной части тела;

ΔS – приращение удельной площади поверхности измельченного материала.

Уравнение (1.13) в развернутом виде можно записать так:

$$A = A_v + A_s = K\Delta V + \sigma\alpha\Delta S, \quad (1.14)$$

где A_v – работа, затрачиваемая на деформации в деформированной части тела;

A_s – работа, затрачиваемая на образование новых поверхностей;

K – коэффициент пропорциональности;

σ – коэффициент пропорциональности, учитывающий энергию поверхностного натяжения твердого тела.

Если принять первую составляющую (работу упругих деформаций) за полезную работу, а вторую (работу перенапряжения) – за бесполезную, то эффективность измельчения будет зависеть от прочности материала и, соответственно, от работы упругих деформаций. Чем меньше прочность, тем меньше работа деформаций и тем выше эффективность измельчения.

Вышеуказанные уравнения могут помочь только для изучения рабочих процессов и определения относительных значений энергии, необходимой для измельчения материалов.

Профессор С. В. Мельников разработал рабочую эмпирическую модель для определения энергозатрат на процесс измельчения, на основе теории профессора П. А. Ребиндера, имеющую вид:

$$A_{и} = c[c_v \lg \lambda^3 + c_s(\lambda - 1)], \quad (1.15)$$

где c – коэффициент, который учитывает влияние различных факторов, таких как свойства материала, методы измельчения и конструктивные особенности измельчителей;

c_v – коэффициент, выражающий удельную работу упругих деформаций материала при измельчении, Дж/кг;

c_s – коэффициент удельной работы образования новых поверхностей, Дж/кг;

λ – степень измельчения.

Оценивая теоретические подходы к процессу измельчения с точки зрения практического применения, стоит отметить, что существующие формулы для расчета энергозатрат не содержат информации о свойствах материалов и параметрах рабочих органов.

Например, в широко применяемой модели образования новых поверхностей предполагается, что для непрерывного процесса измельчения площадь рабочего пространства дробилки должна быть равной величине $2c^2$ при $\lambda=2$, при $\lambda=3$ - $3c^2$ и так далее $\lambda \cdot c^2$ для последующих участков [67]. Это приводит к высокой потребляемой мощности роторных дробилок, а также к неизбежному переизмельчению материала.

По объединенной теории измельчения энергия γ , необходимая для разрушения структуры скелета зернового материала, может быть определена следующим образом:

$$\gamma = GK^2 \rho \ln \frac{\left(\frac{D_{cp}}{2K}\right)}{4} \pi (1-\mu), \quad (1.16)$$

где G – модуль сдвига;

μ – коэффициент Пуассона;

K – коэффициент смещения;

ρ – плотность зернового материала;

D_{cp} – средневзвешенный размер частиц размола.

Важно подчеркнуть, что коэффициент Пуассона μ (ν), модуль продольной упругости E , модуль сдвига G для материалов с кристаллической решеткой являются постоянными величинами, которые подчиняются закону Гука. Однако использование этих коэффициентов для описания материалов растительного происхождения с наличием упруго-вязких свойств требует дополнительного обоснования и более детального изучения.

Для разрушения зерен твердых сортов зерен пшеницы методом скалывания необходимо приложить напряжение в диапазоне от 0,95 до 1,1 МПа, а для мягких сортов – 0,28-0,32 мПа, что указывает на значительные затраты энергии на

пластические деформации, которые находятся в диапазоне 1,9-4 кДж/кг.

Зерновые культуры обладают упруго-пластическими свойствами, и соотношение этих составляющих может зависеть от химического состава и структуры зерновок от 10 до 35 % (от 90 до 65 %) в зависимости от сорта [67]. Таким образом, основная часть энергии расходуется на пластическую деформацию, а не на упругую.

Ударное измельчение материалов растительного происхождения сопровождается множеством технологических процессов земледельческой механики. Процесс измельчения в молотковой зернодробилке основан на ударной нагрузке на ядра зерна.

Во время этих процессов накапливается энергия упругих деформаций, которая после снятия напряжений приводит к упругому расширению, что является характерным явлением для всех ударных измельчителей, рабочими органами которых являются молотки. Однако повторное деформационное воздействие при соударении приводит к перерасходу энергоресурсов.

Рассмотрим сам процесс измельчения зерновых культур с применением графического и аналитического анализа энергозатрат, предложенного В. П. Горячкиным (см. рисунок 1.3), которым в ходе проведения многочисленных исследований в области измельчения получены научные результаты в условиях ударного сжатия зерна.

Рассматривая графическое изображение, представленное на рисунке 1.3, чтобы лучше понять процесс работы молотковых дробилок, можно уточнить следующее: первая область характеризуется расходом кинетической энергии молотка на деформацию зерен при $V_3=0$. Доля энергии, затраченной на деформацию, уменьшается по мере смещения от $V_3=0$ в правую часть, и в точке характеризующей $V_3/V_M = 1$, становится равной нулевым значениям.

Для области $V_3/V_M = 0,75-0,85$ характерна работа молотковых измельчителей в определенном кинематическом и силовом режиме.

Так как скорость частиц может быть разрушительной после столкновения с молотком, полезной энергией деформации может быть и энергия, переданная

частицам и отраженная в области 2 графического изображения.

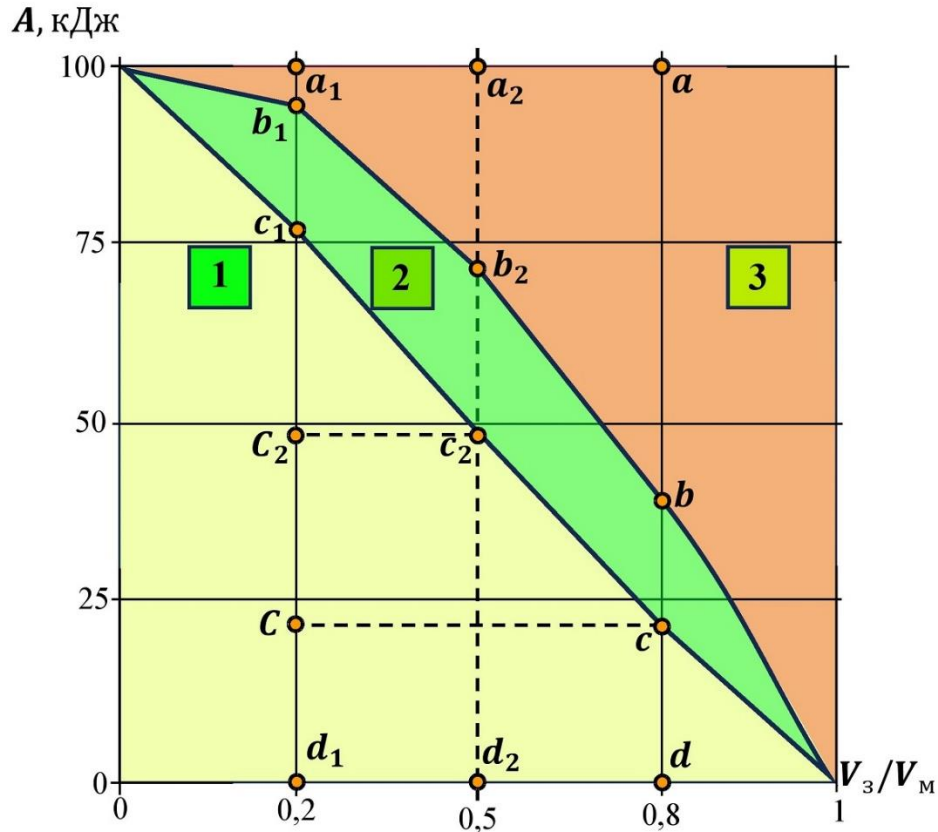


Рисунок 1.3 – Графическое изображение энергоёмкости процесса измельчения зерна в условиях ударного сжатия:

A – полная кинетическая энергия молотка; 1 – область полезной энергии; 2 – энергия частиц; 3 – энергия холостого хода; a b – ордината холостого хода; b c – ордината энергии частиц; c d – ордината полезной энергии (деформации); V_3 – скорость частиц; V_m – скорость молотка

Коэффициент эффективности процесса для полезной энергии деформации может оцениваться отношением полезной энергии деформации к затрачиваемой энергии по отношению

$$K_3 = b \cdot d / a \cdot d. \quad (1.17)$$

Анализируя графическое изображение, представленное на рисунке 1.3, можно утверждать, что завершающим этапом преодоления упругой деформации является диапазон в сечении a_1 - d_1 , который может быть осуществлен рабочими

органами молотковой дробилки, а преодоление пластической деформации технически можно выполнить молотками со значительно меньшей рабочей скоростью $V_p < (0,4 - 0,6)V_M$ в сечении $a-d_3$, которая приведет к окончательному измельчению зерновки, за счет реализации эффекта П. А. Ребиндера, характеризующийся снижением прочностных свойств при циклических нагружениях тел, имеющих определенные макродефекты.

Из вышеприведенного следует, что молотковые дробилки – это наиболее эффективные измельчители кормов, которые способны при минимальных энергетических затратах увеличивать новые поверхности зерен и образовывать множество частиц с развитыми поверхностями требуемой величины.

Исследования и разработки оригинальных технологий, а также предложенные аналитические модели для определения баланса энергии и соотношений поверхностей рабочих органов позволяют находить новые решения для энергосбережения и улучшения качества продукции.

1.4. Классификация молотковых дробилок с горизонтальным расположением ротора

Основным оборудованием в сельском хозяйстве для измельчения зерновых компонентов и кускового сырья при производстве кормов являются молотковые дробилки, которые чаще всего используются, поскольку обеспечивают высокую производительность, просты в эксплуатации и подходят для измельчения практически любых продуктов [6, 13, 16, 66, 71, 75, 95, 113, 115, 150, 155, 157, 169].

Характерные положительные качества, присущие молотковым дробилкам, заключаются в простой конструкции, простоте обслуживания и надежности, которые способствуют наличию спроса не только у отечественных производителей отрасли животноводства и использования в широком спектре аграрного производства комбикормов, но и за рубежом [108, 160, 163, 165, 170].

Ударные измельчители молоткового типа являются надежными и эффективными инструментами для измельчения зерна и других материалов. Они обладают рядом отличительных признаков, таких как равномерное измельчение, простота разборки и сборки, возможность изменения степени измельчения понижением напряжения, простота управления технологическим процессом дробления и проведения ремонтных работ без привлечения специалистов в силу несложности структуры. Компактные размеры и возможность замены рабочих органов и элементов делают эти измельчители удобными в использовании и позволяют работать с широким спектром материалов переработки [71, 100].

По конструкции и принципу действия усилий для разрушения структуры материалов молотковые дробилки являются измельчителями ударного действия.

Молотковые дробилки являются эффективным инструментом для измельчения всех видов сыпучих материалов, которые необходимы для производства комбикормов. Благодаря свободному удару происходит разрушение зерновых оболочек и незначительное нагревание измельченного продукта.

Дробление материала ударным разрушением в молотковой дробилке обеспечивает более высокую эффективность по сравнению с дробилками, работающими на других методах разрушения, таких как раздавливание в щековых или конусных. Степень дробления ударным воздействием может достигать 20-30 раз, что значительно выше, чем у других измельчителей. При этом экономичность использования энергии для дробления также выше благодаря ударному разрушению. Компактность и высокая производительность, приходящаяся на единицу массы, являются отличительными особенностями молотковой зернодробилки.

По конструктивным и технико-технологическим особенностям молотковые дробилки группируют по принципу работы, конструктивным и аэродинамическим особенностям, размещению места загрузки, по принципу работы и технологической схеме, расположению загрузочной горловины с радиальной подачей продукта и с осевой подачей продукта, по способу подачи измельчаемого материала в дробильную камеру с принудительной подачей и самотеком, по

креплению рабочих органов к ротору жестким (неподвижно) либо шарнирным, по особенностям степени измельчения зерна и отвода измельчения готового материала из дробильной камеры, на решетчатые, универсальные и безрешетчатые (с рециркуляцией и без рециркуляции), и другим параметрам, а также по возможности реализации изменения направления вращения двигателя (наличию возможности реверса).

Молотковые дробилки, применяемые в комбикормовой промышленности и сельском хозяйстве, существенно различаются между собой по принципу работы и технологической схеме. Их принято классифицировать по следующим конструктивным признакам, согласно схеме, представленной на рисунке 1.4.

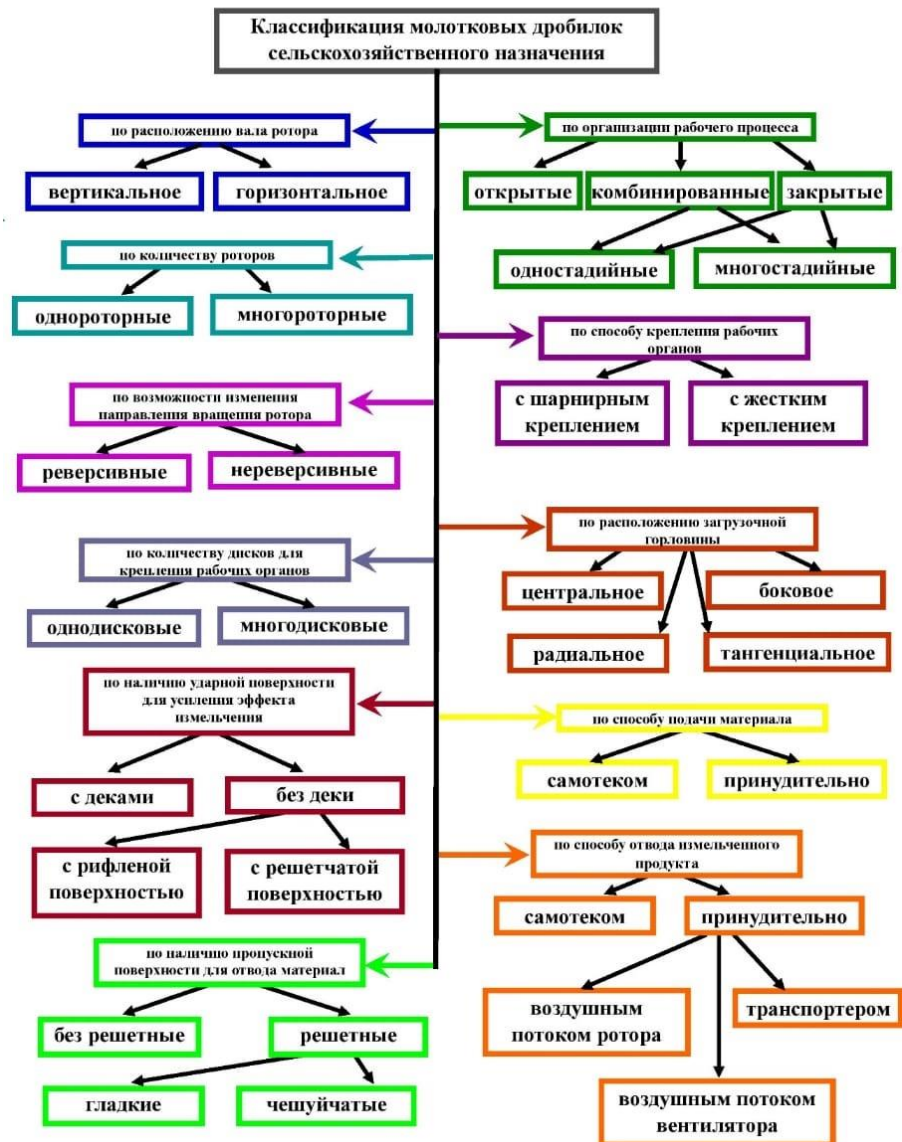


Рисунок 1.4–Классификация молотковых дробилок

Существенным весомым отличием молотковых дробилок по конструктивным и технико-технологическим особенностям, исходя из широкого спектра конструкций, является ориентация основного элемента вращения системы органов. Это два основных вида расположения вала ротора, которые подразделяются на горизонтальное и вертикальное вращение в плоскости.

В дробилках горизонтального типа ротор вращается в горизонтальной плоскости, основными рабочими органами, осуществляющими процесс разрушения материала, являются ротор с молотками, решета и деки.

В процессе работы молотковой дробилки используется метод разрушения материала, основанный на свободном ударе, который реализуется различными конструктивными решениями, представленными на рисунке 1.5 [89, 150].

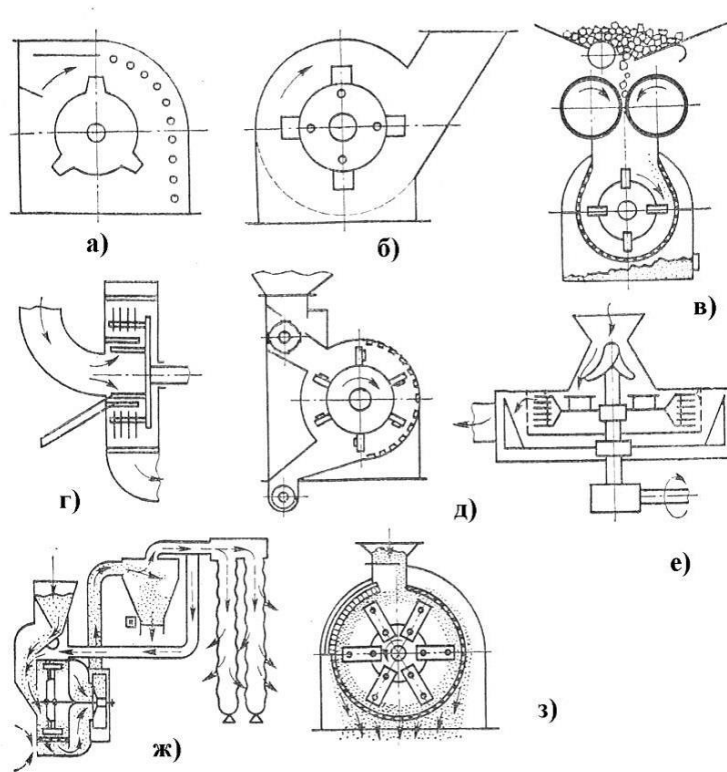


Рисунок 1.5 – Конструктивно-технологические схемы молотковых дробилок [89, 150]:

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

Молотковые роторные дробильные машины разделяют на три основных вида:

– открытого типа – в таком устройстве материал не проходит весь цикл при своем перемещении в дробильной камере и сразу покидает камеру, не замыкая окружность при движении. При этом материал не подвергается полной переработке, а только частично измельчается за счет ударов рабочих органов, расположенных по траектории движения. Особенностью является отсутствие колосниковой решетки;

– закрытого типа – в рабочей камере дробления находятся решето и деки, охватывающие всю поверхность. Материал, поступающий на измельчение, циркулирует в рабочей области, совершая многократное круговое движение до требуемого размера гранулометрического состава, в зависимости от установленных перфорированных сит, который располагается в виде рыхлой субстанции твердых частиц, составляющих основу продуктово-воздушного слоя;

– комбинированного типа – поступающий материал совершает круговое движение в рабочем пространстве, аналогичны дробилкам закрытого типа, однако материал выгружается через отверстия решета и частично через выпускное отверстие, оборудованное специальным устройством – шибером.

Большое распространение получили дробилки закрытого типа, так как замкнутый воздушный поток способствует движению материала в дробильной камере, постепенному измельчению до необходимых размеров и эвакуации измельченного материала через зарешетное пространство отверстий решета на выгрузку.

В двухстадийных ступенчатых дробилках расположены два и более ротора, где материал сначала подвергается предварительному измельчению, затем измельчается окончательно последовательной ступенью дробления. В дробилках с жестким креплением рабочих органов молотки неподвижно закреплены к ротору. В дробилках горизонтального типа ротор вращается в горизонтальной плоскости.

К рабочим органам молотковых зернодробилок сельскохозяйственного назначения относятся молотки, ротор, диски ротора, деки, металлические перфорированные решета, которые способствуют непрерывности технологического процесса измельчения материала. Для повышения эффективности и обеспечения условий протекания процессов дробления измельчители данного характера оборудуются вспомогательными механизмами и элементами: вентиляторы, циклоны, фильтры, системы трубопроводов и выгрузные транспортеры, питающее устройства, бункеры с дозирующими устройствами.

Механическое разрушение материалов в молотковых дробилках реализуется определенным сочетанием способов: свободный удар молотков о зерновой материал, удар зерна о неподвижную деку, дробление материала через отверстие решета.

Основными техническими факторами, оказывающими непосредственное влияние на степень измельчения материала, являются окружная скорость движения, развиваемая концами молотков, зазор между ротором и декой, размеры отверстий сита. Скорость, развиваемая концами молотков при вращении, или окружная скорость молотков, рассчитывается исходя из закона количества движения, находящаяся в прямой зависимости от радиуса точки удара и угловой скорости.

Одним из важнейших параметров молотковых дробилок, оказывающих решающее влияние на процесс измельчения, является окружная скорость молотков ротора. Для интенсификации процесса измельчения в молотковых дробилках стремятся приблизить значение окружной скорости к критической, при которой начинается интенсивное разрушение материала во время ударного взаимодействия его с молотками или с декой дробилки [16].

Кроме того, существенными отличиями молотковых дробилок друг от друга являются размер ротора, конструкция рабочих органов, размер и толщина ударных элементов, величина радиального зазора между молотками и поверхностью перфорированного решета, тип механизма, питающего и

отводящего готовый продукт, наличие деки, очиститель, вентилятор и другие технические параметры.

Значительная часть выпускаемых молотковых дробилок отечественных производителей относится к дробилкам с горизонтальным расположением ротора. На процесс дробления материалов с помощью молотковых дробилок горизонтального типа влияют такие факторы, как плотность измельчаемых материалов и их механические характеристики, схемы загрузки и выгрузки материалов из рабочей камеры, концентрация и масса циркулирующей смеси, толщина продуктово-воздушного слоя в рабочей камере дробилки, а также окружная скорость вращения ударных элементов, которая включает в себя совокупность сумм разрушающей скорости и скорости циркулирующего слоя.

Для обеспечения интенсификации протекания рабочего процесса в некоторых конструкциях измельчителей молоткового типа используется вентилятор, создающий поток воздуха, способствующий перемещению продукта размола. Однако такие дробилки имеют свои недостатки, включая преобладание пылеобразной фракции в размоле, сложность регулировки степени измельчения во время технологического процесса и наличие высоких нагрузок при запуске двигателя.

Рынок измельчителей в настоящее время достаточно насыщен множеством молотковых дробилок, производимых как отечественными, так и зарубежными компаниями. Ассортимент представлен для использования как в личных подсобных хозяйствах, так и на крупных комбикормовых заводах, в связи с чем их мощность может варьироваться в пределах 0,2-400 кВт.

Молотковые дробилки низкой производительности характеризуются питанием от однофазной электросети переменного тока либо производящее измельчение за счет механической работы двигателя внутреннего сгорания. Измельчители малой мощности в основном пользуются спросом и фактически предназначаются для ферм и личных подсобных хозяйств, решая проблему кормления домашних животных. Производство таких дробилок осуществляют, как

правило, субъекты малого и среднего предпринимательства. В таблице 1.3 приведены основные характеристики маломощных молотковых дробилок.

Таблица 1.3 – Характеристики дробилок зерна малой производительности [10, 150]

Модель дробилки	Показатель			
	производительность, кг/ч	мощность привода, кВт	масса, кг	габариты: длина, ширина, высота, мм
Molot-200 ООО "ТД ИНФЕЛ"	200	1,1	30	400, 550, 1000
ДМ-200 ООО "ДиПиПром"	200	1,5	45	600, 400, 1200
ДЗТ-1	40-100	1,6	45	620, 450, 980
МКД-Ф-1	60-100	0,6	26,8	435, 280, 475
ЭЗД-Т-1	40-60	0,45-0,5	23	470, 300, 740
«Таврия»	70-130	0,9-1,0	50	575, 560, 1125
МДМ 200/400	200	1,1	30	600, 400, 1400
9FG-360A	150	4	130	1400, 550, 1050
LG-2	60	2,2	65	600, 400, 800
Molino "MAGNUM 4V	250	0,75	12	520, 440, 720

У крупных животноводческих предприятий и комбикормовых заводов, где требуется проводить обширный объем работы, пользуются спросом дробилки средней и высокой производительности, с электродвигателем больших мощностей, питание которых осуществляется от трехфазной сети переменного тока. Ассортимент представлен в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Характеристики дробилок зерна средней и высокой производительности [10, 150]

Модель дробилки	Показатель			
	производительность, т/ч	мощность привода, кВт	масса, кг	габариты: длина, ширина, высота, мм
ВД-1	0,8-1	5,5	136	880,470,330
Р1-БДК 10 М	8-10	91,5	1400	1800, 1500, 3200
ДКР 4	3,8	22	520	1230, 730, 1130
УЗ-ДБМ	8,8-10,2	90	2000	2355, 1100, 1195
ДМВ-10	15	110	1990	1650, 1642, 1980
ДМРТ-1210	-	355	5750	3235, 1934, 2694
ММ180/160-160	40	160	3650	2430, 1300, 1926
КД-2-01	3	22	730	1850, 1700, 2800
1400 GD	100	405	11500	3570, 3000, 2575
DFZK-2	70	110	4000	2995, 1490, 3700
SFSP132x10 2A/C	65	355	-	-
MULTIMILL 1400	-	355	2850	2879, 1365, 1120
GHM	60	400	-	-
Type 1250	60	355	-	-
Petkus 1300/800	20	200	-	-
ДБ-5	1,8	30	1140	10125, 3210, 4350
ДМБ-10	8-12	76,5	1200	2320, 1060, 1400

Из рассмотрения приведенного краткого обзора наиболее распространенных измельчителей для кормоприготовления становится

очевидным, что при переработке зернового сырья наиболее широкое применение получили молотковые дробилки, имеющие широкий ассортимент, отличительными особенностями которых являются меньшие по величине энергозатраты на процесс измельчения по сравнению с другими измельчителями с получением заданного фракционного состава продукта размола.

Основные параметры, влияющие на эффективность и качество измельчения зерновых составляющих, это скорость рабочего органа (ротора) с ударными элементами, геометрические параметры ударного элемента. Поэтому для достижения различных степеней измельчения продуктов необходимо иметь возможность варьировать величиной линейной скорости, либо увеличивать диаметр ротора или длину молотков.

Создание новых и модернизация существующих моделей дробильных машин является все более актуальной и важной задачей по мере ежегодного повышения цен на сырье для производства кормов. Замена их более совершенными моделями способствует улучшению качественных показателей измельчения и обеспечению животных высококачественным кормом.

1.5. Анализ работы молотковых дробилок с горизонтальным расположением ротора и их недостатки

В сельскохозяйственной отрасли при производстве кормов основными измельчителями зерновых культур были и остаются дробилки молоткового типа, работающие по принципу многократного ударно-истирающего воздействия рабочих органов на материал [6, 71].

Для процесса, протекающего в дробилках с горизонтальным расположением ротора, характерен ряд вредоносных и опасных факторов, к которым относится повышенный уровень шума и вибрации, в особенности в момент совершения технологической операции.

Как указано в работе авторов [141], в процессе широких производственных испытаний дробилок конструкции Алтайского ГАУ было отмечено, что при измельчении зерна в дробилках с горизонтальной осью вращения ротора виброактивность этих машин выше, чем виброактивность дробилок с вертикальным ротором. Однако у молотковых дробилок с вертикальным расположением ротора имеется существенный недостаток – неравномерный износ молотков верхних ярусов. Как было отмечено рядом авторов [9, 119] основная нагрузка измельчаемого продукта приходится на деки и молотки верхних ярусов, которые подвержены интенсивному износу, при этом срок службы которых на верхних ярусах существенно короче, чем на уровнях каждого яруса расположенных ниже. Это может нарушать общую динамическую балансировку такого ротора. Указанным объясняется тот факт, что дробилки с вертикальным ротором находят ограниченное применение на производстве.

В процессе эксплуатации происходит естественный износ машины и оборудования, что сопровождается оседанием фундамента, деформацией и износом деталей, нарушением центровки валов, увеличением зазоров, и в конечном итоге, повышением вибрации [1, 7, 108, 149].

Авторы работы [3] указывают, что в процессе работы молотковой дробилки установлено наличие вредоносных и опасных факторов повышенной шумности и вибрации, которые оказывают негативное влияние на физическое и психологическое здоровье работника.

Проведенные исследования авторов [168] указывают, что вибрация основания фундамента данного измельчителя серьезно влияет на стабильность ее работы. С увеличением силы удара и угла соударения увеличивается смещение швов фундамента, а также максимальное напряжение, при этом марка бетона мало влияет на устойчивость фундамента.

В работах [1, 155] авторы отмечают, что молотковые дробилки в процессе эксплуатации создают значительный шум и вибрации, которые превышают санитарные нормы и негативно влияют на надежность и долговечность машин, а

также затрудняют работу персонала и способствуют разрушению железобетонных конструкций.

Авторами [166] при выполнении исследований на зернодробилке с целью оптимизации их акустического поведения выявлены негативные физические воздействия факторов опасного шума, возникающего в окружающей среде фермеров и работников фермы при измельчении материала в зернодробилках, где на протяжении длительного времени в результате воздействия шума регистрировались случаи потери слуха. При этом одним из способов предложено уменьшение амплитуды вибрационного движения элементов в зернодробилке, что впоследствии, как указано авторами, способствует снижению уровня шума, создаваемого элементами машины. Внесенные конструктивные изменения в бункер и опорную конструкцию дробилки позволили снизить вибрацию и уровень шума на 2,6 дБ (А) для обслуживающего персонала.

При проведении исследований авторами [70] установлено, что вибрация и шум дробилки меняются в зависимости от того, какой продукт измельчается. В значительной мере отличаются характеристика шума и вибрация на холостом ходу. Так, вибрация при измельчении продукта преобладает на низких и средних частотах, а для работы дробилки на холостом ходу характерна высокочастотная вибрация. Но на средних и высоких частотах шум от измельчения продукта на 10-15 дБ выше по сравнению с шумом на холостом ходу. Причиной этого является соударение продукта о рабочие органы дробилки, при этом измельчение продукта существенно влияет на шумовибрационные характеристики молотковой дробилки.

В источнике [125] указано, что в дробильном отделении любого предприятия АПК главным источником шума является молотковая дробилка. Звук, который издает дробилка, исходит непосредственно от зоны измельчения из-за происходящего в ней ударного взаимодействия рабочих органов машины с измельчаемым материалом. Эквивалентный уровень звука при холостом ходе составил 89,9 дБА, при полной загрузке – 93,3 дБА, при подходе работника непосредственно к оборудованию показатели уровня шума возрастают на 6-12%.

При замере уровня вибрации по параметрам L_v в дробильном отделении, в зоне технического контроля выполняемых процессов на холостом ходу составили 136 дБА, при полной загрузке – 152 дБА.

В процессе переработки, очистки зерна наблюдаются повышенный шум, вибрация органов машин [96, 164].

Авторами [161] на промышленных предприятиях в различных перерабатывающих отраслях изучены перерабатывающие машины, излучающие шум. Результаты исследования показали, что молотковая дробилка из числа измельчителей для дробления материалов производила самый высокий уровень шума среднее значение которого составило – 98,4 дБ (А), в производстве безалкогольных напитков, превышающий рекомендации FEPA и OSHA (90 дБ (А)), составляет для дробилки при измельчении материалов (87,5%). Как отмечено указанными авторами за последние 20 лет уровень шума в данной индустрии снизился на 0,58 дБ (А), а при измельчении материала в индустрии безалкогольных напитков – на 9,66 дБ (А).

В той же работе [3] отмечается, что интенсивный шум, создаваемый в процессе измельчения молотковыми дробилками, является серьезным стрессовым фактором, который оказывает негативное воздействие на центральную нервную систему, нарушая ее функциональную регуляцию, а также может приводить к различным деструктивным процессам в других системах организма. Громкий шум может также снизить внимание работника, скорость его реакции и способность анализировать ситуацию. Все это может привести к ухудшению производительности и качеству работы. Причинами профессиональных заболеваний (вибрационная болезнь или неврит), приводящих к потере трудоспособности и в особо тяжелых случаях к инвалидности, может являться работа с молотковой дробилкой, ввиду систематических воздействий вибрации на работника. Из указанного следует, что работа с молотковыми дробилками сопряжена с рядом вредоносных факторов, наносящих серьезный ущерб физическому и психологическому здоровью работника.

Также в работе [93] показано, что шум и вибрация являются одними из основных вредных производственных факторов, борьбе с которыми придаётся особенное значение.

В нормальном режиме работы производственное оборудование может вызывать вибрацию, которая оказывает негативное воздействие как на обслуживающий персонал, так и на оборудование, участвующее в технологической цепочке. Вибрационные воздействия на конструкции и комплектующие элементы оборудования могут вызвать усталостные трещины, износ и ослабевание соединений, что в свою очередь может привести к сбою в работе оборудования и последующему отказу.

В работе [133] отмечены негативные последствия шума и вибрации, которые наносят непоправимый вред здоровью, воздействуя на кору головного мозга, оказывая раздражающее действие, способствующее возникновению травматизма, нарушению процесса пищеварения, изменению объема внутренних органов. Сильный шум в условиях производства наносит вред, влияя на работоспособность обслуживающего персонала, ускоряя процесс утомления, ухудшения слуха, ослабления внимания и замедления реакций. По этим причинам шум вызывает нежелательную реакцию всего организма человека.

Необходимо отметить, что согласно указанным исследованиям авторов, воздействие вредных производственных факторов, таких как шум и вибрация машин и оборудования на человека имеет кумулятивный характер и приводит к такому негативному явлению, как профессиональные заболевания.

Таким образом, процесс переработки зернового сырья в комбикорма с использованием молотковых дробилок с горизонтальным валом ротора сопровождается вибрацией и шумом, которые значительно превышают санитарные нормы, что говорит о существенном недостатке, которые, как следствие, ведут к увеличению энергоемкости процесса измельчения.

Колебательный процесс, который может возникнуть вследствие периодических смещений центра тяжести отдельных составленных частей ротора молотковой дробилки при вращении, от нарушения равновесия, которое оно

имело в статическом состоянии, а также при периодическом изменении формы молотков, определяется как вибрация.

Основные причины появления вибраций в молотковой дробилке – силы, вызванные неуравновешенностью вращающихся рабочих органов, дисбаланса ротора и его составных частей, а также возникновение ударных воздействий на рабочие органы при измельчении зернофуража.

Имеющаяся взаимосвязь источника колебаний ротора с корпусом дробилки через подшипники, а также наличие вибрации вызвали необходимость рассмотрения основных вибрационных эффектов от действий дробилки с горизонтальным валом ротора и порождающих факторов, а также сведение к минимизации данного негативного явления.

Наличие ударных импульсов неразрывно связано с неравномерной загрузкой измельчаемым материалом соосных молотков, что приводит к дестабилизации комплексной внутренней системы взаимодействия ротора и шарнирно закрепленных ударных элементов, которая влечет к несбалансированности вращающейся системы вследствие наличия неидеальных условий вращения и вызывает неуравновешенность ротора и вибрацию за счет воздействий на элементы подшипникового узла.

Средством, обеспечивающим вибробезопасность и предотвращение развития негативных факторов, является создание и применение вибробезопасных машин, либо улучшение их качеств.

Таким образом, дробилки ударного действия с горизонтальным расположением ротора наряду с большим количеством преимуществ по производительности, компактности, техническим и технологическим свойствам против дробилок других конструкций обладают некоторыми эксплуатационными недостатками, что требует рассмотрения свойств самобалансировки молотковой дробилки с горизонтальной осью вращения вала ротора способное снизить вибрационную нагрузку на работника. Присутствие этих недостатков частично является несовершенством конструкции, заключающейся в односторонней загрузке дробимого материала через загрузочную горловину, расположенную в

верхней части измельчителя, чем и обуславливается повышенная виброактивность.

Указанное говорит о том, что отыскания свойств самобалансировки молотковой дробилки с горизонтальным расположением ротора, способное снизить уровень виброактивности, и создание нового технологического решения с наличием минимального значения вибрационной нагрузки в условиях производственной эксплуатации относятся к числу весьма важных задач для комбикормового производства в сельском хозяйстве, которые следует исследовать и определять теоретическими и эмпирическими методами.

Упомянутые недостатки требует принципиально новых конструктивно-технических решений и разработок конструкции молотковых дробилок с горизонтальными осями вращения ротора, позволяющих снизить виброактивность, следовательно, улучшить работу обслуживающего персонала за счет снижения воздействия колебательной системы в условиях вибронагрузок и увеличить надёжность и долговечность измельчителя за счет снижения механических напряжений.

Анализ научных работ вышеперечисленных источников позволяет сделать вывод, что ведутся исследования по улучшению конструкций и рабочего процесса молотковых дробилок, направленные на снижение шума, виброактивности и энергозатрат на производство единицы продукции. Однако для серийного производства некоторые конструктивные решения могут быть достаточно сложными в исполнении, что сказывается на цене единицы изделий. В связи с этим помимо совершенствования рабочих режимов и комплектующих элементов измельчителей молоткового типа с горизонтальной осью вращения актуальным является создание технологических решений, позволяющих снизить шум и виброактивность, следовательно, увеличить надёжность конструкции измельчителей данного характера.

1.6. Выводы по 1 главе

Проведенный обзор позволяет сделать следующие выводы:

1. Несмотря на широкое использование молотковых дробилок в аграрном производстве и наличие положительных эффектов в сравнении с другими типами измельчителей, дробилки с горизонтальным валом имеют недостатки: высокая виброактивность конструкции и наличие шума, как следствие, увеличение затрат энергии на процесс.
2. Различные конструктивные решения, связанные с разработкой виброизолирующих элементов для молотковых дробилок с горизонтальным барабаном, не уменьшают саму виброактивность дробилки, а лишь снижают передачу вибрации на фундамент.
3. Требуется тщательный научный анализ причин виброактивности молотковых дробилок, путей ее снижения, в частности за счет изменения существующих способов подачи исходного материала в полость измельчителя.

2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ВИБРОАКТИВНОСТЬ МОЛОТКОВЫХ ЗЕРНОДРОБИЛОК И ЕЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

2.1. Общие замечания

Молотковые дробилки фуражного зерна работают в очень напряженном динамическом режиме. Достаточно сказать, что угловая скорость вращения барабана составляет не ниже $270-280 \text{ с}^{-1}$. Линейные скорости молотков достигают значений $80-100 \text{ м/с}$. Работа дробилок поэтому сопровождается значительным шумом и вибрацией, уровни которых превышают санитарные нормы [155]. По данным [131], уровень виброактивности подшипниковых узлов дробилки А1-ДМР составляет $0,014-0,020 \text{ м/с}$. Уровень шума достигает 102 дБ (А) при допустимой норме 85 дБ .

Источником высокочастотных вибраций является дисбаланс барабана, особо ощутимый по мере неравномерного износа молотков. Однако даже тщательно сбалансированный статически и динамически барабан (путем соответствующей подборки молотков) и имеющий на холостом ходу удовлетворительные динамические показатели, в процессе подачи материала на измельчение повышает свою виброактивность. Особенно существенно это проявляется в отношении молотковых дробилок с горизонтальным расположением барабана, поскольку появляются ударные импульсы при прохождении молотков под загрузочным устройством и их динамическим взаимодействием с входящим потоком исходного материала. Подтверждением этого служат экспериментальные наблюдения, обнаруживающие увеличение виброактивности дробильной машины при подаче материала на дробление, а также зависимость уровня виброактивности от вида материала. Такую виброактивность дробилки можно назвать технологической. Именно на ее

устранение должны быть направлены научные исследования и конструкторские разработки.

Однако на практике борются с ее следствием, пытаясь виброизолировать всю дробилку от фундамента.

В работе [155] предложен несколько иной принцип – виброизоляция самого барабана дробилки, с тем чтобы колебания не распространялись на всю машину. Однако в этом случае барабан становится подвижным относительно дек дробильной камеры, при этом зазор между концами молотков и рифлями дек изменяется. Это может негативно сказаться на технологическом процессе измельчения.

Следует указать, что кроме снижения срока службы деталей и узлов дробилки вибрация косвенно повышает энергозатраты процесса измельчения. Обусловлено это дополнительным рассеянием энергии в конструктивных элементах и сопряжениях самой дробильной машины, фундаменте и прилегающем грунте. Потребляемая на это энергия «откачивается» от электродвигателя дробилки.

Поэтому целью данного исследования является поиск путей снижения технологической виброактивности молотковых дробилок с горизонтальным расположением барабана.

2.2. Моделирование технологической виброактивности зернодробилок

Рассмотрим сначала этот вопрос для дробилок с горизонтальной верхней подачей исходного зерна через одно загрузочное отверстие. Такой анализ позволит выявить источники виброактивности дробилок и выявить пути ее снижения.

Схема, отражающая положение молотка дробилки во время ее работы, представлена на рисунке 2.1.

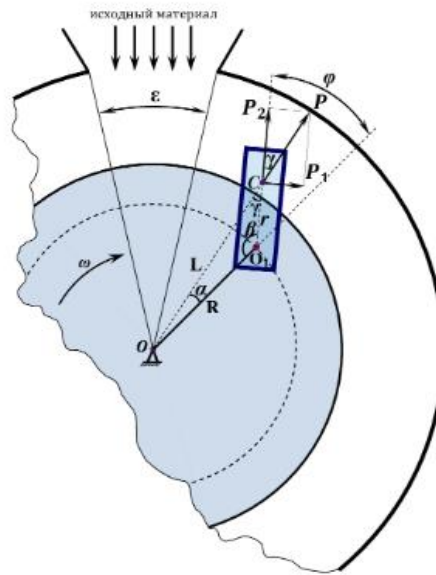


Рисунок 2.1 – Схема, поясняющая колебания молотка в поле центробежных сил (деки и измельчаемый материал условно не показаны)

Учитывая результаты работ [97, 142], уравнение относительных колебаний молотка вокруг оси своего подвеса в дисках барабана можно представить как колебания физического маятника в поле центробежных сил

$$J\ddot{\varphi} + k\dot{\varphi} + m\omega^2 Rr \sin \varphi = M_1 + M_2, \quad (2.1)$$

где J – момент инерции молотка относительно оси своего подвеса;

φ – угол отклонения молотка от радиального направления;

k – коэффициент сопротивления вращению молотка в шарнире подвеса;

m – масса молотка;

ω – угловая скорость барабана дробилки;

R – расстояние от центра вращения барабана до оси подвеса молотков (рисунок 2.1);

r – расстояние от оси подвеса молотка до его центра тяжести (рисунок 2.1);

M_1 – постоянный момент, действующий на молоток со стороны продуктового слоя, циркулирующего в камере измельчения;

M_2 – кратковременный момент, действующий на молоток во время его прохождения под загрузочным устройством дробилки и являющийся следствием удара по почти неподвижному потоку материала, поступающему на измельчение.

Сила тяжести молотка в уравнении (2.1) не представлена, поскольку она на три порядка меньше центробежной силы, действующей на молоток, т.е.

$$m\omega^2(R + r) \gg mg, \quad (2.2)$$

или

$$\frac{m\omega^2(R+r)}{g} \gg 1. \quad (2.3)$$

Для примера, подсчитаем данное соотношение для широко распространенных в сельском хозяйстве молотковых дробилок производительностью 2...3 т/час. Для них характерно значение параметров: $\omega \approx 280 \text{ с}^{-1}$; $R \approx 0,3 \text{ м}$; $r \approx 0,025 \text{ м}$.

Расчет дает результат: $\frac{\omega^2(R+r)}{g} \approx 2600$, что и требовалось доказать.

Момент M_1 в той же работе [142] представлен в виде:

$$M_1(b\omega, \dot{\varphi}) = A(b\omega - \dot{\varphi}) + B(b\omega - \dot{\varphi})^2, \quad (2.4)$$

где A, B – эмпирические коэффициенты;

$b < 1$ – коэффициент, характеризующий отставание скорости циркуляции продуктового слоя от скорости молотков.

Момент M_2 может быть записан следующим образом:

$$M_2 = \begin{cases} M_2^* & \text{при } 0 < t \leq t_1 \\ 0 & \text{при } t_1 < t \leq T' \end{cases} \quad (2.5)$$

где t_1 – время прохождения молотка под загрузочным устройством;

$T = \frac{2\pi}{\omega}$ – время одного оборота барабана дробилки.

Суммарный момент составляет:

$$M = M_1 + M_2. \quad (2.6)$$

На рисунке 2.2 схематично представлен график этого суммарного момента. Промежуток времени Δt прохождения молотка около загрузочного устройства можно подсчитать так

$$\Delta t = \frac{\varepsilon}{2\pi} T = \frac{\varepsilon}{2\pi} \cdot \frac{2\pi}{\omega} = \frac{\varepsilon}{\omega}, \quad (2.7)$$

где ε – угол обхвата загрузочного устройства, рад. (рисунок 2.1).

Обычно угол ε составляет $15^\circ - 20^\circ$ ($0,26 - 0,35$ рад). Учитывая характерную угловую скорость барабана $\omega = 280$ рад/с, будем иметь $\Delta t \approx 0,0010 \dots 0,0013$ с.

Можно сравнить полученный результат с каким-нибудь характерным промежутком времени, например, периодом свободных колебаний молотка T_0 .

Период T_0 можно подсчитать, используя уравнение (2.1), следующим образом:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}, \quad (2.8)$$

где $\omega_0 = \omega \sqrt{\frac{mRr}{J}}$ – частота свободных колебаний молотка в поле центробежных сил, зависящая от угловой скорости ω барабана дробилки.

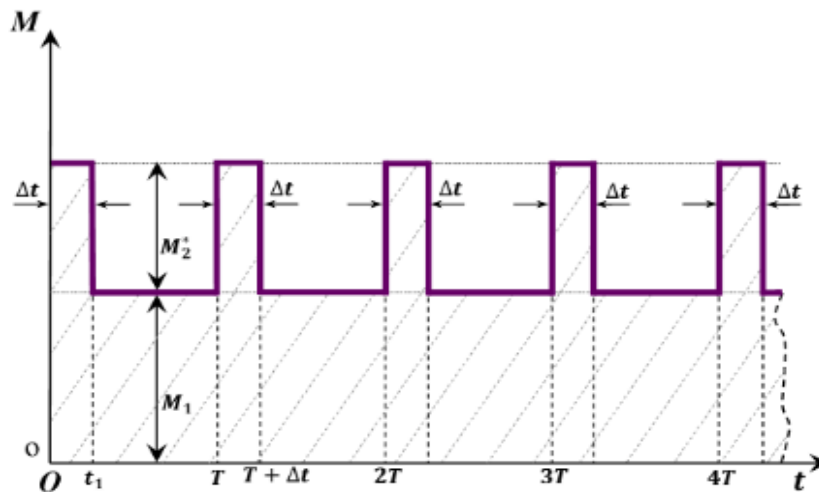


Рисунок 2.2 – График момента сопротивления, действующего на молоток со стороны дробимого материала

При массе молотка $m \approx 0,3$ кг и моменте инерции относительно шарнирного подвеса $J \approx 0,6 \times 10^{-3}$ кг м² значение ω_0 составляет примерно 560 с^{-1} , а $T_0 \approx 0,0113$ с.

Указанное соотношение $\Delta t / T_0$ не превышает значения 0,115.

По графику, приведенному в книге Я. Г. Пановко [98, с.70], для такого соотношения промежутков времени замена кратковременного импульса силы его мгновенным значением влечет ошибку примерно в 3%. Это приемлемо для инженерных расчетов.

Если же учитывать данные С.В. Мельникова [82], который приводит значение $\Delta t = 6,5 \times 10^{-5}$ с, то можно прогнозировать еще меньшую ошибку.

Сказанное позволяет рассматривать задачу о действии момента M_2 на нашу механическую систему как задачу о действии мгновенных периодических импульсов.

Импульс S , действующий на молоток, можно определить следующим образом:

$$S = P_2 \cdot \Delta t = m_1 \cdot \Delta v, \quad (2.9)$$

где P_2 – сила, действующая на молоток во время ударного воздействия;

m_1 – масса зерна, одновременно участвующая в ударе (зависит от подачи зерна);

Δv – изменение скорости молотка после удара.

Идеализация в виде мгновенных импульсов означает, что сила очень велика, а продолжительность ее воздействия стремится к нулю. Хотя в целом импульс принимает конечное значение, подсчитываемое по формуле (2.9).

После этих вступительных замечаний вернемся к анализу нашего уравнения (2.1).

Если бы не было момента M_2 (что характерно для дробилок с вертикальным расположением барабана), то уравнение (2.1) можно было бы привести к форме:

$$\ddot{\varphi} + 2n\dot{\varphi} + \omega_0^2 \sin \varphi = q_1(b\omega, \dot{\varphi}), \quad (2.10)$$

где введены обозначения

$$2n = \frac{k}{J}; \quad \omega_0 = \omega \sqrt{\frac{MRr}{J}}; \quad q_1 = \frac{M_1}{J}. \quad (2.11)$$

В работе [142] показано, что действие момента M_1 приводит к появлению отклонения молотка от радиального положения в сторону, противоположную направлению вращения барабана, на угол, равный

$$\varphi_0 = \arcsin \frac{q_1(b\omega)}{\omega_0^2}. \quad (2.12)$$

Это положение молотка характеризует его динамическое равновесие. В той же работе [142] показано, что это положение устойчиво. Если по какой-либо причине молоток выведен из этого динамического состояния, то появившиеся колебания быстро затухают и молоток возвращается к своему неколебательному круговому движению с отклонением по углу φ_0 .

Уравнение, характеризующее это затухание колебаний, было записано в виде [142]:

$$\ddot{\xi} + [2n + q'_1(b\omega)]\dot{\xi} + (\omega_0 \cos \varphi_0)^2 \xi = 0, \quad (2.13)$$

где $\xi = \varphi - \varphi_0$ – новая переменная, характеризующая отклонение молотка от положения динамического равновесия с углом φ_0 ;

$q'(b\omega)$ – производная функции, характеризующая вид характеристики момента M_1 сопротивления на молотке.

Угол φ_0 , по данным [74], не превышает 17° . Значение косинуса для такого значения угла составляет $0,96 \approx 1$. Тогда уравнение (2.12) можно переписать в виде:

$$\ddot{\xi} + [2n + q'_1(b\omega)]\dot{\xi} + \omega_0^2 \xi = 0. \quad (2.14)$$

Что может вызвать отклонение молотка от равновесного положения φ_0 ? В дробилке с горизонтальным барабаном – это, как уже говорилось, периодические воздействия материала во время прохождения молотка около загрузочного устройства. Для этого типа дробилок уравнение (2.14) должно быть дополнено правой частью в соответствии с уравнением (2.1)

$$\ddot{\xi} + 2n_* + \omega_0^2 \xi = q_2, \quad (2.15)$$

$$\text{где } 2n_* = 2n + q'_1(b\omega); \quad (2.16)$$

$$q_2 = \begin{cases} \frac{M_2}{J} & \text{при } 0 \leq t \leq t_1 \\ 0 & \text{при } t_1 \leq t \leq T \end{cases}, \quad (2.17)$$

($T = \frac{2\pi}{\omega}$ – время одного оборота барабана).

Вынужденные колебания молотка под действием периодических импульсов, описываемые уравнением (2.15), можно рассматривать как

установившийся режим колебаний при наличии восстанавливающей силы $\omega_0 \xi$ и с периодически повторяющимися начальными условиями:

$$1) t = 0; \xi = \xi_0; \dot{\xi} = \dot{\xi}_0; \quad (2.18)$$

$$2) t = T; \xi = \xi_0; \dot{\xi} = \dot{\xi}_0; \text{ и т.д.}$$

Однако в промежутке между импульсами колебания молотка являются свободными и происходят с частотой ω_0 . За период одного оборота барабана может происходить до 2 ... 3 полных или неполных колебаний молотка.

Используя периодичность процесса и переходя в пределе к действию мгновенных импульсов, будем иметь

$$\xi(0) = \xi(T); \dot{\xi}(0) = \dot{\xi}(T) = \frac{S(R+r)}{J}, \quad (2.19)$$

где S – импульс силы, определяемый по формуле (2.9);

$R + r$ – плечо действия импульса (рисунок 2.1).

С учетом изложенного вернемся к уравнению (2.15). Оно характеризует колебательное движение молотка вблизи динамического его положения (равновесия), характеризуемого углом φ_0 . Источником колебаний являются периодические удары молотка по поступающему из загрузочного устройства материалу.

Поскольку в системе «молоток – барабан» за один период $T = \frac{2\pi}{\omega}$ действия импульсов (этот период совпадает со временем, потребным на один оборот барабана) происходит более одного цикла свободных колебаний молотка, то обязательно нужно учитывать сопротивление движению молотка. Оно приводит к быстрому затуханию колебаний в течение времени T . После каждого очередного импульса отклонение молотка от φ_0 в конце этого периода практически исчезает. Поскольку указанное сопротивление (условно трение) весьма существенно, то мы учитываем его далее и при точном совпадении времени цикла свободных колебаний молотка со временем одного оборота барабана.

Если совместить начало отчета времени с моментом, наступающим сразу после приложения какого-либо импульса, то можно воспользоваться решением, приведенным в книге [97], где решалась сходная задача.

В наших обозначениях оно имеет вид:

$$\xi = \frac{S(R+r)e^{-h(T-t)} [\sin \omega_{0*}(T-t) + e^{hT} \cdot \sin(\omega_{0*}t)]}{J \omega_{0*}(1 - 2e^{hT} \cos(\omega_{0*}T) + e^{2hT})}, \quad (2.20)$$

где $h = \frac{n_*}{J}$; $\omega_{0*} = \sqrt{\omega_0^2 - n_*^2}$

В системе «молоток – барабан» возможно возникновение т.н. ударного резонанса. Он возможен тогда, когда период T импульсов в целое число раз больше периода T_0 свободных колебаний. Обозначая указанное число буквой k , получим

$$k = \frac{T}{T_{0*}} = \frac{2\pi}{\omega} : \frac{2\pi}{\omega_{0*}} = \frac{\omega_{0*}}{\omega} = \frac{\sqrt{\omega_0^2 - n_*^2}}{\omega}.$$

Поскольку $\omega_0^2 = \omega^2 K$, ($K = MR \frac{r}{J}$), то условие резонанса принимает вид:

$$k = \frac{\sqrt{\omega^2 K - n_*^2}}{\omega} = 1, 2, 3 \text{ и т.д.} \quad (2.21)$$

В этом случае $\sin n_* T = 0$, $\cos n_* T = 1$ и движение описывается выражением:

$$\xi = \frac{S(R+r)e^{-ht} \sin \omega_{0*}t}{J \omega_{0*}(1 - e^{-hT})} \quad (2.22)$$

Если бы был однократный импульс, то он бы вызвал движение [98]

$$\xi_1 = \frac{S(R+r)e^{-ht}}{J \omega_{0*}} \sin \omega_{0*} t. \quad (2.23)$$

Следовательно, множитель

$$\beta = \frac{1}{1 - e^{-hT}} \approx \frac{1}{hT} = \frac{1}{h k T_1} = \frac{\omega_{0*}}{h k 2\pi} = \frac{\omega_{0*}}{2\pi h k}$$

характеризует влияние повторений ударов.

С учетом предыдущего изложения имеем

$$\xi = \xi_1 \frac{\omega_{0*}}{2\pi h k}. \quad (2.24)$$

Первый резонанс, самый опасный, соответствует $k = 1$. Менее опасен второй резонанс с $k = 2$, еще слабее третий с $k = 3$.

При нецелом k отклонения малы и оказываются конечными даже при отсутствии затухания.

В принципе, изменениями параметров можно обеспечить для молотков дробилки первый и второй резонансы. Но нужны ли они?

Рассмотрим самый сильный первый резонанс, при котором $T = T_{0*}$, или $\omega = \omega_{0*}$. Для этого случая уравнение (2.22) перепишем в таком виде:

$$\xi = \xi_0 e^{-hT} \sin \omega t, \quad (2.25)$$

где $\xi_0 = \frac{S(R+r)}{J \omega_{0*}(1-e^{-hT})} = \text{const.}$

Определим, при каких фазах колебания наблюдается максимальное и минимальное отклонение молотка.

Для этого определим точки экстремума функции

$$f(t) = e^{-hT} \sin \omega t \quad (2.26)$$

при помощи первой производной

$$\frac{df}{dt} = e^{-hT} (\omega \cos \omega t - h \sin \omega t) = 0.$$

Отсюда имеем

$$\omega \cos \omega t = h \sin \omega t.$$

На отрезке $t = [0; T]$ имеем два корня:

$$(\omega t)_1 = \text{arctg} \left(\frac{\omega}{h} \right); \quad (2.27)$$

$$(\omega t)_2 = \text{arctg} \left(\frac{\omega}{h} \right) + \pi.$$

Можно далее показать, что первый корень соответствует экстремуму – максимуму, второй – минимуму.

Примерный график колебаний при $\frac{\omega}{h} = 5$, показан на рисунке 2.3.

Как видно, в первую половину периода своего колебания вокруг подвеса молоток отклоняется на общий угол $\varphi_0 + \xi$, максимально на угол $\varphi_0 + \xi_{max}$. Во вторую половину периода отклонения минимальны $\varphi_0 - \xi$, ($\varphi_0 - \xi_{min}$).

Это означает, что если барабан вращается по часовой стрелке (рисунок 2.1), то все молотки, находящиеся в данный момент в правой части дробилки, имеют углы отклонения большие, чем углы отклонения у молотков, находящихся в левой половине барабана. Таким образом, центробежная сила, генерируемая молотками

правой части, меньше, чем центробежная сила, создаваемая молотками левой половины. Появляется дисбаланс барабана, который обуславливает технологическую виброактивность дробилки.

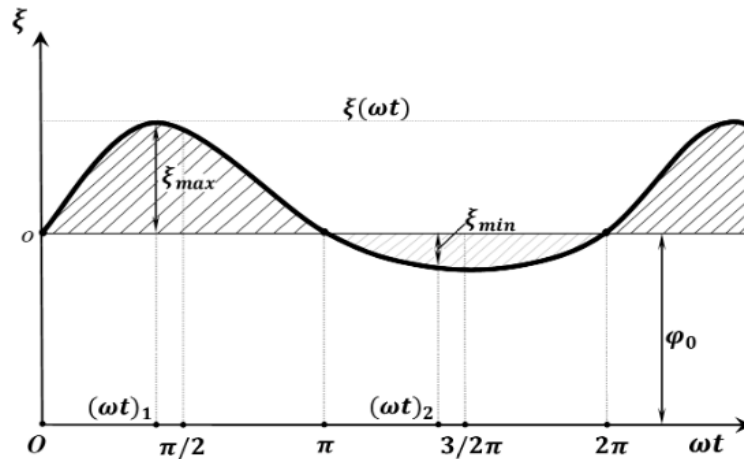


Рисунок 2.3 – График, иллюстрирующий 1-й ударный резонанс и затухание колебаний

Действительно, из работы [142] следует, что центробежная сила P одного молотка равна

$$P = m\omega^2 \sqrt{R^2 + r^2 + 2Rr \cos \varphi}, \quad (2.28)$$

где под углом φ следует подразумевать сумму углов $\varphi_0 + \xi$.

Чем больше угол отклонения φ , тем меньше $\cos \varphi$ и меньше центробежная сила.

Таким образом, действительно молотки правой части барабана генерируют суммарно меньшую центробежную силу, чем молотки левой части. Это и ведет к потере балансировки барабана.

Анализ показывает, что это явление присуще и для других видов ударных резонансов и для безрезонансного режима, хотя и в меньшей степени.

Поэтому резонансов в дробилке следует избегать, чтобы снизить ее виброактивность.

Кроме того, при интенсивных качаниях молотков они могут уходить вглубь барабана и не участвовать в процессе дробления.

Наконец, интенсивные колебания молотков приводят к износу деталей шарнира, т.е. самого молотка и пальца. Это может даже привести к обрыву молотков. Интенсивное сухое трение в шарнирах десятков молотков, закрепленных в барабане, приводит к непроизводительным затратам энергии, которая отбирается от двигателя дробилки.

В ранних работах по динамике молотковой дробилки предполагалось, что резонансы выгодны, так как способствуют увеличению скорости молотков и улучшению процесса дробления.

Действительно, в отдельные промежутки времени суммарная скорость молотка, как векторная сумма переносной и относительной скорости, возрастает. Но в остальные промежутки цикла качания эта скорость уменьшается и ухудшает процесс дробления.

Таким образом, параметры дробилки, чтобы избежать резонансов, должны быть подобраны из приближенного условия

$$k \approx \sqrt{K} = \sqrt{\frac{m R r}{J}} = 1,5; 2,5; 3,5 \dots \quad (2.29)$$

При этом нужно не забывать, что большинство из этих параметров входят в условие, при котором оси подвеса молотков разгружаются от ударных импульсов [19]:

$$l = \frac{J}{m r}, \quad (2.30)$$

Где l – плечо импульса (удара).

Обычно принимают, что l равно расстоянию от центра подвеса молотка до середины внешней (дальней) его грани. Обусловлено это малым расстоянием падения исходного материала за время между очередными воздействиями молотков, поэтому ударный импульс прилагается к концу молотка.

Подставляя последнее выражение в формулу (2.29), будем иметь условие отсутствия резонансов при колебаниях молотков и передачи ударных импульсов на их оси подвеса

$$k \approx \sqrt{\frac{R}{l}} = 1,5; 2,5; 3,5; \dots \quad (2.31)$$

Таким образом, варьируя радиус барабана и величину l , зависящую от длины молотка, можно соблюсти оба указанных условия одновременно.

Простое соотношение (2.31) есть условие, при котором технологическая виброактивность дробилки является минимальной.

Условие (2.31) можно записать по-иному

$$R = k^2 l. \quad (2.32)$$

Для $k = 1,5$ имеем: $R = 2,25l$. Это совпадает с условием устойчивости движения молотка, найденным В. С. Пановой иным методом [74, 82].

Таким образом, классической схеме подачи исходных компонентов сверху органически присущ недостаток – наличие технологической виброактивности. Он может быть уменьшен подбором параметров дробилки, но не искоренен полностью.

2.3. Особенности динамики дробилок с оппозитной загрузкой исходного материала

С целью снижения технологической виброактивности молотковых дробилок нами предложена схема их загрузки зерном через два боковых, зеркально расположенных загрузочных устройства [99].

Рассмотрим некоторые динамические свойства дробилки с оппозитной загрузкой исходного материала в сравнении с дробилкой, снабженной традиционным загрузочным устройством. Принципиальные схемы загрузок дробилок, а также положения диаметрально расположенных молотков представлены на рис. 2.4.

Поскольку нас в первую очередь интересует уравновешенность барабана, то динамическая система с двумя молотками, расположенными на диаметральных линиях «а-а» барабана, проходящих через ось его вращения O и оси O_1 и O_2

вращения молотков в шарнирах подвеса, дает много информации по этому вопросу.

Считаем, как и прежде, что барабан вращается равномерно с угловой скоростью ω .

В дробилке с верхней подачей (см. рис.2.4а), как было показано в предыдущем разделе, молоток после удара по слою исходного материала отклоняется на больший угол, чем молоток на противоположной стороне, во многом восстановивший свое некоторое среднее положение после удара. Если обозначить углы отклонения молотков как φ_1 и φ_2 , то соответствующие центробежные силы от молотков определяются по формулам (см. ((2.28))

$$P_1 = m\omega^2 \sqrt{R^2 + r^2 + 2Rr \cos \varphi_1}, \quad (2.33)$$

$$P_2 = m\omega^2 \sqrt{R^2 + r^2 + 2Rr \cos \varphi_2}. \quad (2.34)$$

(Обозначения в этих формулах и на рисунке 2.4 такие же, как в разделе 2.2.)

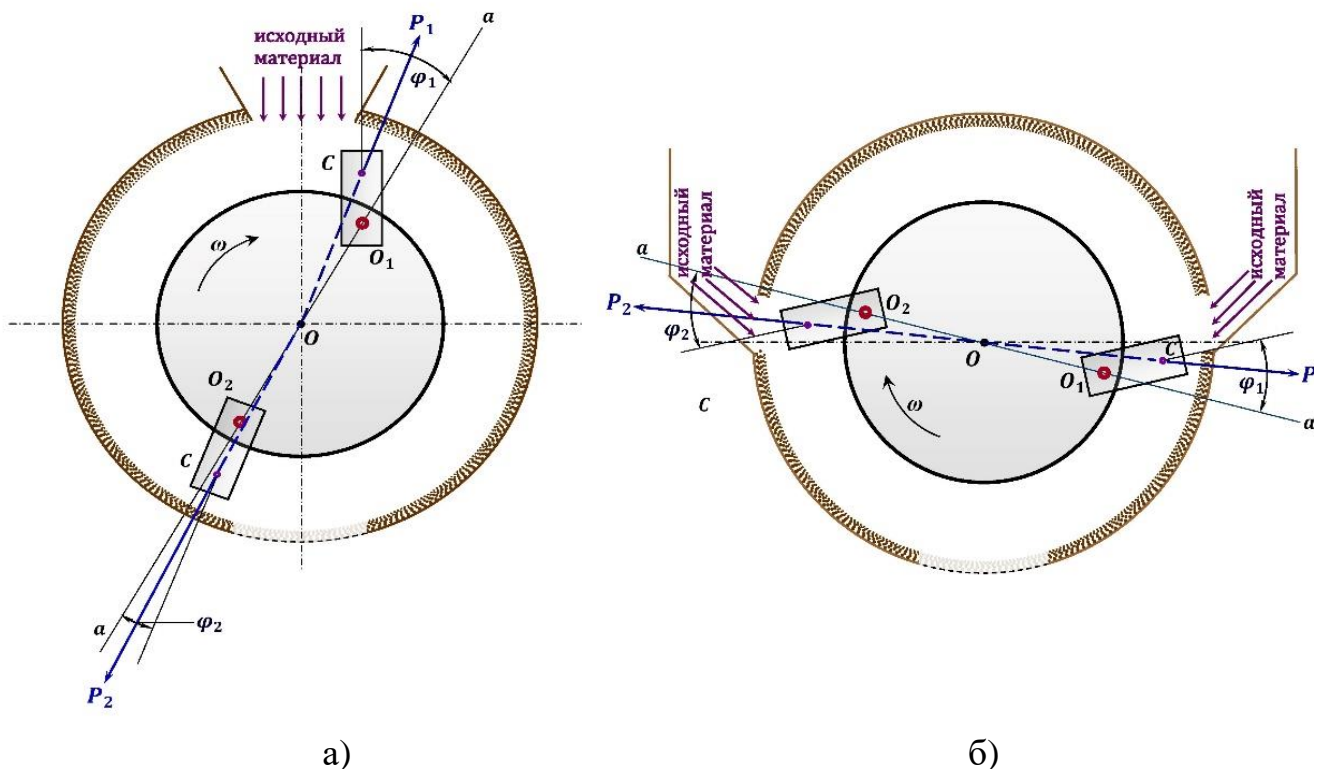


Рисунок 2.4 - Динамические схемы системы барабана с двумя диаметрально расположенными молотками: а) с верхней подачей материала; б) с оппозитной подачей в боковые загрузочные устройства

Поскольку $\varphi_1 > \varphi_2$, то $P_1 < P_2$, что означает несбалансированность системы и появление технологической виброактивности.

Совершенно другая динамика молотков прослеживается при оппозитной загрузке дробилки (см. рисунок 2.4б). Здесь при одновременном ударе обоих молотков по входящим слоям исходного зерна молотки отклоняются примерно на одинаковые углы, т. е. $\varphi_1 \approx \varphi_2$. Соответственно $P_1 \approx P_2$. Это означает, что теоретически возможно полное уравнивание барабана дробилки (в смысле устранения технологической виброактивности).

Это первое положительное свойство оппозитной загрузки исходного материала.

Второе состоит в том, что амплитуда угловых качаний молотков на своих шарнирах уменьшается примерно в два раза, поскольку во столько же уменьшается подача исходного материала на каждый молоток и соответствующие ударные импульсы. Как будет показано далее, это снижает непроизводительный расход энергии в шарнирах молотков.

Эти теоретические выводы по дробилке с оппозитной загрузке основаны на предположении, что обеспечена абсолютно одинаковая подача исходного материала в каждое из оппозитных окон. Реально всегда наблюдаются флуктуации подачи в связи с изменчивостью физико-механических свойств фуражного зерна. Поэтому возможны некоторые малые случайные отклонения от теоретических оценок.

2.4. Потери энергии в шарнирах молотков при их колебаниях

Интенсивные колебания молотков приводят к износу деталей шарнира, т.е. самого молотка и пальца. Это может даже привести к обрыву молотков. Интенсивное сухое трение в шарнирах десятков молотков, закрепленных в барабане, приводит к непроизводительным затратам энергии, которая отбирается

от двигателя дробилки. Рассмотрим затраты энергии в шарнирах крепления молотков подробнее.

Приближенно действующую на молоток центробежную силу можно оценить по формуле

$$P = m\omega^2 R. \quad (2.35)$$

Соответствующая сила трения в зоне контакта шарнирного молотка с пальцем составит величину

$$F = fm\omega^2 R, \quad (2.36)$$

где f – коэффициент трения стали по стали.

Энергия, затраченная на проскальзывание в зоне контакта за один период колебаний молотка

$$A = F(2\zeta_{max} + 2\zeta_{min}) r_{ш}, \quad (2.37)$$

где ζ_{max} , ζ_{min} – отклонения молотка в радианах, согласно рисунку 2.3;

$r_{ш}$ – радиус пальца молотка.

Расход энергии за одну секунду, т. е. соответствующая мощность, составит следующую величину:

$$N = A/T = F(\omega/2\pi) (2\zeta_{max} + 2\zeta_{min}) r_{ш} = fm\omega^2 R \left(\frac{\omega}{\pi}\right) (\zeta_{max} + \zeta_{min}) r_{ш}$$

$$N = fmR (\omega^3/\pi) (\zeta_{max} + \zeta_{min}) r_{ш}. \quad (2.38)$$

Дадим численную оценку формулы (2.38). Пусть молоток совершает малые колебания вблизи своего динамического равновесия: $\zeta_{max} = 1,2^\circ$ и $\zeta_{min} = 0,8^\circ$ [82]. Сумма в радианах выражения в скобках составит значение 0,0349. Остальные значения параметров в формуле примем следующими [82]:

$$f = 0,3; \quad m = 0,2 \text{ кг}; \quad R = 0,3 \text{ м}; \quad \omega = 280 \text{ с}^{-1}; \quad r_{ш} = 0,01.$$

Подсчет по формуле (2.38) дает результат: $N = 50 \text{ Вт}$. Для комплекта молотков, установленных на барабане в количестве 50 штук, суммарная мощность составит $2,5 \text{ кВт}$.

Таким образом, самые малые колебания молотков приводят к существенно непроизводительным расходам энергии. Поэтому такие колебания надо устранять.

При оппозитной загрузке ударные импульсы на молотки уменьшаются в 2 раза. Примерно во столько раз уменьшаются углы ξ_{max} и ξ_{min} (см.(2.32)). Следовательно при оппозитной загрузке следует ожидать такого же снижения мощности потребляемой на трение в шарнирах.

2.5. Качественное исследование непроизводительных затрат энергии при вибрациях продуктово-воздушного слоя

Продуктово-воздушный слой циркулирует в рабочей камере дробилки со скоростью примерно 2 раза меньшей, чем скорость концов молотков, толщина которого зависит от величины загрузки дробилки [16, 66, 82, 157]. При таких скоростях на слой действует центробежная сила, прижимающая его к декам и решетку. В поле центробежных сил слой несколько уплотняется.

Кроме того, слой интенсивно прорабатывается вибрационным воздействием, исходящим в основном от дек. Контакты между собой твердых частиц, составляющих основу продуктово-воздушного слоя, должны демонстрировать, казалось бы, сухое трение. Однако относительное проскальзывание частиц относительно друг друга в условиях вибраций преобразует сухое трение в вязкое [139]. Вязкие эффекты обусловлены также циркуляцией воздуха в порах слоя. При непосредственном нормальном контакте частиц друг с другом проявляется упругость материала частиц.

В целом воздушно-продуктовый слой является существенно неоднородной структурой, поскольку форма, размер и плотность частиц неодинаковы.

В связи с малой толщиной слоя (0,05-0,010 м), в сравнении с длиной волны распространения вибраций в зерновых растительных материалах (0,21-3,77 м, [139]) волновые эффекты можно не учитывать.

В зоне контакта частиц воздушно-продуктового слоя происходят сложный физико-механический процесс вязкой и упругой деформации при перемещении

зерновых частиц в плотном потоке, с наличием кратковременных контактов частиц между собой (рисунок 2.5), деформируемых воздействием колебательных процессов.

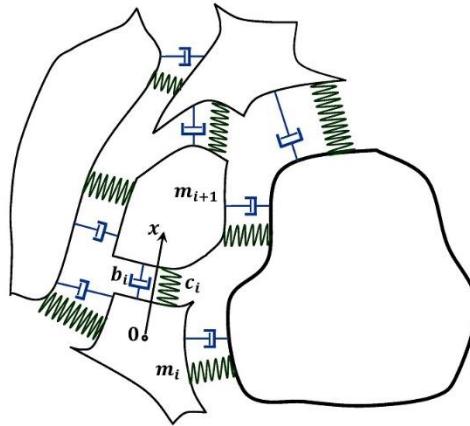


Рисунок 2.5 – Реологическое представление силовых взаимодействий в элементах продуктово-воздушного слоя

В связи с разной массой частиц, их размерами и разнообразием контактов частиц друг с другом существует целый спектр собственных частот и параметров демпфирования отдельных частиц. При этом законы распределения этих величин неизвестны. Эта неопределенность не позволяет на данном этапе развития науки о дроблении зерна построить обоснованный количественный расчет потерь энергии в слое в связи с виброактивностью дробилки.

Поэтому ограничимся качественной картиной процессов, происходящих в слое при вибрациях, и выявлением действующих факторов.

Для этого рассмотрим единичную частицу слоя с массой m_i и ее конкретным контактом с соседней частицей m_{i+1} (рисунок 2.5). Уравнение движения этой частицы можно представить в виде

$$m_i \ddot{x} + b_i \dot{\eta} + c_i \eta = \Phi_{0i} \sin \omega t,$$

где x, η – абсолютное и относительное (относительно частицы m_{i+1}) перемещение данной частицы;

b_i, c_i – коэффициенты вязкости и жесткости i -того контакта;

Φ_{0i} – вынуждающая сила как равнодействующая от других контактов частицы, спроектированная на направление x ;

ω – угловая частота колебаний, совпадающая по значению с угловой скоростью барабана дробилки.

Вводя обычные для теории колебаний преобразования

$$2n_i = \frac{b_i}{m_i}; \quad \omega_{0i} = \sqrt{\frac{c_i}{m_i}},$$

получим линейное уравнение колебаний частицы

$$\ddot{x} + 2n_i \dot{x} + \omega_{0i}^2 x = (\Phi_{0i}/m_i) \sin \omega t.$$

Мощность N_i , необходимая для преодоления сопротивления в данном контакте, выводится из последнего уравнения и имеет вид [14].

$$N = \frac{\Phi_{0i}^2 \omega \sin 2\delta_i}{4 m_i (\omega_{0i}^2 - \omega^2)}, \quad (2.39)$$

где δ_i – угол сдвига фаз между перемещением частицы и действующей на нее вынуждающей силой.

Угол сдвига фаз определяется по формуле

$$\delta = \arctg \frac{2n_i \omega}{\omega_{0i}^2 - \omega^2}.$$

Из выражения (2.39) видно, что рассеивание энергии в контактах частиц прямо пропорционально величине Φ_{0i} , т. е. уровню виброактивности дробилки. Кроме того, большое значение имеют параметры контактов частиц между собой, представляемые величинами b_i и c_i . Именно они определяют собой собственные частоты частиц, а также углы сдвига фаз δ .

Формально можно полагать, что, просуммировав потери энергии во всех контактах продуктово-воздушного слоя, можно определить общие потери в слое при его вибрациях.

2.6. О непроизводительных потерях энергии молотковой зернодробилкой, обусловленных колебаниями грунта под её фундаментом

Как мы выяснили ранее, барабан дробилки генерирует неуравновешенную центробежную силу, близкую к круговой, которая через подшипники передается на фундамент и прилегающий грунт (основание фундамента).

Вибрирующий фундамент совершает вертикальные, горизонтальные и угловые колебания, которые передаются по грунту в виде продольных и поперечных волн. Следовательно, фундамент машины с динамическими нагрузками является источником вредного вибрационного влияния на соседние машины, объекты с аппаратурой, конструкции зданий и сооружений.

Поэтому к фундаментам машин с динамическими нагрузками, кроме общих требований, предъявляются дополнительные. В частности, по молотковым дробилкам требуется, чтобы амплитуда горизонтальных колебаний не превышала 0,05 мм [120]. При этом амплитуда вертикальных колебаний не нормируется при частоте вращения барабана свыше 150 с^{-1} . Видимо, считается, что высокочастотные вертикальные колебания быстро затухают в глубине грунта и не оказывают вредного влияния на окружающую среду и технические объекты.

При этом действующая актуализированная версия СНиП 2.02.05-87 [120], как и ранее действующие версии, совершенно не учитывали возможность “откачки” энергии от электродвигателя технологической машины. Эта энергия расходуется на вибрирование грунта под фундаментом.

Между тем эти непроизводительные затраты энергии могут давать существенную прибавку для энергоемкости технологического процесса.

Описание взаимодействия фундамента, поддерживающего машину с динамическими нагрузками, с прилегающим грунтом является, в общем плане, сложнейшей задачей. В строгой постановке необходимо учитывать толщу грунта как сплошную среду, причем с переменными по глубине характеристиками. При

колебаниях системы “машина – фундамент” необходимо также учесть присоединенную массу грунта. Не только решение, но даже и постановка задачи о колебаниях фундаментов под машины с учетом указанных выше факторов представляет значительные трудности [116, 120].

В связи со сказанным задачу о колебаниях фундаментов существенно упрощают.

Во-первых, тела машины и фундамента рассматривают как абсолютно твердые.

Во-вторых, вводят, казалось бы, грубое допущение о грунтовом основании, лишённым массы. Как показали многочисленные эксперименты, построенные на этом допущении расчеты дают результаты, весьма близко отвечающие действительности [116].

В-третьих, нелинейный характер некоторых зависимостей грунта также игнорируется. Поэтому во всех руководствах по расчету фундаментов говорится о возможности рассматривать основание фундамента как упруго-вязкое, линейно-деформируемое тело.

В-четвертых, не учитывается эксцентриситет в распределении масс фундамента.

Мы также воспользуемся этими допущениями в решаемых задачах о рассеянии энергии в грунте под фундаментом. При этом ограничимся вертикальными колебаниями.

Соединение дробилки с фундаментом может быть жестким, или с помощью амортизирующих элементов. Этому отвечают две расчетные схемы “дробилка – фундамент – грунт” (рисунок 2.6).

Действие грунтового основания в нашем случае моделируют упругие c , c_2 и вязкие b , b_2 элементы.

Предположим, что вертикальная составляющая центробежной силы, действующей по линии oz (рисунок 2.6), изменяется по синусоидальному закону:

$$\Phi = \Phi_0 \sin \omega t, \quad (2.40)$$

где Φ_0 – амплитудное значение центробежной силы;

ω – угловая частота вынужденных колебаний системы, совпадающая по значению с угловой скоростью вращения барабана;

t – время.

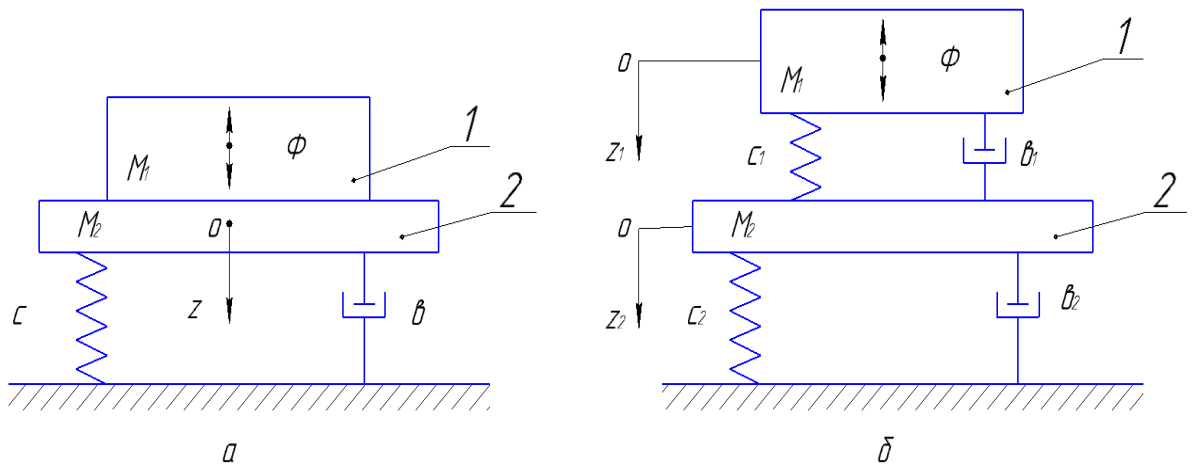


Рисунок 2.6 – Схемы к расчету вынужденных колебаний при жестком креплении дробилки к фундаменту (а) и креплении через амортизирующие элементы (б): 1 – дробилка, 2 – фундамент

Рассмотрим сначала случай жесткого крепления дробилки к фундаменту (рисунок 2.6 а).

Для этого случая дифференциальное уравнение колебаний дробилки и фундамента как общего тела массой $M = M_1 + M_2$ (M_1 – масса дробилки, M_2 – масса фундамента) будет иметь вид:

$$M\ddot{z} + b\dot{z} + cz = \Phi_0 \sin \omega t. \quad (2.41)$$

После обычных в этом случае преобразований получим уравнение колебаний массы M в стандартном виде:

$$\ddot{z} + 2n\dot{z} + \omega_0 z = (\Phi_0 / M) \sin \omega t, \quad (2.42)$$

$$\text{где } 2n = \frac{b}{M};$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{M}} - \text{собственная частота колебаний системы.}$$

Линейное уравнение (2.42) является известным уравнением вынужденных колебаний. Решение этого уравнения для установившихся колебаний имеет вид:

$$z = A \sin(\omega t - \delta), \quad (2.43)$$

где A – амплитуда колебаний;

δ – угол отставания по фазе перемещений тела М от вынуждающей силы Φ .

Параметры А и δ находят по формулам:

$$A = \frac{\Phi_0/M}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2) + 4n^2\omega^2}}; \quad (2.44)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{2n\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (2.45)$$

Трудности использования уравнения (2.42) и формул (2.44) и (2.45) для расчета колебаний системы “дробилка – фундамент” состоит в том, что, во-первых, неизвестна (её нужно прогнозировать) динамическая сила Φ , во-вторых, основание фундамента также обладает неизвестной структурой с неизвестными характеристиками.

Нормативное значение динамической нагрузки Φ_0 для молотковых дробилок, при отсутствии данных завода – изготовителя, допускается определять по формуле [120]:

$$\Phi_0 = me\omega^2, \quad (2.46)$$

где m – масса барабана дробилки;

e – эксцентриситет массы m , принимаемый равным 0,001 м.

Интегрированной оценкой вибропоглощающих свойств грунтового основания является угол сдвига фаз δ . Однако специалисты по расчету фундаментов считают [116], что угол δ , характеризующий разность фаз между вынужденными колебаниями z и вынуждающей силой Φ для практических расчетов интереса не представляет. Однако эта величина содержит важнейшую информацию о диссипативных свойствах основания фундамента.

Действительно, текущее значение мощности развиваемой источником вибрации является произведением текущих значений величины Φ и \dot{z} , т.е.

$$N = \Phi \dot{z},$$

где \dot{z} – текущее значение скорости колебания массы М.

В среднем за период колебаний источник энергии восполняет потери энергии, рассеянные в основании фундамента:

$$N_{\text{ср}} = \int_0^{2\pi/\omega} \Phi(t) \dot{z}(t) dt. \quad (2.47)$$

После подстановки сюда величин $\Phi(t)$, $z(t)$ и вычисления интеграла получим формулу:

$$N_{\text{ср}} = \frac{\Phi_0^2 \omega \sin 2\delta}{4 M (\omega_0^2 - \omega^2)}. \quad (2.48)$$

Попытка использования этой формулы для практических расчетов опять натывается на неопределенность угла δ .

В связи со сказанным в подобных ситуациях в качестве надежной оценки И. И. Быховским [14] предложено использовать критерий максимума средней энергии, развиваемой источником вибраций.

На основании формулы (2.48) указанный максимум может наступить в двух случаях:

- 1) $\sin 2\delta = 1$, при $\omega < \omega_0$;
- 2) $\sin 2\delta = -1$, при $\omega > \omega_0$.

В первом случае максимум достигается при $\delta = \pi/4$, во втором – при $\delta = 3\pi/4$.

В обоих случаях максимальная величина средней мощности источника вибровозбуждения определяется из формулы (2.48) [120]

$$\text{Max } N_{\text{ср}} = \frac{\Phi_0^2 \omega}{4 M (\omega_0^2 - \omega^2)}. \quad (2.49)$$

Оценим $\text{max } N_{\text{ср}}$ для сельскохозяйственных дробилок фуражного зерна, у которых [82] обычно производительность Q составляет 2,5-3,0 т/час, мощность приводного двигателя $N_{\text{Э}} = 25-30$ кВт, масса дробилки $M_1 = 1000$ кг, масса фундамента $M_2 = 500$ кг, угловая скорость барабана $\omega = 300$ с⁻¹, масса барабана около 300 кг.

Подсчет прогнозируемой вынуждающей силы по формуле (2.46) дает результат $\Phi_0 = 27 \times 10^3$ Н.

Рассеяние энергии в основании фундамента существенно зависит от близости работы системы “дробилка – фундамент – основание” к резонансу. Поэтому расчеты по формуле (2.49) были представлено в виде функции $\max N_{\text{ср}} = \max N_{\text{ср}}(\omega_0)$.

На построенном графике (рис. 2.7) были введены временные переобозначения параметров: $\omega_0 \sim \omega$, $\max N_{\text{ср}} \sim N$.

$$\Phi_0 := 27 \cdot 10^3 \quad \omega := 300 \quad M := 1500$$

$$N(\omega_0) := (\Phi_0)^2 \cdot \frac{\omega}{4 \cdot M \cdot [\omega^2 - (\omega_0)^2]}$$

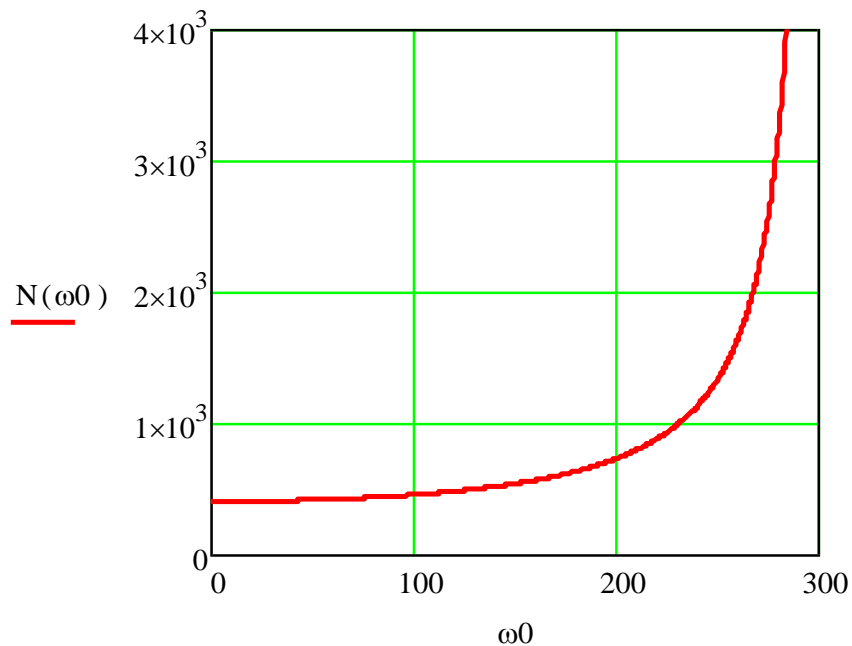


Рисунок 2.7 – Зависимость рассеяния энергии в основании фундамента дробилки от собственной частоты колебаний системы “дробилка - фундамент - основание”

По данным [116], частота ω_0 свободных колебаний таких систем располагается, чаще всего, в пределах от 170 до 300 с^{-1} . Следовательно, наибольшая мощность на вибрирование основания отбирается от электродвигателя дробилки при резонансе, т.е. когда $\omega \approx \omega_0 = 300 \text{ с}^{-1}$. При этом для реального значения $\omega = 280 \text{ с}^{-1}$ мощность составляет $\approx 3 \text{ кВт}$. Это

завышенная оценка, но с учетом потерь мощности при горизонтальных колебаниях грунта общие потери мощности в 3 кВт уже являются реальными. При установленной мощности на сельскохозяйственной дробилке в размере 30 кВт можно утверждать, что непроизводительные затраты энергии на вибрирование грунта составляют около 10% (для зернодробилок с традиционной схемой загрузки исходного сырья).

Для дробилок с оппозитной загрузкой и пониженной виброактивностью, т.е. с малой величиной Φ_0 (см. формулу 2.49)) эти потери также снижаются.

Это существенные потери. С ними можно бороться двумя путями, увеличивая массу фундамента или снижая виброактивность самой дробилки.

Посмотрим далее случай, когда дробилка опирается на фундамент при помощи виброизолирующих элементов (рисунок 2.6 б).

При этом прежняя динамическая система превращается в систему с двумя степенями свободы, т.е. в двухмассную систему.

Уравнения колебаний дробилки (масса M_1) и фундамента (масса M_2) имеют вид [116]:

$$M_1 \ddot{z}_1 + b_1(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + c_1(z_2 - z) = \Phi_0 \sin \omega t; \quad (2.50)$$

$$M_2 \ddot{z}_2 + b_2 \dot{z}_2 - b_1(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + c_2 z_2 - c_1(z_2 - z) = 0. \quad (2.51)$$

Для виброизоляции дробилки большой интерес представляет работа системы в режиме антирезонанса. При его осуществлении дробилка совершает малые колебания (хотя сама является источником вибраций), а существенно большие колебания испытывает фундамент. Это возможно, если вынуждающая сила, действующая на первую массу M_1 , постоянно уравновешивается знакопеременной реакцией со стороны второй массы M_2 .

Антирезонансная частота находится по формуле:

$$\omega_* = \sqrt{\frac{c_1 + c_2}{M_2}}. \quad (2.52)$$

Для получения антирезонанса необходимо, чтобы $\omega_* = \omega$.

Следовательно, для осуществления антирезонанса жесткость амортизаторов должна подбираться по условию

$$c_1 = M_2 \omega^2 - c_2.$$

Если теперь рассматривать изолированную систему с M_2 и параметрами основания c_2 и b_2 , то в силу ранее сказанного о реакции этой системы можно утверждать, что на нее также действует сила $\Phi = \Phi_0 \sin \omega t$.

Потери мощности электродвигателем дробилки за счет рассеяния энергии в основании фундамента оценим здесь по другой формуле [14]

$$\max N_{\text{cp}} = \frac{1}{2} \Phi_0 A \omega \sin(\pi/4). \quad (2.53)$$

На графике (рисунок 2.8) эта мощность представлена в функции амплитуды колебаний. Для корректной работы системы *Matcad* было введено временное переобозначение величин: $\max N_{\text{cp}} \sim N$; $A \sim a$.

$$\begin{aligned} \Phi_0 &:= 27 \cdot 10^3 & \omega &:= 300 \\ N(a) &:= 0.5 \cdot \Phi_0 \cdot a \cdot \omega \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \end{aligned}$$

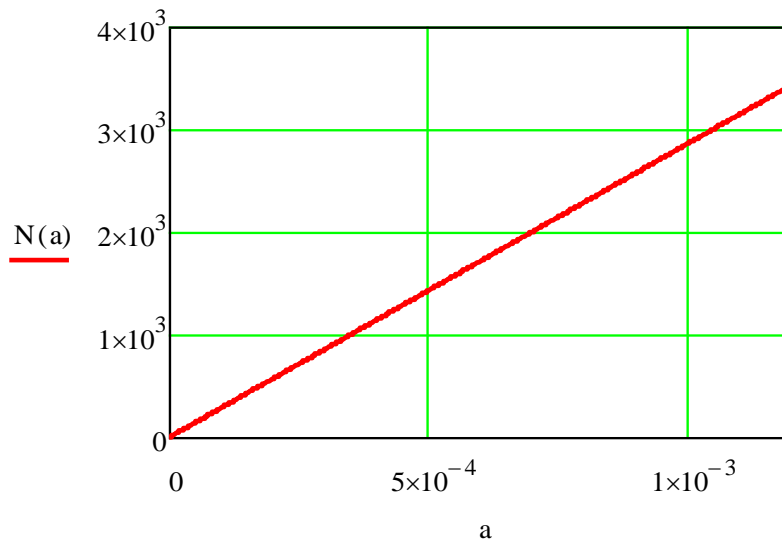


Рисунок 2.8 – Зависимость максимума средней мощности N , отдаваемой электродвигателем дробилки на вибрирование основания, от амплитуды a колебаний фундамента

При реально достигаемых амплитудах колебаний фундамента в 0,5-1,0 мм “откачка” мощности от электродвигателя дробилки на вибрирование основания фундамента может достигать до 1,43-2,86 кВт. Это также существенная величина

потерь мощности, для дробилки с традиционной схемой загрузки исходного сырья. Для предложенной дробилки эти потери теоретически могут быть сведены к нулю.

2.7 Выводы по 2 главе

1. Показано, что источником повышенной виброактивности дробилок с горизонтальным расположением барабана являются ударные импульсы, возникающие при взаимодействии молотков с исходным материалом во время прохождения их под загрузочной горловиной. В связи с этим введено новое научное понятие «технологическая виброактивность дробилки».

2. Установлено, что малые паразитные колебания молотков и сухое трение в их шарнирах существенно (до 8% от мощности приводного электродвигателя) повышают непроизводительные затраты энергии дробилкой, с традиционной схемой загрузки исходного зерна. Эти потери в оппозитной дробилке могут быть снижены наполовину.

3. Прогнозные расчеты показывают, что «откачка» энергии на вибрирование основания дробилки может достигать 10% мощности приводного электродвигателя. Для уменьшения этих потерь необходимо или увеличивать массу фундамента или снижать виброактивность самой дробилки. Последнее представляется более перспективным, так как, кроме сказанного, оно позволяет повысить надежность дробилки и уменьшить виброшумовое загрязнение окружающей среды. В оппозитной дробилке эти затраты могут быть теоретически сведены к нулю.

3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Общая программа экспериментальных исследований и выбор зернового материала

В результате выполненных теоретических исследований установлено, что энергетические показатели ее работы зависят от вибродинамических характеристик, которые определяются интенсивностью колебаний рабочих органов.

Целью экспериментального исследования является установление закономерностей процесса измельчения в дробилке горизонтального типа с оппозитной загрузкой и определение рациональных параметров процесса.

Для проверки теоретических положений и обоснования выводов на основе аналитического исследования была разработана программа экспериментальных исследований, включая следующие аспекты:

1) проверку теоретически полученных данных об уменьшении уровня механических воздействий, возбуждаемых молотками, являющихся источником колебаний, и подтверждение экспериментально повышения эффективности измельчения процесса за счет оппозитной загрузки;

2) выбор факторов процесса измельчения, протекающего в молотковой дробилке с оппозитной загрузкой зерна на основе теории размерности;

3) проведение экспериментальных исследований работы молотковой дробилкой с оппозитной загрузкой на экспериментальном образце;

4) обработку и анализ данных, полученных в результате экспериментальных исследований, с целью получения регрессионных моделей, описывающих процесс работы молотковой дробилкой с оппозитной загрузкой зерна;

5) определение оптимальных технологических и энергетических параметров молотковой дробилки с оппозитной загрузкой зерна на основе полученных уравнений регрессии и результатов экспериментов.

За основные культуры для измельчения примем пшеницу и ячмень обыкновенные, влажностью 12,3 — 13,9 %.

Учитывая, что истечение выбранного зернового материала будет проводиться самотеком с двух зеркально расположенных загрузочных горловин, для этого необходим показатель угла естественного откоса.

Значения углов естественных откосов выбранного сырья зерновых злаковых культур (ячмень, пшеница) [4] приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Углы естественных откосов сырья зерновых злаковых культур (ячмень, пшеница)

№ п/п	Вид сырья зерновых культуры	Углы естественного откоса, °	
		интервал	среднее значение
1	Ячмень	19-21	25
2	Ячмень шелушённый	25-27	24
3	Ячмень измельчённый	42-43	42
4	Пшеница	23-25	24
5	Пшеница измельчённая	43-44	44

Как видно из приведенных значений, величина угла естественного откоса не превышает 44-45 градусов, то есть продукт истекает свободно при установлении угла, большего угла естественного откоса.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях с применением общепринятых и частных методик с применением специального оборудования в соответствии с ГОСТ, согласно комплексной методике [137], которая включает в себя известные и адаптированные методы определения параметров молотковой дробилкой, его динамических характеристик и их индивидуальных особенностей в период совершения технологической операции, а также качественных и энергетических параметров процесса, обеспечивающих

достижение требуемой точности, достоверности, воспроизводимости и адекватности полученных данных, с применением методики факторных экспериментов для анализа влияния различных комбинаций значений факторов на работу измельчителя.

3.2. Выбор факторов процесса измельчения на основе теории размерности

Для полного представления технологического процесса, на стадии проектирования конструкции измельчителя, основой физического моделирования является теория подобия, опирающаяся на анализ размерностей, с помощью которой характеристики натуральных объектов молотковых дробилок возможно установить простым пересчетом критериальных соотношений параметров модельных объектов, устанавливаемых экспериментально.

В классическом представлении числа подобия, или инварианты, можно получить из анализа размерностей параметров задачи, описывающие процесс или явление.

Весьма желательно получение критериальных соотношений параметров молотковой дробилки, влияющих на процесс измельчения фуражного зерна, что позволит уменьшить количество переменных в эксперименте и значительно его упростить.

Проанализировав сведения о типоразмерах дробилок [25, 36, 42], их параметрах, и параметрах рабочих органов, можно сделать вывод, что во многом конструкции одинаковы и отличаются соотношениями диаметра и длиной ротора, чем обусловлено изменение размеров, массы и некоторых конструктивных элементов дробилок, что они имеют сходные равные отношения линейных размеров молотковых дробилок и равенство всех сходственных линейных

размеров рабочих органов, которое выражается постоянной и равной величиной, предполагающее геометрическое подобие.

Подобие условий однозначности (начальные и граничные условия) процессов, протекающих в молотковых дробилках, обеспечивается равенством определяющих критериев подобия, так как явления и процессы, протекающие в измельчителях данного характера, качественно одинаковы (аналогичны) [123, 143]. Данные особенности формируют необходимые и достаточные условия для подобия явлений, процессов, протекающих при измельчении материалов в молотковых дробилках.

Для анализа предложенной нами молотковой дробилки с оппозитной загрузкой измельчаемого материала (рисунок 3.1) применим теорию размерности.

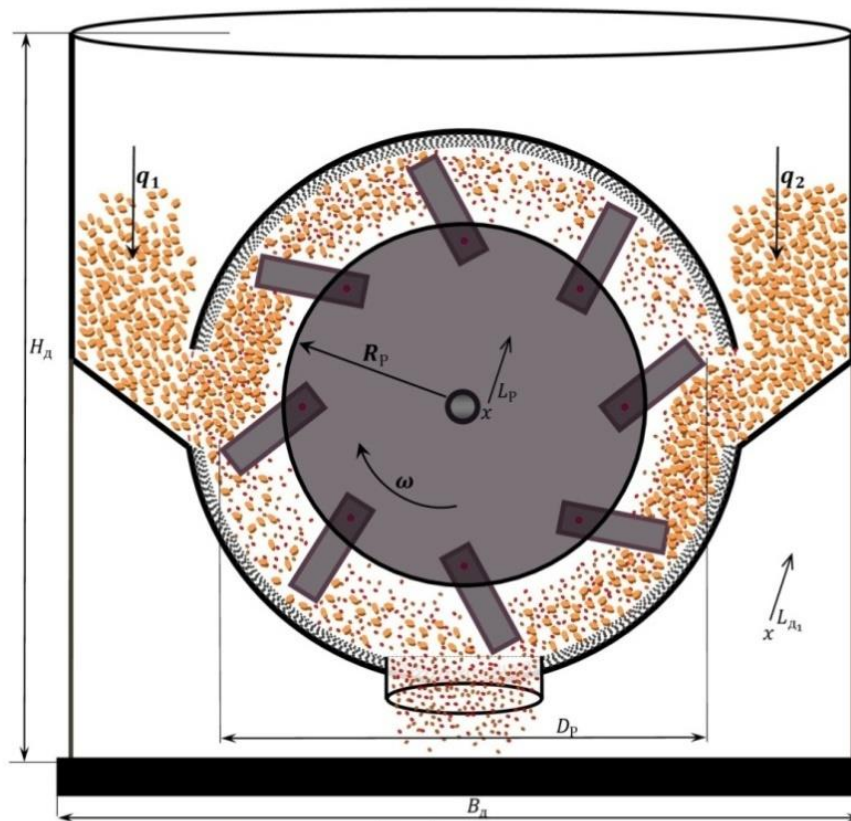


Рисунок 3.1 – Схема зернодробилки с оппозитной загрузкой

Для определения параметров, влияющих на вращение ротора в плотном потоке зерновых частиц, используем вторую π -теорему. Исследуя размерности

переменных, характеризующих исследуемую систему «рабочий орган – среда», зависимости выражаем через основные (независимые) размерности системы СИ, которыми являются, по своему существу, независимыми размерностями: длина $[L]$, масса $[M]$, время $[T]$ (или «длина, сила, время»). Остальные физические величины будут являться «составными», или зависимыми размерностями, т. е. эти размерности можно выразить через основные.

Из уравнения, представленного в источниках [123, 143, 145], характеризующего работу дробилок горизонтального типа, очевидно, что определяющими параметрами физической модели «рабочий орган – среда» являются величины, представленные в таблице 3.2, в которой отражены формулы размерности в классе LMT.

Таблица 3.2 – Переменные, описывающие влияние факторов на процесс измельчения в молотковой дробилке

№ п/п	Название переменной	Обозначение	Формула размерности в классе LMT	Единица измерения
1	Радиус ротора	R	L	м
2	Угловая скорость вращения ротора	ω	T^{-1}	$\frac{1}{с}$
3	Зазор между концами молотков и декой	δ	L	м
4	Плотность зерновки	ρ	$M \cdot L^{-3}$	$\frac{кг}{м^3}$
5	Максимальный размер зерновок	b	L	м
6	Напряжение разрушению зерновки	σ	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$	$\frac{Н}{м^2} = \frac{кг}{м \cdot с^2}$
7	Подача исходного материала в левое отверстие	q_1	$M \cdot T^{-1}$	$\frac{кг}{с}$
8	Подача исходного материала в правое отверстие	q_2	$M \cdot T^{-1}$	$\frac{кг}{с}$

В качестве критерия оптимальности возьмем удельную энергоемкость измельчения зерна:

$$[\mathcal{E}_u] = \left[\frac{Дж}{кг} = \frac{Н \cdot м}{кг} = \frac{кг / (м/с^2) \cdot м}{кг} = \frac{м^2}{с^2} \right]. \quad (3.1)$$

Допуская, что между этими величинами существует функциональная зависимость, представим ее в виде произведения входящих в нее величин в некоторых степенях, используя следующее соотношение безразмерной функции:

$$\mathcal{E}_u = (R, \omega, \delta, \rho, b, \sigma, q_1, q_2). \quad (3.2)$$

Вместо символов величин, входящих в уравнение, заменим их на размерности из таблицы:

$$F[L, (T^{-1}), L, (M \cdot L^{-3}), L, (M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}), (M \cdot T^{-1}), (M \cdot T^{-1})] = \mathcal{E}_u. \quad (3.3)$$

Имеем уравнение с 8 неизвестными. Воспользуемся методами теории размерности [83, 130], а именно π -теоремой, с помощью которой функциональная зависимость может быть представлена в безразмерном виде, т. е. в виде критериев подобия.

Из уравнений, приведенных выше, можно определить только три неизвестных. В качестве основных величин выберем три единицы измерения R, ω, ρ , которые будут считаться независимыми. Если выбрать для данного технологического процесса три основные единицы измерения, то число факторов можно уменьшить с 8 до 5 критериев подобия. Будем искать $\delta, b, \sigma, q_1, q_2$.

В критериальном виде уравнение (3.2) будет иметь вид $\frac{[\mathcal{E}_u]}{[R]^{\alpha_1}[\omega]^{\beta_1}[\rho]^{\gamma_1}} = \left(1, 1, \frac{[\delta]}{[R]^{\alpha_4}[\omega]^{\beta_4}[\rho]^{\gamma_4}}, 1, \frac{[b]}{[R]^{\alpha_6}[\omega]^{\beta_6}[\rho]^{\gamma_6}}, \frac{[\sigma]}{[R]^{\alpha_7}[\omega]^{\beta_7}[\rho]^{\gamma_7}}, \frac{[q_1]}{[R]^{\alpha_8}[\omega]^{\beta_8}[\rho]^{\gamma_8}}, \frac{[q_2]}{[R]^{\alpha_9}[\omega]^{\beta_9}[\rho]^{\gamma_9}} \right)$.

Для расчета возьмем сведения из таблицы 1 со степенями размерностей для каждого фактора и критерия оптимальности.

Значения коэффициентов $[R]^{\alpha_1}[\omega]^{\beta_1}[\rho]^{\gamma_1}, \dots, [R]^{\alpha_9}[\omega]^{\beta_9}[\rho]^{\gamma_9}$ определяются из условия, что каждый критерий (комплекс) представляет собой безразмерную величину.

1. Значения $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ находим следующим образом

$$\frac{[\mathcal{E}_u]}{[R]^{\alpha_1}[\omega]^{\beta_1}[\rho]^{\gamma_1}} = \frac{[L]^2 \times [T]^{-2}}{[L]^{\alpha_1} \times [T^{-1}]^{\beta_1} \times [M]^{\gamma_1} \times [L^{-3}]^{\gamma_1}} = [L]^{2-\alpha_1+3\gamma_1} [T]^{-2+\beta_1} [M]^{0-\gamma_1} = 1.$$

Исходя из представленных данных, получаем следующую систему уравнений: $2 - \alpha_1 + 3\gamma_1 = 0$; $-2 + \beta_1 = 0$; $0 - \gamma_1 = 0$, откуда $\alpha_1 = 2, \beta_1 = 2, \gamma_1 = 0$. Критерий подобия из полученных значений будет иметь вид $\pi_1 = \frac{\Xi_n}{R^2 \times \omega^2}$.

$$2. \quad \frac{[\delta]}{[R]^{\alpha_4}[\omega]^{\beta_4}[\rho]^{\gamma_4}} = \frac{[L]^1}{[L^1]^{\alpha_4} \times [T^{-1}]^{\beta_4} \times [M^1]^{\gamma_4} \times [L^{-3}]^{\gamma_4}} = [L]^{1-\alpha_4+3\gamma_4} [T]^{0+\beta_4} [M]^{0-\gamma_4} = 1$$

Отсюда получаем следующую систему уравнений: $1 - \alpha_4 + 3 \times 0 = 0$; $0 + \beta_4 = 0$; $0 - \gamma_4 = 0$, откуда $\alpha_4 = 1, \beta_4 = 0, \gamma_4 = 0$. Критерий подобия из полученных значений будет иметь вид $\pi_3 = \frac{[\delta]}{[R]}$.

$$3. \quad \frac{[b]}{[R]^{\alpha_6}[\omega]^{\beta_6}[\rho]^{\gamma_6}} = \frac{[L]}{[L^1]^{\alpha_6} \times [T^{-1}]^{\beta_6} \times [M^1]^{\gamma_6} \times [L^{-3}]^{\gamma_6}} = [L]^{1-\alpha_6+3\gamma_6} [T]^{0+\beta_6} [M]^{0-\gamma_6} = 1.$$

Отсюда получаем следующую систему уравнений $1 - \alpha_6 + 3 \cdot 0 = 0$; $0 - \beta_6 = 0$; $0 - \gamma_6 = 0$, откуда $\alpha_6 = 1, \beta_6 = 0, \gamma_6 = 0$. Критерий подобия из полученных значений будет иметь вид $\pi_5 = \frac{[b]}{[R]}$.

$$4. \quad \frac{[\sigma]}{[R]^{\alpha_7}[\omega]^{\beta_7}[\rho]^{\gamma_7}} = \frac{[L]^{-1} \times [M]^1 \times [T]^{-2}}{[L^1]^{\alpha_7} \times [T^{-1}]^{\beta_7} \times [M^1]^{\gamma_7} \times [L^{-3}]^{\gamma_7}} = [L]^{-1-\alpha_7+3\gamma_7} [T]^{-2+\beta_7} [M]^{1-\gamma_7} = 1$$

Отсюда получаем следующую систему уравнений $-1 - \alpha_7 + 3 \cdot 1 = 0$; $-2 + \beta_7 = 0$; $1 - \gamma_7 = 0$, откуда $\alpha_7 = -1 + 3 = 2, \beta_7 = 2, \gamma_7 = 1$. Критерий подобия из полученных значений будет иметь вид $\pi'_6 = \frac{[\sigma]}{[R]^2 \times [\omega]^2 \times [\rho]}$.

$$5. \quad \text{Выведем еще один сложный критерий} \quad \frac{[q_1]}{[R]^{\alpha_8}[\omega]^{\beta_8}[\rho]^{\gamma_8}} = \frac{[M]^1 \times [T]^{-1}}{[L^1]^{\alpha_8} \times [T^{-1}]^{\beta_8} \times [M^1]^{\gamma_8} \times [L^{-3}]^{\gamma_8}} = [L]^{0-\alpha_8+3\gamma_8} [T]^{-1+\beta_8} [M]^{1-\gamma_8} = 1.$$

Отсюда имеем следующую систему уравнений $0 - \alpha_8 + 3 \cdot 1 = 0$; $-1 + \beta_8 = 0$; $1 - \gamma_8 = 0$, откуда $\alpha_8 = 3, \beta_8 = 1, \gamma_8 = 1$. Критерий подобия из полученных значений будет иметь вид $\pi_8 = \frac{q_1}{R^3 \times \omega \times \rho}$

$$6. \quad \frac{[q_2]}{[R]^{\alpha_9}[\omega]^{\beta_9}[\rho]^{\gamma_9}} = \frac{[M]^1 \times [T]^{-1}}{[L^1]^{\alpha_9} \times [T^{-1}]^{\beta_9} \times [M^1]^{\gamma_9} \times [L^{-3}]^{\gamma_9}} = [L]^{0-\alpha_9+3\gamma_9} [T]^{-1+\beta_9} [M]^{1-\gamma_9} = 1.$$

Отсюда имеем следующую систему уравнений $0 - \alpha_9 + 3 \cdot 1 = 0$; $-1 + \beta_9 = 0$; $1 - \gamma_9 = 0$, откуда $\alpha_9 = 3$, $\beta_9 = 1$, $\gamma_9 = 1$. Следовательно, критерий подобия определяется значением $\pi_9 = \frac{q_2}{R^3 \times \omega \times \rho}$.

Практически важное свойство критериев подобия, вытекающее из третьей теоремы подобия, состоит в том, что критерии подобия могут быть преобразованы за счет некоторых операций (сложение, вычитание, умножение, деление) в критерии другой формы и получения новых критериев [121, 130].

В результате многократного проведения процедуры преобразований получим новые критерии, с новой нумерацией, с сохранением общего числа критериев:

$$\pi_1 = \frac{\rho \times (R \times \omega)^2}{\sigma}, \pi_2 = \frac{[\delta]}{[b]}, \pi_3 = \frac{[q_1]}{[q_2]}, \pi_4 = \frac{q_1}{R^3 \times \omega \times \rho}, \pi_5 = \frac{[b]}{[R]}. \quad (3.4)$$

Критерий $\pi_1 = \frac{\rho \times (R \times \omega)^2}{\sigma}$ является новым критерием подобия и обратной величиной от полученного критерия π'_6 . Данный критерий является характеристикой скорости (жесткости) нагружения, характеризующий изменение напряжения в молекулярной структуре зерновки в зависимости от сил инерции массы подаваемого материала на рабочий орган.

$\pi_2 = \frac{[\delta]}{[R]} \div \frac{[b]}{[R]} = \frac{[\delta]}{[b]}$ – критерий подобия, определяющий изменение удельной энергоемкости измельчения зерна в зависимости от зазора между концами молотков и декой, напрямую зависит от максимального размера зерновки.

$\pi_3 = \frac{[q_1]}{R^3 \times \omega \times \rho} \div \frac{[q_2]}{R^3 \times \omega \times \rho} = \frac{[q_1]}{[q_2]}$ – критерий подобия, определяющий зависимость изменения удельной энергоемкости измельчения зерна от соотношения подач исходного материала в левое и в правое отверстие измельчителя (рисунок 3.1).

Определенный ранее в результате вычислений критерий подобия $\pi_4 = \frac{q_1}{R^3 \times \omega \times \rho}$ оставим без преобразований.

Полученный ранее критерий подобия $\pi_5 = \frac{[b]}{[R]}$ также оставим без преобразований.

С учетом полученных критериев (3.4) составим безразмерные комбинации

$$\left(\frac{\varepsilon_u}{R^2 \times \omega^2}\right) = \left[\left(\frac{\rho \times (R \times \omega)^2}{\sigma}\right), \left(\frac{\delta}{b}\right), \left(\frac{q_1}{q_2}\right), \left(\frac{q_1}{R^3 \times \omega \times \rho}\right), \left(\frac{b}{R}\right)\right]. \quad (3.5)$$

Далее возможно вынести критерии оптимальности из критериев подобия, и окончательное функциональное уравнение для энергоемкости процесса молотковой дробилки предстает в виде:

$$\varepsilon = R \cdot \omega (\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5), \quad (3.6)$$

где под критериями π_1, \dots, π_5 подразумеваются критерии (3.4).

Анализ критериев подобия даёт общее представление о влиянии факторов на энергоемкость процесса измельчения.

В основе обоснования конструктивно-кинематических параметров молотковой дробилкой с оппозитной загрузкой зерна и исследования рабочего процесса данной конструкции находится анализ исследуемых критериев, как комплексных параметров, которые определяют изменение энергоемкости при измельчении материала в зависимости от комбинации факторов.

Учитывая, что критерии $\pi_2 = \frac{[\delta]}{[b]}$, и $\pi_5 = \frac{[b]}{[R]}$, ранее хорошо изучены множеством авторов [5, 11, 58, 60, 71, 75, 76, 79, 91, 114, 124, 129], соответственно для нас не представляют интереса.

При анализе двух факторов угловой скорости ω и радиуса ротора R установлено, что для разрушения упруго-вязких структур зерновок рабочая скорость концов молотков согласно источнику [67] должна превышать их предел прочности и соответствовать 55-75 м/с, что соответствует динамическому режиму нагружения.

Согласно авторам [68], при исследовании влияния способа подачи зерна в рабочую камеру дробилки (осевой или радиальный) было установлено, что измельчение зерна в соответствии зоотехническими требованиями с минимальным содержанием пылевидных частиц и наименьшими энергетическими затратами обеспечивается при линейной скорости рабочего органа 40 м/с и осевой подаче зерна.

Анализ технических характеристик современных молотковых дробилок для измельчения различного сырья показал, что окружная скорость молотков варьируется в достаточно широких пределах. Например, в работе Коношина И.В. указано, что при измельчении зерна ячменя наиболее эффективный режим работы молотковой дробилки соответствует окружной скорости молотков 95 м/с [109, 154].

Так как угловая скорость ротора находится в прямой зависимости с радиусом ротора R , корректировка которого ведет к увеличению линейной скорости ударных элементов, и изменение последнего параметра невозможно без дополнительных затрат, значение радиуса ротора примем за постоянную величину, равную $R = 0,0995$ м. Менять данный параметр не будем, так как его влияние размеров хорошо изучено множеством авторов [71, 117, 140, 156], и изменение линейной скорости возможно наиболее управляемым фактором угловой скорости ротора ω .

Соответственно, для расчета комплексного параметра X_1, X_2, X_3 , исходя из их конструктивных параметров, в качестве оптимального значения угловой скорости вращения ротора примем минимальное значение линейной скорости молотков, равную 40 м/с, и произведенными расчетами найдем необходимую угловую скорость дисков по формуле:

$$\omega = \frac{V_{min}}{R_l} = \frac{35}{0,0995} = 351,8 \text{ рад/с, (3359,44 об/мин.)};$$

$$\omega = \frac{V_{cp}}{R_l} = \frac{45}{0,0995} = 452,3 \text{ рад/с (4319,15 об/мин.)};$$

$$\omega = \frac{V_{max}}{R_l} = \frac{55}{0,0995} = 552,8 \text{ рад/с, (5278,85 об/мин.)}$$

Максимальное значение подачи исходного материала в левое и правое отверстие, сечение загрузочной горловины, примем равным $0,08 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$.

Для расчета комплексного параметра напряжение разрушения зерновки для пшеницы примем $\sigma = 11,58$ МПа, для ячменя $\sigma = 12,885$ Мпа [82].

Зерна основных зерновых культур пшеницы, исходя из таблицы 1.3, имеют плотность ρ , равную показателям от $1,2 \cdot 10^3$ до $1,5 \cdot 10^3$ кг/м³, ячменя – от $1,2 \cdot$

103 до $1,4 \cdot 10^3$ кг/м³, соответственно примем среднее значение для пшеницы $\rho = 1,35 \cdot 10^3$ кг/м³, для ячменя – $\rho = 1,3 \cdot 10^3$ кг/м³.

Расчетные значения полученных параметров и уровни их варьирования представлены в таблице 3.3; они дают представление о наиболее значимых факторах.

Таблица 3.3 – Кодированные обозначения основных параметров и уровни их варьирования

№ п/п	Наименование комплексного параметра	Кодированное обозначение	Уровни варьирования			Интервал варьирования λ_i	Зависимость кодированной переменной от натуральной
			нижний	основной	верхний		
			-1	0	+1		
1	$\frac{\rho \times (R \times \omega)^2}{\sigma}$	x_3	пшен. 1,401 ячм. 1,212	пшен. 2,316 ячм. 2,004	пшен. 3,458 ячм. 2,993	-	$x_3 = \frac{z_3 - z_{3i}}{\lambda_i}$
2	$\frac{[q_1]}{[q_2]}$	x_2	0,5 1 2	0,5 1 2	0,5 1 2	-	$x_2 = \frac{z_2 - z_{2i}}{\lambda_i}$
1	$\frac{q_1}{R^3 \times \omega \times \rho}$	x_1	пшен. $8,550 \times 10^{-5}$ $1,710 \times 10^{-4}$ ячм. $8,879 \times 10^{-5}$ $1,776 \times 10^{-4}$	пшен. $6,650 \times 10^{-5}$ $1,330 \times 10^{-4}$ ячм. $6,906 \times 10^{-5}$ $1,381 \times 10^{-4}$	пшен. $5,441 \times 10^{-5}$ $1,088 \times 10^{-4}$ ячм. $5,650 \times 10^{-5}$ $1,130 \times 10^{-4}$	-	$x_1 = \frac{z_1 - z_{1i}}{\lambda_i}$

Приведенные данные с расчетами критериев подобия:

$$\frac{\rho \times (R \times \omega)^2}{\sigma}, \quad \frac{q_1}{q_2}, \quad \frac{q_1}{R^3 \times \omega \times \rho'}$$

дают явную картину влияния факторов, из которых следует, что существенное влияние на энергоемкость процесса измельчения оказывают угловая скорость вращения ротора ω , подача исходного материала в левое отверстие q_1 и подача исходного материала в правое отверстие q_2 . Именно этими величинами мы будем изменять перечисленные выше критерии подобия.

Перечень приведенных величин, которые оказывают влияние на комплексные параметры факторов, включают в себя кинематические и

геометрические составляющие, характеризующие работу измельчителя, а также технологические характеристики обрабатываемого материала.

3.3. Отбор факторов для изучения в эксперименте

При исследовании теоретических и эмпирических аспектов процесса измельчения зерна важно правильно выбрать параметры этого процесса для решения задачи планирования эксперимента, что позволит учесть все основные аспекты технологического процесса, рационально выбрать факторы и минимизировать затраты для проведения экспериментальных исследований.

При оптимизации рабочего процесса необходимым условием является определение ключевых критериев, которые наиболее важны для исследуемых процессов.

Для разработки плана полнофакторного эксперимента, проведения экспериментальных исследований и получения уравнения регрессии по оптимизации конструктивно режимных параметров молотковой дробилки целесообразно отобрать наиболее значимые независимые и управляемые величины. Влияющие на критерии подобия величины (факторы) процесса измельчения примем следующие:

- подача исходного материала в левое отверстие $q_1, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$;
- подача исходного материала в правое отверстие $q_2, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$;
- угловая скорость вращения ротора ω , рад/с.

Сочетания факторов из комплексных параметров и уровни их варьирования наиболее значимо влияют на энергоемкость процесса измельчения, уровень звука, виброактивность дробилки и протекание процесса измельчения.

С целью выявления оптимальных технологических параметров проводили предварительный расчет факторов и уровней их варьирования, влияющих на

определяемые комплексные параметры. Их кодированные обозначения занесем в таблицу 3.4.

Рационально подобранные факторы являются управляемыми, контролируемые и независимыми и отражают все ключевые аспекты технологического процесса в дробилке горизонтального типа с оппозитной загрузкой. Благодаря этому можно планировать многофакторный эксперимент для исследования их влияния на энергоемкость процесса измельчения, а также оценивать значимость взаимодействий между различными факторами, что в свою очередь позволит улучшить процесс проведения лабораторного эксперимента.

Таблица 3.4 – Расчетные значения факторов и уровни их варьирования

№ п/п	Наименование фактора и единицы измерения, влияющего на определяемые параметры	Условное обозначение		Уровни варьирования			Интервал варьирования λ_i
		натуральное	кодированное	нижний	основной	верхний	
				-1	0	+1	
1	Подача исходного материала в левое отверстие, кг/с	q_1	X_1	0,00	0,04	0,08	0,04
2	Подача исходного материала в левое отверстие, кг/с	q_2	X_2	0,00	0,04	0,08	0,04
3	Угловая скорость вращения ротора, рад/с	ω	X_3	351,8	452,3	552,8	100,5

В результате анализа научных источников и теоретических данных, описывающих методы и оборудование для измельчения зерна, а также определения физико-механических свойств и упруго-вязких характеристик зерновок мятликовых культур, были установлены уровни и интервалы варьирования основных факторов для проведения полнофакторного эксперимента и оптимизации процесса размола.

В ходе предварительно проведенных исследований значения иных рассмотренных факторов оставались константными на протяжении процесса проведения всего эксперимента.

3.4. Описание экспериментальной установки для исследования процесса измельчения

Для исследования динамики рабочего процесса молотковой дробилки предлагаемым способом измельчения при различных параметрах подачи исходного материала в левое и правое отверстие на заданных компонентах зерна фуражных культур был изготовлен экспериментальный образец (рисунок 3.2) по патенту РФ № 2 746 586 [99].

На рисунке 3.2 представлен общий вид лабораторной установки измельчителя с оппозитной загрузкой зерна, где приведены основные комплектующие элементы.

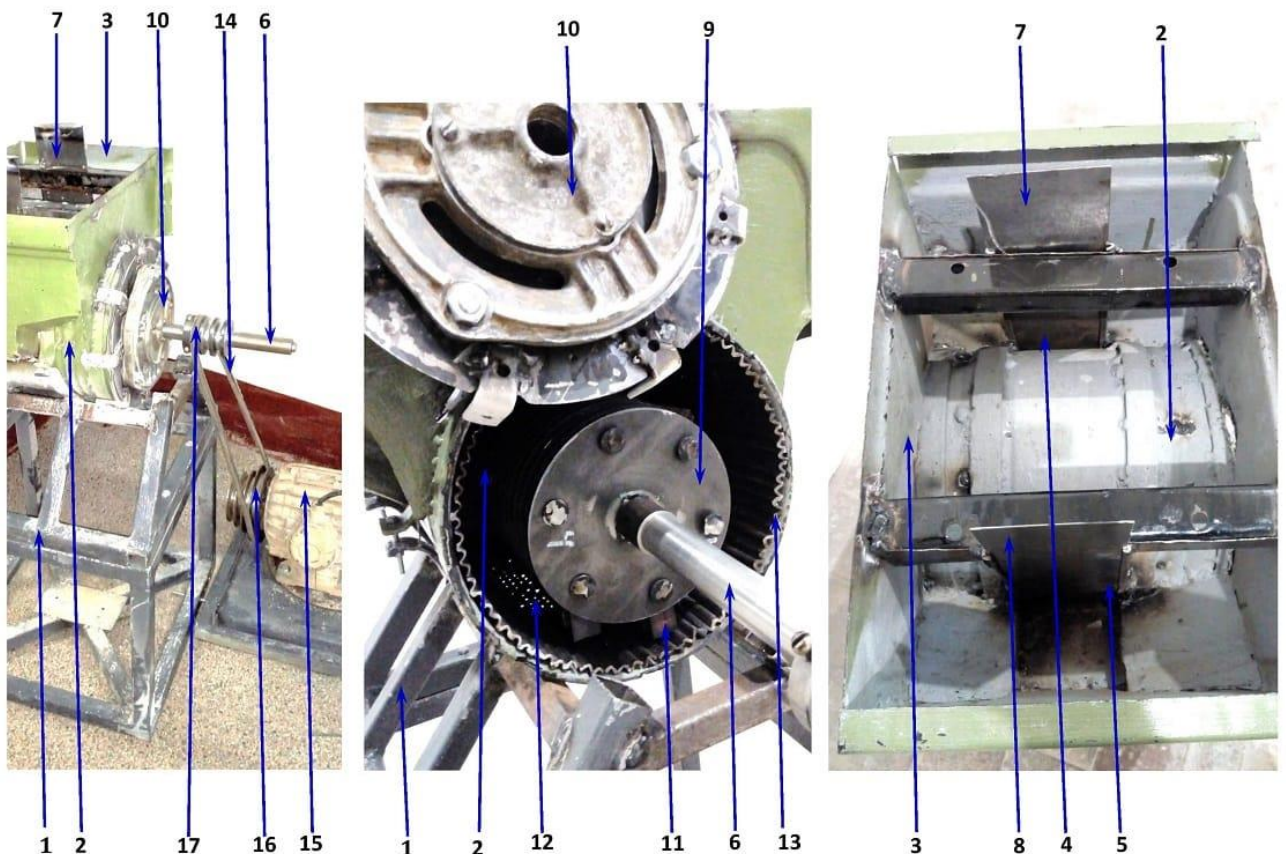


Рисунок 3.2 – Экспериментальный образец молотковой дробилки с оппозитной загрузкой зерна изготовлен по патенту РФ № 2746586

На металлическом основании (раме) 1 установлена дробильная камера, с размещенными на ней приводом, цилиндрической камерой измельчения с

ротором в сборе 2, в верхней части которого установлен бункер для зерна 3 с двумя разнонаправленными загрузочными горловинами. В нижней части бункера 3 выполненные разнонаправленные и соединяющиеся с камерой измельчения 2 горловины 4 и 5, расположенные в горизонтальной плоскости симметрии ротора, проходящей через его ось вращения, совпадающей с осью вращения приводного вала 6. При этом обе горловины имеют одинаковое выходное сечение и снабжены регулировочными устройствами. Регулировочные устройства представляют из себя металлические пластины – шиберы 7 и 8 для изменения проходного сечения горловины.

Внутри камеры измельчения размещен горизонтально расположенный ротор, состоящий из набора дисков 9, закрепленных на приводном валу 6 (привод не показан). Полуось ротора барабана измельчителя 6 вращается в двух подшипниковых узлах 10, закреплённых на корпусе барабана и смонтированных на общей раме. Ротор установки межопорный. Подшипники 10 устанавливаются на вал ротора, обеспечивая плотную посадку с натягом. В дисках 9 на осях 18 закреплены концами молотки 11, с возможностью свободного вращения вокруг указанных осей. В нижней части камеры измельчения установлено решето 12, а на остальной части внутренней поверхности корпуса 2 – зубчатые деки 13.

Для улучшения вероятности многократного соударения молотков с материалом, поступающим на измельчение, в камере дробления установлена съемная конструкция отбойных зубчатых дек 13 с секциями (рисунок 3.2)

Основные технические характеристики лабораторной установки молоткового измельчителя фуражного зерна с оппозитной загрузкой представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Техническая характеристика лабораторной установки молотковой дробилки с оппозитной загрузкой материала

Наименование показателя и единица измерения	Величина
Ширина камеры измельчения, мм	275
Внутренний диаметр камеры измельчения, мм	220

Количество отбойных дек, шт	76
Объем камеры измельчения с учетом деки, м ³	0,011 (10,93 л)
Длина ротора, мм	220
Диаметр ротора, мм	165
Радиус описываемый концами молотков мм	99,5
Количество секций дисков ротора	22
Частота вращения ротора, об/мин	5 670, 6 960, 7 980, 10 020
Окружная скорость молотков, м/сек	62 - 111
Конструктивные размеры молотка, мм	52×20×4
Масса молотка, кг	0,029
Количество молотков на роторе, шт	132
Площадь проходного сечения левой и правой горловин, м ²	0,81
Мощность электродвигателя, кВт	1,5
Объем зернового приемного бункера, м ³	0,019
Габаритные размеры:	
- Длина, мм	430
- Ширина, мм	350
- Высота, мм	870
Производительность молотковой дробилки, т/ч	0,200

Ротор приводится в движение при помощи трехфазного асинхронного электродвигателя АИР 80А2 мощностью 1.5 кВт, синхронная частота вращения поля статора 3000 об/мин., скорость вращения вала 2850 об/мин. Передача крутящего момента на ротор осуществляется через клиноременную передачу 14.

Механический привод обеспечивает требуемую частоту вращения ротора для бесперебойного процесса измельчения выбранных зерновых компонентов. Частота вращения ротора лабораторного образца регулируется выбором соответствующего диаметра профиля ручья ведущего шкива, при этом обороты асинхронного двигателя варьируются в широком диапазоне преобразователем частоты KIPPRIBOR серии AFD – M055.43 мощностью до 5.5 кВт.

Дробилка с оппозитной загрузкой фуражного зерна работает следующим образом.

Зерновой материал под действием собственного веса (самотеком), а также под воздействием вибрации, передающейся от дробилки, подается по горловинам 4 и 5 в камеру измельчения 2, где, попадая под один из рядов молотков 11, отбрасывается ими на деку 13, в результате удара о которую дробится. Сам же молоток 11 в результате удара о зерно отклоняется на определенный угол, но затем под действием центробежных сил принимает обычное положение. Одновременно другой ряд молотков ударяет зерновой материал, поступающий из противоположно размещенной горловины, расположенной в горизонтальной плоскости симметрии ротора, проходящей через его ось вращения, отклоняясь на равнозначный угол. Этот ряд молотков тоже отклоняется на угол α и затем центробежные силы снова возвращают его в обычное положение. Так происходит до тех пор, пока измельчаемый материал не будет измельчен до степени, при которой он пройдет сквозь решето и будет выведен из дробилки. Одновременное отклонение рядов молотков, противоположно расположенных на роторе дробилки, не приводит к потере балансировки ротора и повышению уровня вибраций дробилки.

Подача материала на измельчитель регулируется вертикальным перемещением регулировочных устройств, представляющих из себя металлические пластины – шиберы 7 и 8 для изменения проходного сечения горловины.

Изменение зазора выходного сечения горловин осуществляется посредством перемещения регулировочных устройств металлических пластин для изменения проходного сечения горловины (см. рисунок 3.2).

Клиноременная передача 14 передает вращательное движение от электродвигателя 15 к ротору дробилки, состоящему из набора дисков 9 и вала 6.

Комбинированный шкив, размещенный на электродвигателе 16, предоставляет возможность использования в четырех различных скоростных режима работы ротора.

В таблице 3.6 представлены основные изменения линейной скорости в зависимости от диаметра ручья ведущего шкива. Вал ротора подвижного шкива

17 получает вращение от передачи контрпривода с учетом номинальной скорости асинхронного электродвигателя и имеет четыре частоты вращения (5 670, 6 960, 7 980, 10 020 об/мин.), которые, в свою очередь, зависят от выбранного диаметра рабочего профиля ручьев шкива на электродвигателе.

Таблица 3.6 – Зависимость частоты вращения вала контрпривода подвижного шкива от выбора диаметра рабочих ручьев на шкиве электродвигателя

Параметры	1	2	3	4
Число оборотов ведущего вала, об/мин	3 000	3 000	3 000	3 000
Диаметр ведущего шкива (эл. двигателя), мм	71,8	87,8	100,8	126,5
Диаметр ведомого шкива (ротора), мм	37,9	37,9	37,9	37,9
Значение передаточного отношения	1,89	2,32	2,66	3,34
Число оборотов ведомого шкива, об/мин	5 670	6 960	7 980	10 020
Угловая скорость, рад/с	593,76	728,85	835,66	1 049,29
Диаметр окружности, описываемой концами молотков, мм	211	211	211	211
Линейная скорость молотков, м/с	62,94	77,26	88,58	111,23

Следует учесть, что подобранная скорость для разрушения структуры прочностной оболочки зернового компонента в результате попадания на деку от удара рабочего органа и полученных дефектов, является разрушающей.

Таким образом, экспериментальная установка для проведения лабораторных исследований позволяет управлять значениями факторов, варьировать их величинами в рамках допустимых значений.

3.5. Процесс измельчения как многокритериальная задача и объект проведения активного эксперимента

Исследование, направленное на поиск математической модели процесса измельчения зерновых компонентов, предполагает проведение следующего ряда этапов:

- 1) детальное изучение и анализ самого объекта исследования;

2) составление плана проведения экспериментальных исследований, определение условий проведения эксперимента, методов измерения, обработки и сбора данных;

3) проведение экспериментальных исследований, сбор данных, полученных в результате измерения и наблюдения за исследуемым процессом в заданных условиях;

3) анализ и обработка полученных данных для выявления закономерностей и зависимости между параметрами процесса, разработка математической модели процесса на основе полученных результатов:

3.1) определение параметров модели и вычисление коэффициентов регрессии в уравнении модели используя методы математической статистики и анализа данных;

3.2) проверка адекватности полученной модели полиномиальной регрессии, которая описывает зависимость между переменными с помощью статистического критерия коэффициента детерминации;

3.3) анализ полученных результатов математической модели, ее качества и применимости для решения поставленных задач;

4) применение математической модели для прогнозирования поведения объекта исследования, управления процессом и решения практических задач, определения оптимальных параметров и режимов работы.

5) оптимизация процесса с использованием полученной математической модели.

Экспериментальные исследования рабочего процесса молотковой дробилки с целью выявления оптимального сочетания параметров и режимов проводили методом планирования экспериментов. Данный метод является эффективным инструментом построения математических моделей для различных процессов, позволяющим сократить время и ресурсы, затрачиваемые на экспериментальную работу, а также улучшить качество исследовательской деятельности [171].

В процессе выбора факторов и уровней их варьирования учитывались результаты исследований рабочего процесса дробилки молоткового типа.

Требования к факторам включают отсутствие корреляций между ними и их совместимость.

Перед тем как провести опыт, необходимо составить матрицу планирования эксперимента, которая содержит некоторые комбинации факторов. Но изменение уровней в ходе экспериментальных исследований способствует его усложнению и повышает стоимость фактических затрат.

Для изучения влияния двух или более факторов на некоторую зависимую переменную, в целях снижения общего числа опытов и ускорения процесса анализа данных, были разработаны планы эксперимента второго порядка, из которых наиболее популярным в настоящее время является план Бокса-Бенкена, представляющий разновидность симметричного некомпозиционного плана, удобный для практического применения. При использовании указанного плана количество опытов снижается с 27 до 15, что является значительным улучшением, и способствует упрощению и удешевлению проведения экспериментальных исследований [2, 18, 150, 152, 153].

Бокс и Бенкен разработали ценную группу для практического применения некомпозиционных планов второго порядка, где количество факторов варьируется в диапазоне от 3 до 7. Они являются выборками строк из полного факторного эксперимента, представляющего вид 3^k (где $k = 3$), в которых каждый фактор варьируется тремя уровнями: +1, 0 и -1, примерная схема варьирования отображена на рисунке 3.3. В случае центральных композиционных ротатабельных планов каждый фактор представлен на 5 уровнях.

Характерной особенностью, свойственной некомпозиционным планам, является наличие в строках матрицы планирования большого числа факторов на основном нулевом уровне. Это способствует упрощению вычисления коэффициентов, определяющих связь между зависимой и независимой переменными в модели полиномиальной регрессии.

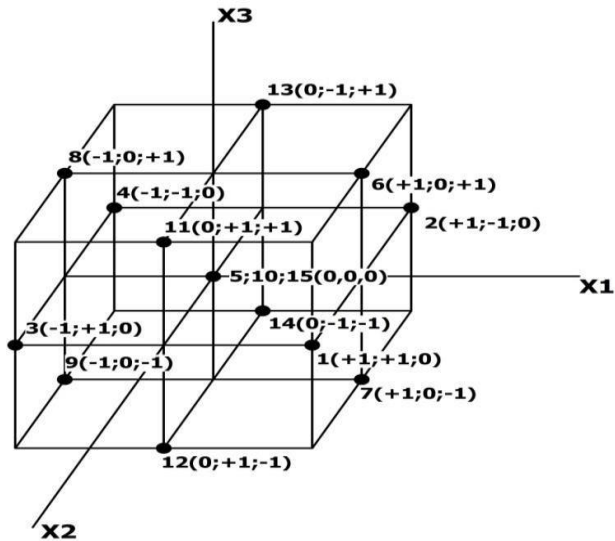


Рисунок 3.3 – Некомпозиционный трехуровневый план второго порядка Бокса-Бенкина (для трех факторов)

Несмотря на то, что существуют некоторые критерии для оценки эффективности дробилки, эти критерии могут быть противоречивыми, и улучшение одного показателя может привести к снижению другого. Поэтому важно учитывать несколько показателей при оптимизации процесса. В частности, многие научные исследования акцентируют внимание на энергоёмкости процесса дробления в процессе оценки их эффективности.

В связи со сказанным для анализа совместного воздействия основных комплексных параметров и выбранных факторов на качественные и числовые показатели процесса дробления и основные изучаемые величины, в качестве которых приняты виброактивность и энергоэффективность, для дальнейшего исследования выбран план полного факторного эксперимента типа ПФЭ 3^3 .

Общий вид матрицы для плана Бокса-Бенкина представлен в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – План трехфакторного эксперимента ПФЭ 3^3

№ эксперимента	Факторы			Взаимодействие						Выходные величины
	X_1	X_2	X_3	X_{12}	X_{13}	X_{23}	X_1^2	X_2^2	X_3^2	
1	-1	-1	0	+1	0	0	+1	+1	0	-
2	+1	-1	0	-1	0	0	+1	+1	0	-

3	-1	+1	0	-1	0	0	+1	+1	0	-
4	+1	+1	0	+1	0	0	+1	+1	0	-
5	-1	0	-1	0	+1	0	+1	0	+1	-
6	+1	0	-1	0	-1	0	+1	0	+1	-
7	-1	0	+1	0	-1	0	+1	0	+1	-
8	+1	0	+1	0	+1	0	+1	0	+1	-
9	0	-1	-1	0	0	+1	0	+1	+1	-
10	0	+1	-1	0	0	-1	0	+1	+1	-
11	0	-1	+1	0	0	-1	0	+1	+1	-
12	0	+1	+1	0	0	+1	0	+1	+1	-
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-

В целях исключения систематических погрешностей, связанных с влиянием внешних факторов, способствующих получению недостоверных результатов, в процессе проведения экспериментальных исследований, проводим рандомизацию опытов.

При планировании и в процессе анализа данных, полученных в результате проведения эксперимента, использовали инженерное математическое программное обеспечение – программу «PTC Mathcad 15.0».

Рассмотрев многочисленные исследования авторов [13, 17, 20, 58, 63, 67, 76, 80, 83, 84, 110, 115, 118, 144, 150, 151, 152], посвященных процессу разрушения сыпучих материалов, мы убедились в необходимости применения методологических подходов методики [137], которая применима для проведения лабораторных исследований процесса измельчения зерновых культур и оптимизации технологического процесса по критериям оптимизации энергозатрат и соблюдения стандартов качества конечного продукта.

В дополнение к данной методике требуется рассмотреть выбор искомых величин по величине вибрации и шума, которые не были затронуты автором [137].

При проведении диагностики как в России, так и за рубежом широко используют параметры вибрации [8, 20, 171].

Измельчители фуражного зерна на сельскохозяйственных предприятиях должны обеспечивать допустимый уровень вибрации. Международные стандарты ИСО, а также российские стандарты в области вибробезопасности в качестве основной величины принимают только виброускорение. Процедура оценки вибрационного воздействия осуществляется посредством измерения среднеквадратичного значения виброускорения для каждой выбранной операции. В связи с этим перед нами возникает задача измерения уровня вибрации по параметрам виброускорения (параметров общей вибрации), которые определяют данный уровень в следующих научных работах и нормативных актах [12, 15, 24, 34, 35, 38, 39, 40, 46, 47, 48, 49, 56, 57, 69, 102, 104].

Нормируемым показателем вибрации на рабочем месте является эквивалентное скорректированное виброускорение за рабочую смену. Все виды технологической вибрации, касающейся нашей темы исследования, сведены в одну категорию 3а по СанПиН 2.2.4.3359.

Работа в условиях воздействия локальной вибрации с текущими среднеквадратичными уровнями, превышающими настоящие санитарные нормы более чем на 12 дБ (в 4 раза) по интегральной оценке согласно СанПиН 2.2.4.3359-16, не допускается.

Таким образом, для оценки вибрации наиболее приемлем параметр виброускорения.

Следующий вопрос, который возникает перед нами в процессе проведения эксперимента, это оценка уровня шума.

Уровнем звука L_A (дБ А) называется суммарный уровень звукового давления звуков всего спектра частот, воспринимаемого шумомером и замеренного на шкале «А» с учетом слухового восприятия шума человеком. Допустимые уровни звукового давления в октавных полосах частот, уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах в соответствии с нормативным уровнем звука на рабочих местах, регулируемого источниками [23, 31, 56, 101, 102, 103] не должны превышать 85 дБА.

Проведенными предварительными исследованиями, а также в результате анализа работ, посвящённых аналогичным исследованиям, было выявлено, что в рамках выбранного факторного пространства устанавливаемые функции отклика для построения модели полиномиальной регрессии для реальных величин могут быть выражены полиномиальными уравнениями второго порядка [20, 83, 129, 137, 138, 152, 154].

В контексте экспериментальной модели факторы оптимизации процесса измельчения зерновых компонентов могут быть выражены в виде полиномов второй степени, представленных в виде уравнений регрессии на основе планов второго порядка. Уравнение математической модели полиномиальной регрессии принимает следующий вид:

$$y(x_i, b_i) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^n b_{ij} x_i x_j \quad (3.8)$$

где y – критерий оптимальности;

$x_1, x_2, \dots, x_n \dots$ – закодированы переменные в бинарный формат (факторы процесса) в количестве n ;

b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} , – коэффициенты, представляющие собой параметры модели, вычисляемые на основе обработки экспериментальных данных.

В результате вышеизложенного для всестороннего исследования процесса измельчения зерна фуражного назначения на лабораторном образце необходимо получение по результатам каждого эксперимента информации о следующих показателях:

1) требуемой общей мощности при осуществлении процесса измельчения за минусом мощности холостого хода, измеряемого как показатель энергоёмкости процесса дробления с учетом степени измельчения материала (λ) ед. степ. изм. (3.9), Э, кВт

$$\mathcal{E} = \frac{A_{уд.}}{\lambda} = \frac{N_{хх} + N_{изм}}{Q \cdot \lambda}, \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{т} \cdot \text{ед. ст. изм.},$$

где λ – степень измельчения продукта размолла, ед. ст. изм.;

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

где $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр зернового компонента;

2) производительности измельчителя Q , заданной или достигнутой;

3) степени измельчения зерна, где $\lambda = d_{\text{экв}} / M$,

где $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр зернового компонента;

M – модуль размола;

4) модуле размола исходного материала M , как средневзвешенном размере частиц полученной дерти;

5) средневзвешенном коэффициенте вариации модуля размола $v = \sigma / M$, (%), где σ – среднеквадратическое отклонение величины M ;

6) относительном (по массе) количестве целых зерен Π (%), как остатке на решете с диаметром отверстий 3-5 мм;

7) параметрах вибрации, в качестве основной величины использовать амплитуду виброускорения

$$a_B = s \cdot (2\pi \cdot \omega_k)^2 / 10^3 = (2\pi \cdot \omega_k)^2 \times A, \quad (3.10)$$

где ω_k – частота колебаний, Гц;

s – виброперемещение, мм;

A – амплитуда колебаний, мм;

8) уровне шумовой обстановки, возникающем в процессе дробления материала, распространяющегося в воздушной среде помещения на расстоянии 1 м, по показателю уровня звука L_A , (дБА) (общий уровень звукового давления во всем спектре частот), и вычисляется по формуле:

$$L_A = 20 \lg(p_A/p_0), \quad (3.11)$$

где p_A – скорректированное по шкале «А» шумомера звуковое давление, Па.

Таким образом, по результатам проведенных экспериментальных исследований мы получим оценки перечисленных реальных изучаемых величин.

После анализа и статистической обработки информации, полученной по результатам эмпирических исследований, необходимо построение математических моделей полиномиальной регрессии для следующих показателей:

1) энергоёмкости процесса измельчения, учитывая достигнутую степень измельчения (Дж/(кг*λ))

$$\mathcal{E} = \frac{N}{Q \cdot \lambda} = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

2) модуля размола (мм)

$$M = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

3) коэффициента вариации модуля размола (%)

$$v = f_3(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

4) относительного (по массе) количества целых зерен (%)

$$\mathcal{C} = f_4(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

5) анализа виброускорения на корпусе дробилки (м/с²)

$$a_B = f_5(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

6) анализа шума, возникающего в процессе дробления материала, распространяющегося в воздушной среде помещения на расстоянии 1 м, по уровню звука (общий уровень звукового давления во всем спектре частот) L_A , (дБА)

$$L_A = f_6(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Однако анализ технологических и зоотехнических аспектов измельчения зерна позволяет свести данную многокритериальную задачу к однокритериальной, используя метод выделения главного критерия. При этом другие критерии переводятся в ограничения [137].

Оптимизация процесса измельчения фуражного зерна для проведения лабораторных исследований на дробилке с оппозитной загрузкой сформулирована в виде условной оптимизации:

$$\mathcal{E}(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min; \quad (3.12)$$

$$[M_1] \leq M(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq [M_2]; \quad (3.13)$$

$$0 \leq v(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq [v]; \quad (3.14)$$

$$0 \leq \Psi(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq [\Psi]. \quad (3.15)$$

Кроме того, отдельными критериями оптимальности являются критерии, определяющие виброактивность и шумовые характеристика дробилки:

$$a_B(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min; \quad (3.16)$$

$$L_A(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min, \quad (3.17)$$

где $[M_1]$, $[M_2]$ – допустимые значения модуля размола, определяемые нормативными документами;

$[v]$ – допустимое значение коэффициента вариации размера частиц, определяемые нормативными документами.

Сформулированная задача многокритериальной оптимизации (3.12-3.17) является слишком сложной. Попробуем ее упростить на основе перевода критериев (3.16) и (3.17) в ограничения.

К сожалению, сейчас не существует нормативных документов, ограничивающих виброактивность при виброускорении элементов конструкций дробилок. Поэтому критерий a_B перевести в ранг ограничений невозможно. Предлагаем, однако, другие соображения.

Критерий виброактивности дробилки a_B (3.16) влияет, как показано в теоретической главе, в первую очередь на непроизводительные затраты энергии в дробилке. Поэтому критерии $\Xi(x_i)$ и $a_B(x_i)$ в некоторой степени дублируют друг друга. В связи с чем при решении задачи оптимизации критерий $a_B(x_i)$ может быть упущен без особого ущерба на достоверность задачи оптимизации.

Критерий уровень звука L_A может быть переведен в ранг ограничений, поскольку ГОСТ 12.1.003-83 регламентирует уровень шума, который не должен превышать 85 дБ А.

Поэтому окончательно задачу оптимизации сформулируем в следующем виде:

$$\Xi(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min; \quad (3.18)$$

$$[M_1] \leq M(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq [M_2]; \quad (3.19)$$

$$0 \leq v(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq [v]; \quad (3.20)$$

$$\zeta(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq [\zeta]; \quad (3.21)$$

$$L_A(x_1, x_2, \dots, x_n) < [L_A]. \quad (3.22)$$

При реализации многофакторного эксперимента необходимо получение уравнений регрессии в кодированном виде переменных предикатов (контролируемых факторов), где в качестве выходных характеристик были приняты следующие величины:

- Y_1 — Энергоемкость процесса дробления Э;
- Y_2 — Модуль размола М;
- Y_3 — Коэффициент вариации модуля размола v ;
- Y_4 — Относительное (по массе) количество целых зерен $\zeta(\%)$;
- Y_5 — Виброактивность механической системы в амплитуде виброускорения a_B ;
- Y_6 — Уровень звука L_A .

3.6. Описание приборной базы для исследования и оценка точности приборов

Процесс экспериментальных исследований включал комплекс мероприятий, направленных на получение измерений и определение значений следующих величин:

- время продолжительности проведения эксперимента;

- количество полученного продукта размола по фракциям после просева на калиброванных ситах за время опытов;
- модуль размола измельченного продукта;
- затраченная мощность на процесс измельчения;
- количество целых зерен в измельченном продукте;
- уровень звука (октавный уровень звукового давления);
- амплитуда виброускорения (вибрации).

Методика лабораторных исследований включала в себя подготовку рабочего органа к вращению на высоких скоростях, посредством статической и динамической балансировки объекта вращения, и измерение параметров вибрации перед началом эксперимента.

Для получения достоверных данных при измерении виброакустических параметров и предотвращения вибрации, вызванной смещением центра тяжести системы, на начальном этапе лабораторных исследований было произведено соединение металлических дисков ротора с валом посредством образования неразъемного сварного соединения металлических изделий ротора молотковой дробилкой и выполнена проверка биения ротора на стенде балансировки для устранения дисбаланса вращающейся части измельчителя.

На следующем этапе лабораторных исследований были определены величина и направление дисбаланса вращающейся системы. Для устранения дисбаланса и вибрации было проведено выравнивание его массы и центрирование относительно оси вращения ротора дробилки путем установки двух корректирующих масс на внешней поверхности дисков торцевых плоскостей (рисунок 3.4).

Выявленный дисбаланс ротора был устранен сварным соединением балансировочных грузов (рисунок 3.5) к поверхностям дисков, находящихся в плоскости коррекции, соответствующих по величине массы балансируемого груза.



Рисунок 3.4 –
Балансировка ротора



Рисунок 3.5 – Установка корректирующих масс

Управление электродвигателем и частоту вращения ротора изменяли преобразователем частоты KIPPRIBOR серии AFD – M055.43B 5.5 кВт, снабженным устройством для реверсивного включения (рисунок 3.6), с дальнейшим замером частоты вращения при помощи бесконтактного лазерного тахометра RGKTM-10, при помощи которого установлено направление вращения ротора экспериментального образца дробилки слева на право, посредством изменения направления тока ротора и статора в обмотке асинхронного двигателя, и на протяжении проведения экспериментов не изменяли.

Частоту вращения (количество оборотов в единицу времени) вращающегося вала ротора во время проведения опыта измеряли при помощи бесконтактного лазерного тахометра RGK TM-10 (рисунок 3.7). Он позволяет проводить замеры в диапазоне от 10 до 99999 об/мин., с точностью $\pm(2+0,04\%)$. Экспериментальная конструкция молотковой дробилки с оппозитной загрузкой зерна позволяет в необходимых пределах варьировать значениями факторов, влияющих на исследуемый процесс, изменяя частоту вращения ротора, зазор проходного сечения правой и левой горловин.



Рисунок 3.6–
Преобразователь
частоты KIPPRIBOR
серии AFD –
M055.43B



Рисунок 3.7–
Бесконтактный
лазерный
тахометр RGK
TM-10



Рисунок 3.8– Трехфазный
электронный счетчик Меркурий 230

При проведении эксперимента мощность, затраченную на процесс измельчения зерна, определяли при помощи трехфазного электронного счетчика Меркурий 230 (рисунок 3.8) с погрешностью измерения не более 0,5 %.



Рисунок 3.9 – Комплект лабораторных сит СПЛП
30 № 1, № 2, № 3, № 4, № 5, № 6



Рисунок 3.10 – Весы M-ER
AFU 6 кг ценой деления 0,1 г

Распределение полученного готового продукта по фракциям с различным размером частиц и его масса определялась просеиванием при помощи комплекта

лабораторных (калиброванных с поверкой) сит СПЛП 30 № 1, № 2, № 3, № 4, № 5, № 6 (рисунок 3.9) с отверстиями \varnothing 1, 2, 3, 4, 5, 6 мм и поддона, предназначенных для проведения лабораторных опытов, методом ситового анализа. Порции измельченного продукта после проведения лабораторных опытов определяли на электронном весовом оборудовании M-ER AFU с ценой деления 0,1 г. (рисунок 3.10).

Ориентировочная оценка шумовой обстановки, анализ шума, возникающего в процессе дробления материала, измеряли по принятому параметру уровня звука L_A , (дБА), определяемого как суммарный уровень акустического давления во всем диапазоне частот (октавный уровень звукового давления L), фиксирующийся измерительным прибором – шумомером с функцией регистратора Мегеон – 92140 (рисунок 3.11), замеряемый по категории «А» октавный уровень звуков.

Для получения полной информации о акустических характеристиках измельчителя наиболее информативной точкой для снятия акустических характеристик является точка установки измерительного прибора от источника уровня звука на расстоянии 1 м от камеры измельчения дробилки. Дальность расстояния установки шумомера замеряли дальномером CONTROL smart 30 plus (рисунок 3.12). Для более полного отображения информации барабан измельчителя был изготовлен из тонкого материала для расширения границ диапазона акустических характеристик, учитывая наличие демпфирующих свойств материалов и более полной фиксации выходных параметров шума.

Проведение вибродиагностических исследований объектов подразумевает установление места для получения наиболее полной информации о объекте и характеристике вибрации, а также методов крепления датчика ускорения (акселерометра) и линейного перемещения таким образом, чтобы обеспечить наиболее точные результаты измерений диагностической информации. Для проведения лабораторных испытаний, при неоднородной толщине корпуса дробилки наилучшей точкой для контроля вибрации будет являться место нахождения в пределах корпуса камеры измельчения.

Следовательно крепление пьезоэлектрических датчиков ускорения и линейного перемещения для снятия характеристик уровня вибрации, будет осуществляться с информативной точки, находящейся на внешней стороне камеры измельчения.



Рисунок 3.11–Цифровой шумомер с функцией регистратора Мегеон–92140



Рисунок 3.12–Дальномер CONTROL smart 30 plus



Рисунок 3.13–Виброметр Мегеон – 09631

Уровень вибрации устанавливали измерительным аналитическим прибором вибрации – виброметром Мегеон – 09631 (рисунок 3.13), предназначенным для вибродиагностики. Он содержит дисковый наконечник с магнитом, предназначенным для крепления к металлическим поверхностям, в котором расположен датчик ускорения (3 оси) и датчик линейного перемещения. Результаты измерений заносим в журнал экспериментальных исследований.

Время продолжительности проведения каждого в отдельности опыта составляет около 5 минут, среднее значение результатов измерений за период опытов фиксировали и заносили в журнал экспериментальных исследований.

Статистическая и графическая обработка данных, полученных в процессе проведения экспериментов, проводили на персональном компьютере с применением программы для экономико-статистических расчетов «Microsoft Excel», инженерного математического программного обеспечения – программы «PTC Mathcad 15.0» и других пакетов прикладных программ для ЭВМ.

3.7. Методика обработки результатов эксперимента

В инженерном математическом программном обеспечении «PTC MathCAD15.0» имеется комплекс функций для статистической обработки информации, в частности функция «boxbehnken(n)» используется для создания n – факторной матрицы плана Бокса-Бенкена, который является 3-уровневым планом для моделирования количественных факторов.

Таким образом, для создания матрицы планирования эксперимента в среде MathCAD будем применять матрицу плана, используя функцию «boxbehnken(n)», для моделирования количественных факторов с тремя уровнями, которая отображает зависимость математического ожидания отклика от факторов матрицы планирования Бокса-Бенкена. Листинг которой представлен на рисунке 3.14.

В среде MathCAD матрица проектирования Вох-Behnken, включает следующие данные:

– "Run"(Прогоны) — указывающая порядковый номер прогона эксперимента;

– "Block" (Блоки) — определяет номер блока для набора экспериментов.

Значение "Block", в свою очередь, является совокупностью экспериментальных условий, которые считаются относительно однородными.

X := boxbehnken(3) =

	0	1	2	3	4
0	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"
1	1	1	-1	-1	0
2	2	1	1	-1	0
3	3	1	-1	1	0
4	4	1	1	1	0
5	5	1	-1	0	-1
6	6	1	1	0	-1
7	7	1	-1	0	1
8	8	1	1	0	1
9	9	1	0	-1	-1
10	10	1	0	1	-1
11	11	1	0	-1	1
12	12	1	0	1	1
13	13	1	0	0	0
14	14	1	0	0	0
15	15	1	0	0	0

Рисунок 3.14 – Листинг плана матрицы Бокса-Бенкена.

Также в матрице присутствуют строки "A","B","C", определяющие кодированные уровни факторов X_1 , X_2 , X_3 или реальные их значения, которые устанавливают уровень каждого фактора.

Для выполнения регрессивного анализа будем использовать следующие функции программного обеспечения «PTC MathCAD 15.0» [77, 126, 138]:

- `polyfitc` — отображает зависимость и вычисляет коэффициенты многомерной полиномиальной регрессии, при аргументах полинома второй степени.

- `polyfitstat` — отображает зависимость и производит результаты статистического анализа с помощью многомерной полиномиальной регрессии.

Функция «`polyfitc`», применяемая для работы с коэффициентами регрессии, обладает способностью извлекать коэффициенты регрессии из аргументов полиномов второй степени, с учётом выходных данных матрицы, с результатами измерений Y_m . В частности, она способна отображать зависимость каждого коэффициента регрессии, а также рассчитывать параметры модели и выходные

данные для регрессии и точек данных, используемых для построения поверхности многомерной полиномиальной регрессии.

Функция «polyfitc» в среде MathCAD представляет собой метод поиска наименьших квадратов коэффициентов полиномиальной регрессии. Коэффициенты регрессии рассчитываются путем минимизации суммы квадратов остатков, между данными и моделью регрессии. Для этого используется множество точек данных и степень полинома, задаваемая пользователем. Результатом функции являются коэффициенты полинома, которые можно использовать для получения оценок значений функции в других точках.

Таким образом, коэффициенты регрессии многомерного полинома будем рассчитывать, используя функцию «polyfitc (X, Y, n)», которая отображает зависимость коэффициентов регрессии для поверхности многомерной полиномиальной регрессии, аппроксимирующих результаты экспериментальных данных, записанные в матрице Y_m , к данным, содержащимся в матрице X_n . Коэффициенты полинома в данном случае могут быть заданы его членами, которые указаны в соответствующих входящих и выходящих величинах матриц и строк пересечения при аппроксимации полиномов.

Матрица, отображающая результаты использования функции «polyfitc (X, Y, n)», содержит элементы, приведенные в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Данные, содержащиеся в столбцах матрицы, в результате применения функцией «polyfitc (X, Y, n)»

Столб	Обозначение	Описание
0	"Term"	Наименование коэффициента полинома для каждого члена в полиномиальной регрессии, включаемого в отчет
1	"Coefficient"	Коэффициенты регрессии при соответствующем члене полинома (от старшей степени к младшей). Значение коэффициентов под строкой

		"Coefficient" вычисляется с помощью полиномиальной регрессии на основе метода наименьших квадратов.
2	"StdError"	Стандартная ошибка, при оценке коэффициента регрессии, при соответствующем члене полинома. Стандартная ошибка (StdError) вычисляется как корень из среднеквадратической ошибки оценки регрессии
3	"95 CI Low"	Нижние границы 95%-ого доверительного интервала для соответствующего коэффициента полинома. Нижняя граница доверительного интервала используется для создания доверительного интервала соответствующего коэффициента, с использованием значения статистики t-критерия с соответствующей доверительной вероятностью и степенями свободы
4	"95 CI High"	Верхняя границы 95%-ого доверительного интервала для коэффициента регрессии отображает верхнюю границу доверительного интервала для соответствующего коэффициента, используя значение статистики t-критерия, с соответствующей доверительной вероятностью и степенями свободы
5	"VIF"	Переменная инфляции дисперсии (множитель дисперсии) отражает, насколько сильно каждая переменная коррелирует с остальными переменными в модели и показывает, насколько сильно этот член полинома взаимосвязан с остальными. Данный показатель используется для определения степени мультиколлинеарности (зависимости между независимыми переменными). Коэффициент инфляции (VIF), или средняя квадратическая ошибка приближения, вычисляется из множественной

		регрессии, используя отношение дисперсии оценки коэффициентов независимых переменных к его ожидаемому значению, при независимости всех переменных
6	"Т"	Тестовая статистика t-критерия с распределением Стьюдента предназначена для оценки значимости соответствующего коэффициента регрессии. Статистика t-критерия вычисляется как соотношение оценки коэффициента к его стандартной ошибке. Для каждого коэффициента в таблице указана стандартная ошибка, на основе которой можно определить Критерий Стьюдента, т.е. значимость каждого коэффициента полинома (если отношение коэффициента к его стандартной ошибке больше единицы, то коэффициент считается значимым)
7	"Р"	Р-значение — уровень значимости для данного коэффициента, который определяет вероятность того, что наблюдаемое значение, полученное на основе t-статистики, является случайным. Уровень значимости (P-value) вычисляется с помощью t-теста для проверки значимости оценки коэффициента

Аргументами в данной функции являются [72, 77]:

– X_n — матрица плана или матрица, в которой каждый столбец представляет независимую переменную. Каждый столбец X должен иметь совместимые единицы измерения;

– Y_m — вектор или матрица с результатами измерений или моделирования, где каждая строка содержит результаты отдельного выполнения или точку данных, определенную в X . Если строки содержат неодинаковое число реплик,

необходимо заполнить пустые элементы Y значениями NaN . Элементы Y должны иметь совместимые единицы измерения;

– n — целое число, задающее степень полинома. Оно должно быть меньше общего числа точек данных: $1 \leq n \leq \text{length}(Y) - 1$. В противном случае задача окажется под ограничением, которое не позволяет получить уникальное решение.

Строки "A", "B", "C", "AB", "AC", "BC", "AA", "BB", "CC" отображают полиномы (факторы процесса), которые содержат соответствующие коэффициенты, вычисляемые на основе обработки экспериментальных данных, по уравнению (3.8), представляющему вид в среде MathCAD:

$$Y_m(X_1, X_2, X_3) = b_0 + b_1 \cdot A + b_2 \cdot B + b_3 \cdot C + b_4 \cdot A \cdot B + b_5 \cdot A \cdot C + b_6 \cdot B \cdot C + b_7 \cdot A^2 + b_8 \cdot B^2 + b_9 \cdot C^2. \quad (3.18)$$

Для выполнения полного набора диагностики и регрессивного анализа статистической информации многомерной полиномиальной регрессии использовали функцию «polyfitstat (X, Y, n)», которая производит расчет и отображает зависимость статистических данных по модели полиномиальной регрессии, включая статистический метод дисперсионного анализа ANOVA (analysis of variance), используемый для анализа различий между группами (факторами) и влияния различных переменных (факторов) на исследуемую зависимую переменную, для модели регрессии.

Результатом выполнения функции «polyfitstat (X, Y, n)» является расчет и отображение зависимости статистических данных, описывающих зависимость аппроксимирующих результатов модели полиномиальной регрессии, приближающей значения матрицы Y , от данных, содержащихся в матрице X .

При применении функции «polyfitstat (X, Y, n)» во втором столбце матрицы содержатся элементы, приведенные в таблице 3.9.

Для поиска экстремумов и решения оптимизационных задач в среде MathCAD будем использовать две функции:

- «Minimize (Y, X)» — для отыскания значения аргументов x , при которых функция $Y (X_1, X_2, X_3)$ достигает локального минимума;

- «Maximize (Y, X)» – для отыскания значения аргументов x , при которых функция $Y(X_1, X_2, X_3)$ достигает локального максимума.

Таблица 3.9 – Данные, содержащиеся во втором столбце матрицы, в результате применения функции «polyfitstat (X, Y, n)»

Строка	Обозначения	Описание
1	"Standard Deviation"	Оценка стандартной ошибки аппроксимации (среднеквадратическое отклонение для Y), ожидаемой для каждой точки данных, если он проинтерполирован или экстраполирован кривой аппроксимации
2	"R2"	Коэффициент детерминации R^2 , который отображает, насколько хорошо модель регрессии предсказывает зависимую переменную. Он может принимать значения от 0 до 1, где 1 – это полное соответствие данных с моделью.
3	"Adjusted R2"	Корректированная оценка коэффициента детерминации R^2 , которая учитывает число независимых переменных в модели регрессии
4	"Predicted R2"	Оценка коэффициента детерминации R^2 , которая предсказывает точность модели регрессии для новых данных
5	"PRESS"	Сумма квадратов ошибок по предсказанию, полученных при удалении каждой точки данных и повторной аппроксимации оставшихся данных (применяется для масштабирования остатков)
6	"Durbin-Watson"	Статистика Дарбина-Уотсона, предназначенная для проверки на автокорреляцию остатков. Значение может принимать от 0 до 4, где значения 2 указывают на отсутствие автокорреляции

7	"Coefficients"	<p>Коэффициенты аппроксимации, которые использовались для создания кривой аппроксимации. Например, для функции полинома это будут коэффициенты при x^0, x^1, x^2</p>
8	"ANOVA"	<p>Данные анализа дисперсии, показывающей вклад каждой независимой переменной в объяснение изменчивости зависимой переменной</p>
9	"Diagnostics"	<p>Матрица диагностики со следующими столбцами:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Нумерация каждого выполнения или точки данных. 2. Наблюдаемый результат по каждому выполнению или точке данных. 3. Предсказанный в ходе исследования результат с помощью модели регрессии. 4. Остаток — разность между наблюдаемым и предсказанным результатом. 5. Сила — мера расстояния от наблюдаемого результата до точки, находящейся в центре всех наблюдаемых результатов. 6. Остаток по Стьюдену — остаток, деленный на дисперсию, рассчитанную по наблюдаемым результатам. 7. R-Стьюдент — остаток, деленный на дисперсию, рассчитанную по набору данных, из которого удалены наблюдаемые результаты. 8. Расстояние Кука — мера влияния наблюдаемых результатов на все другие точки данных. 9. DFFITS — разность между результатом, предсказанным с помощью модели регрессии, построенной по набору данных, в которую включены

		наблюдаемые результаты, и результатом, предсказанным с помощью другой модели, из которой наблюдаемые результаты исключены
--	--	---

Так как уравнение (3.18) позволяет найти одно значение локальных экстремумов, при отыскании значения максимума и минимума функции $Y(X_1, X_2, X_3)$ на заданном множестве, зададим область значений посредством записи диапазона $-1 < X_n < 1$, в границах которой необходимо производить отыскание искомого экстремума.

Применение функций «Minimize (Y, X)» и «Maximize (Y, X)» позволит решить задачу поиска локального значения экстремума функции $Y(X_1, X_2, X_3)$, аппроксимирующего к заданному начальному приближению аргументов X_1, X_2, X_3 .

3.8. Выводы по 3 главе

1. Для исследования рабочего процесса и проверки теоретических исследований представленной конструкции был изготовлен лабораторный образец молотковой дробилки с оппозитной загрузкой зерна по патенту на изобретение РФ № 2 746 586.

2. Для экспериментальных исследований и получения уравнения регрессии были отобраны и рассчитаны сочетания факторов из 3 критериев подобия и уровни их варьирования, наиболее значимо влияющие на энергоемкость процесса измельчения и значение комплексных параметров.

3. Анализ технологических и зоотехнических аспектов измельчения зерна позволил свести многокритериальную задачу к однокритериальной, используя метод выделения главного критерия – энергоемкости процесса. При этом другие критерии переведены в ограничения.

4. С целью выявления математической зависимости влияния режимов работы молотковой дробилки на параметры оптимизации использовали трехфакторный эксперимент по плану Бокса-Бенкена типа ПФЭ 3^3 , способствующий упрощению и удешевлению эксперимента.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Влияние факторов на энергоемкость процесса измельчения

Одним из важных критериев, определяющих эффективность работы молотковой дробилки, является энергоемкость процесса измельчения.

При реализации многофакторного эксперимента решали задачу получения уравнений регрессии в кодированном виде, где в качестве функции отклика, характеризующего работу дробилки, принят параметр Y_1 – энергоемкость процесса дробления Δ , посредством определения достигнутой производительности измельчителя Q и затраченной мощности N на процесс измельчения с учетом достигнутой степени измельчения материала λ .

Результаты экспериментов по установлению величин при измельчении пшеницы и ячменя представлены в приложениях А 1 и А 2.

В результате обработки результатов эксперимента при измельчении пшеницы и ячменя при помощи программного обеспечения «PTC Mathcad 15.0», а также в результате применения функции «polyfitc (X, Y, n)» были вычислены коэффициенты многомерной полиномиальной регрессии, расчеты которых приведены в расчетной бланк-матрице, представленные в листинге приложений Б1 и Б2. По результатам обработки составлено уравнение регрессии в кодированных переменных для измельчения пшеницы:

$$Y_1(X_1, X_2, X_3) = 5.357 - 0.59 \cdot X_1 - 1.162 \cdot X_2 - 0.103 \cdot X_3 + 0.572 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.264 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.58 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.192 \cdot X_1^2 + 0.902 \cdot X_2^2 + 1.191 \cdot X_3^2. \quad (4.1)$$

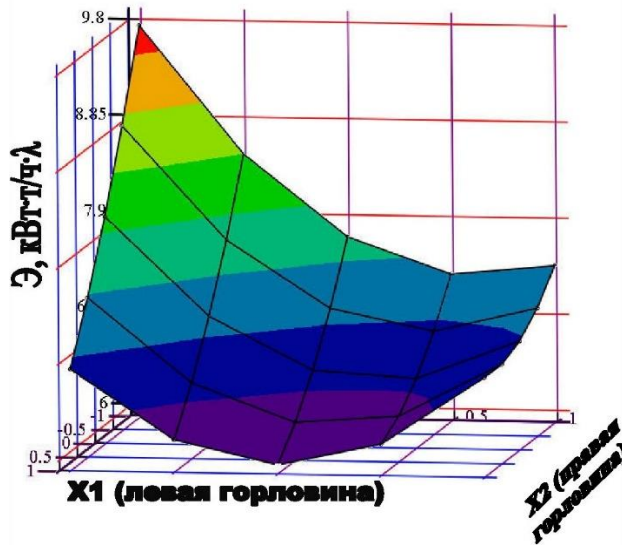
В результате статистической обработки результатов эксперимента по параметрам энергоемкости, где в качестве исходного материала взят ячмень, а в качестве функции отклика принята энергоемкость, получено уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$Y_1(X_1, X_2, X_3) = 7.574 - 2.174 \cdot X_1 - 3.564 \cdot X_2 + 2.066 \cdot X_3 + 2.217 \cdot X_1 \cdot X_2 - 2.317 \cdot X_1 \cdot X_3 - 2.22 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.154 \cdot X_1^2 + 1.889 \cdot X_2^2 + 3.315 \cdot X_3^2. \quad (4.2)$$

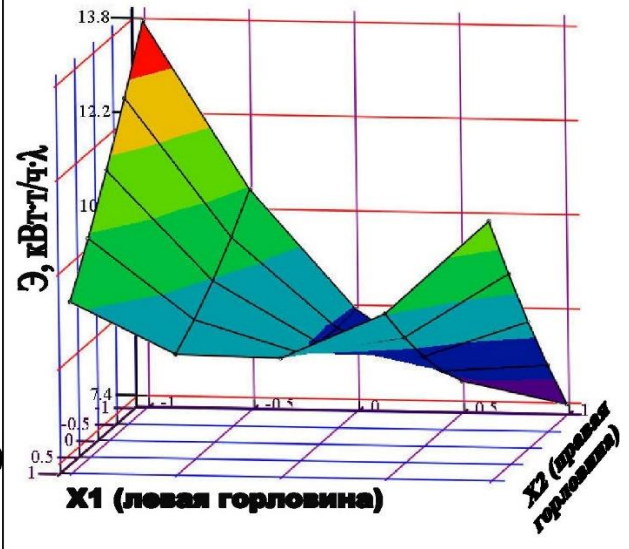
Статистические данные о модели полиномиальной регрессии были обработаны при использовании функции «polyfitstat (X, Y, n)» в среде MathCAD. Результаты регрессионного анализа модели уравнения полиномиальной регрессии, записанные в матрице Y, к данным, содержащимся в матрице X, приведены в листинге приложений Б1 и Б2. В этих данных коэффициент детерминации при дисперсионном анализе, показывающий силу нелинейной зависимости между переменными-предикторами и переменной отклика Y, при измельчении пшеницы составил $R^2 = 90,1\%$, при измельчении ячменя – $R^2 = 95,0\%$, что указывает на адекватное отражение уравнениями регрессии экспериментальных данных.

Для получения визуального представления о составленных уравнениях регрессии (4.1; 4.2) построены поверхности отклика в аксонометрии на разных графических полях (рисунок 4.1, 4.2, 4.3). На графиках в трёхмерной системе координат аппроксимационных зависимостей энергоёмкости процесса, описываемых уравнениями (4.1; 4.2), по оси OX обозначены значения подачи материала в левую загрузочную горловину, по оси OY – значение подачи материала в правую загрузочную горловину, а по оси OZ – энергоёмкость процесса измельчения Э, кВт·т/(ч·λ).

Увидеть одновременное влияние сочетания всех участвующих в эксперименте независимых переменных факторов на параметр оптимальности не представляется возможным, поэтому один из факторов – угловая скорость ротора ω установлен на постоянном уровне.

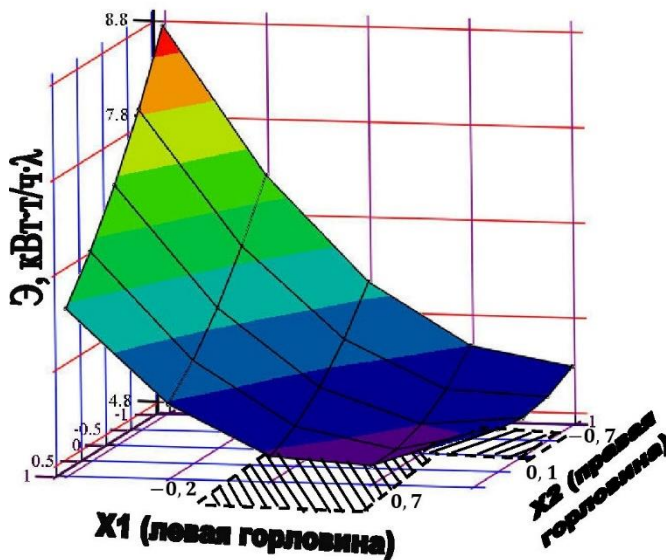


а) измельчение пшеницы

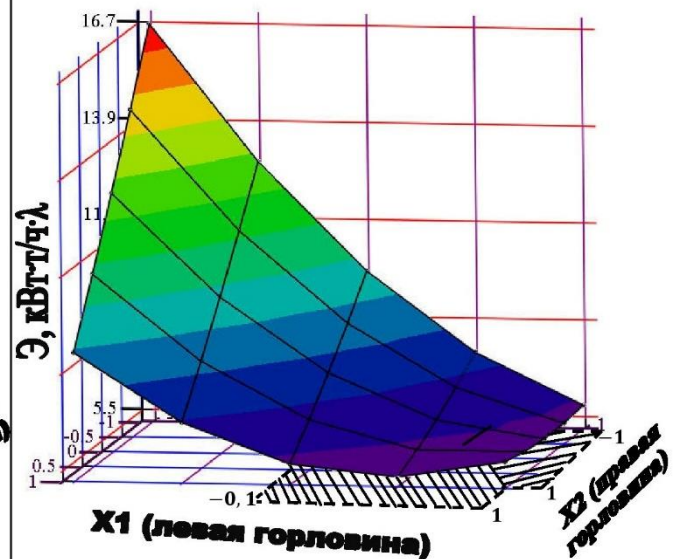


б) измельчение ячменя

Рисунок 4.1 – Поверхность отклика, характеризующая влияние сочетаний факторов подачи исходного материала в левое X_1 и правое отверстие X_2 , при значении третьего фактора уравнения $X_3 = -1$, на энергоемкость процесса измельчения Y_1



а) измельчение пшеницы



б) измельчение ячменя

Рисунок 4.2 – Поверхность отклика, характеризующая влияние сочетаний факторов подачи исходного материала в левое отверстие X_1 и правое отверстие X_2 , при значении третьего фактора уравнения $X_3 = 0$, на энергоемкость процесса измельчения Y_1

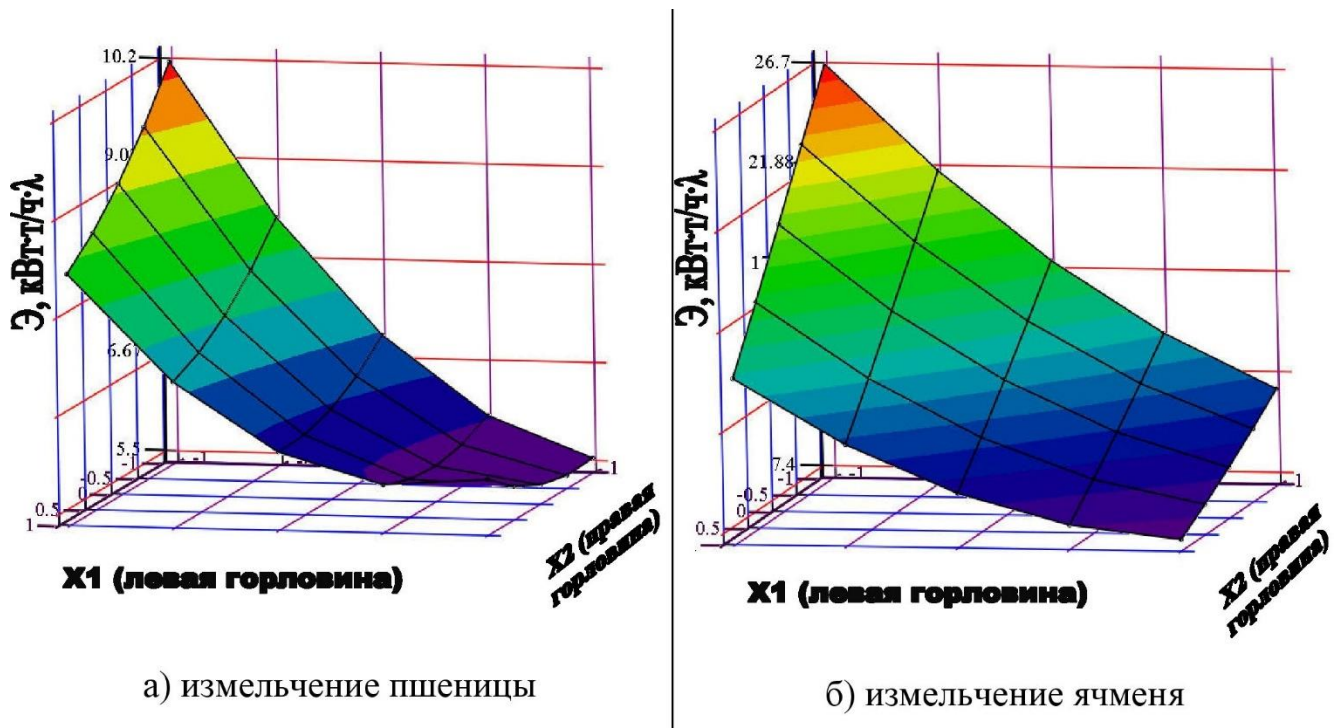


Рисунок 4.3 – Поверхность отклика, характеризующая влияние сочетаний факторов подачи исходного материала в левое отверстие X_1 и правое отверстие X_2 , при значении третьего фактора уравнения $X_3 = +1$, на энергоёмкость процесса измельчения Y_1

Анализируя критерии аппроксимации, представленные в приложениях Б1 и Б2, а также графики аппроксимационных зависимостей (рисунок 4.1, 4.2, 4.3), можем сделать вывод, что уравнениями (4.1; 4.2) адекватно и корректно описаны исследуемые зависимости энергоёмкости процесса измельчения пшеницы и ячменя в молотковой дробилке при различных значениях подачи исходного материала в левую и правую загрузочную горловину, при фиксированном значении третьего фактора угловой скорости ротора ω .

Анализируя результаты спроецированной поверхности отклика в аксонометрии в проекциях на координатную плоскость (рисунок 4.1, 4.2, 4.3), на которых приведена экспериментальная зависимость энергоёмкости от сочетаний двух из трех факторов подачи исходного материала в левое отверстие X_1 и правое отверстие X_2 , при постоянной величине третьего фактора угловой скорости вращения ротора $X_3 = -1; 0; +1$, можно сделать следующие выводы: при

минимальном значении третьего фактора угловой скорости вращения ротора $X_3 = -1$ границы энергоёмкости процесса измельчения пшеницы варьируются в интервале от 6 до 9,8 кВт·т/ч·л, ячменя – от 7,4 до 13,8 кВт·т/ч·л.

После повышения окружной скорости молотков, при значении третьего фактора $X_3 = 0$, наблюдается снижение энергоёмкости процесса и снижение границ диапазона, которые при измельчении пшеницы варьируются в диапазоне от 4,8 до 8,8 кВт·т/ч·л. При измельчении ячменя наблюдается расширение границ диапазона от 5,5 до 16,7 кВт·т/ч·л. При верхнем уровне варьирования фактора (увеличении значения) угловой скорости ротора до верхнего предела $X_3 = +1$ границы энергоёмкости процесса измельчения пшеницы варьируются в диапазоне от 5,5 до 10,2 кВт·т/ч·л, ячменя – от 7,4 до 26,7 кВт·т/ч·л. При парном сочетании изменяемых величин X_1 и X_2 и постепенном выравнивании подачи материала в камеру измельчения наблюдается уменьшение энергоёмкости процесса измельчения.

На полученных графиках в трёхмерной системе координат зависимостей энергоёмкости процесса измельчения пшеницы и ячменя видны области, характеризующиеся минимальными значениями энергоёмкости процесса измельчения при максимальном значении сочетания факторов подачи исходного материала в левое X_1 и правое отверстие X_2 , при значении третьего фактора $X_3 \geq 0$. После повышения угловой скорости $X_3 \geq 0$, находящейся в диапазоне окружных скоростей молотков 45...55 м/с, зерновой материал измельчается с меньшими энергозатратами, благодаря достигнутой скорости ударных элементов.

При минимальном значении угловой скорости $X_3 = -1$ границы энергоёмкости процесса измельчения значительно выше, чем при основном факторе $X_3 = 0$, это объясняется тем, что при малых окружных скоростях молотков измельчаемый продукт не разрушается, более длительное время находится в камере измельчения, что способствует увеличению весовой концентрации измельчаемого продукта в камере измельчения и значительному увеличению энергоёмкости процесса.

При односторонней подаче материала в левое X_1 или правое отверстие X_2 видны области, характеризующиеся повышенной энергоемкостью процесса измельчения, по сравнению с парной подачей.

Анализируя данные графических изображений и уравнений (4.1, 4.2), можно отметить, что при измельчении пшеницы и ячменя с повышением скорости в пределах диапазона от 45 до 55 м/с энергоемкость заметно снижается, с увеличением окружных скоростей молотков свыше 55 м/с энергоемкость вновь повышается ввиду увеличения гидродинамических сопротивлений ротора. Вследствие чего оптимальная скорость молотков находится в пределах 45...55 м/с.

При оптимизации процесса измельчения пшеницы по критерию минимума энергоемкости процесса измельчения, используя функцию «Minimize (Y, X)» пакета MathCAD, получено рациональное значение факторов, представленных в листинге приложений Б1 и Б2, согласно которым локальный минимум величины энергоемкости процесса измельчения пшеницы достигается при следующих значениях факторов $X_1 = 1; X_2 = 0.331; X_3 = 0.013$, при измельчении ячменя локальный минимум энергоемкости достигается при $X_1 = 1; X_2 = 0.554; X_3 = 0.155$.

Таким образом, для достижения оптимального значения энергоемкости процесса измельчения пшеницы рациональными параметрами для минимальной энергоемкости процесса измельчения являются величины в натуральных выражениях, соответствующие следующим значениям: частота вращения ротора $\omega = 453,6$ рад/с, при парной подаче измельчаемого материала в соотношении: в правое отверстие – $q_1 = 0,08 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, в левое отверстие – $q_2 = 0,05 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$.

При сравнительной оценке затрат энергии при измельчении пшеницы было установлено, что среднее значение увеличения энергоемкости процесса измельчения составило 20,9 % в отличие от оппозитной подачи.

Полученное числовое значение энергоёмкости является предварительным. Окончательный результат должен появиться после решения задачи оптимизации с

учетом ограничений, изложенных ранее. По-иному проведенная здесь и в последующих разделах оптимизация имеет лишь познавательное значение. Практическое же значение имеет оптимизация, изложенная в подразделе 4.7.

Рациональным значением для минимальной энергоемкости процесса измельчения ячменя являются величины в натуральных выражениях, соответствующие следующим значениям: угловая скорость ротора должна соответствовать $\omega = 467,9$ рад/с, при парной подаче измельчаемого материала в соотношении: в левое отверстие – $q_1 = 0,08 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, в правое отверстие – $q_2 = 0,06 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$.

Исследование влияния оппозитной загрузки измельчаемого материала на энергоемкость показало, что при равном соотношении подачи материала в камеру измельчения расход энергии снижается, при линейной скорости молотков более 55 м/с границы диапазона постепенно сдвигаются к увеличению значений энергоемкости.

Анализ оптимизации процесса измельчения пшеницы по критерию минимума энергоемкости процесса измельчения показывает, что при необходимости получения более крупного размола необходимы снижение угловой скорости вращения ротора до нижнего предела $X_3 = -1$ (линейной скорости 35 м/с) и увеличение подачи исходного материала в равном соотношении в левое X_1 и правое отверстие X_2 .

Для визуализации тенденций изменения энергоёмкости процесса измельчения в зависимости от вида материала и значений подачи материала в левую и правую загрузочную горловину, заданных уравнениями регрессии (4.1, 4.2), программой «РТС Mathcad 15.0» в декартовой системе координат на плоскостях осей OX и OY спроецированы двухмерные графики каждого в отдельности фактора X_1 и X_2 при установлении фактора X_3 и значений второго аргумента X_1 или X_2 на постоянном уровне (рис. 4.4, 4.5).

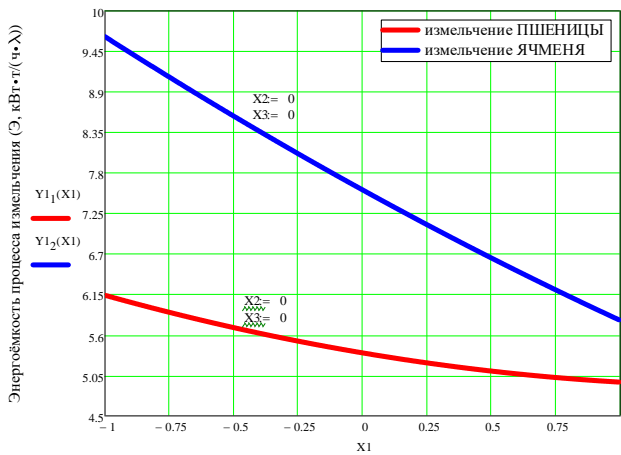


Рисунок 4.4 – Значение энергоёмкости процесса, в зависимости от подачи материала в левую загрузочную горловину при значении правой $X_2 = 0$ и $X_3 = 0$

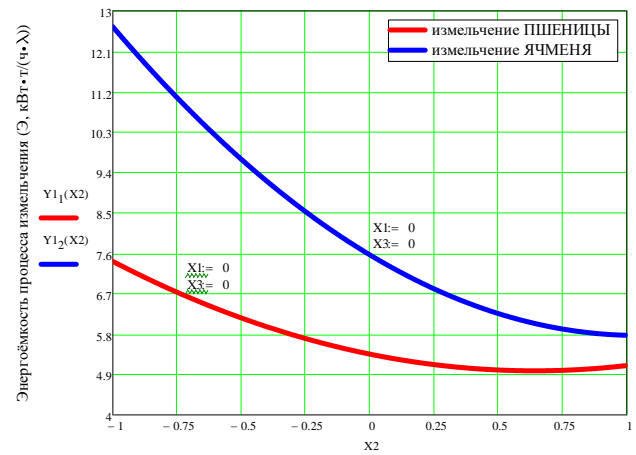


Рисунок 4.5 – Значение энергоёмкости процесса, в зависимости от подачи материала в правую загрузочную горловину при значении левой $X_1 = 0$ и $X_3 = 0$

При условии установлении факторов X_2 и X_3 на нулевом уровне, границы диапазона энергоёмкости при измельчении пшеницы варьируются в пределах 4,9-6,15 кВт·т/ч·λ, что существенно ниже, чем при измельчении ячменя, диапазон энергоёмкости которого имеет расширенные границы от 5,9 до 9,6 кВт·т/ч·λ. При увеличении объема подачи любого материала в левую горловину X_1 (см. рисунок 4.4) величина энергоёмкости имеет тенденцию к постепенному снижению. Подобная закономерность имеет место и при увеличении подачи в правую горловину (при средней подаче в левую горловину) (см. рисунок 4.5). Эти графики также указывают, что при подаче исходного материала только в одну горловину (левую при $X_2 = -1$, или правую при $X_1 = -1$) имеет место повышенная энергоёмкость процесса измельчения. Некоторое различие графиков на рисунках 4.4 и 4.5 объясняется разной механикой взаимодействия материала, выходящего из горловин, с молотками, движущимися по восходящей и нисходящей траекториям.

Анализ факторов, влияющих на процесс измельчения зерновых компонентов в молотковой дробилке с оппозитной загрузкой при принятом интервале варьирования угловой скорости ротора, позволил из множества факторов выявить два наиболее значимых варьируемых и независимых фактора

соотношения подачи материала в зеркально расположенные загрузочные горловины.

Проведенные исследования показывают эффективность применения молотковой дробилки с оппозитной загрузкой исходного материала.

4.2. Влияние сочетания факторов на модуль размола исходного материала в молотковой дробилке с оппозитной загрузкой

В качестве критерия оптимальности Y_2 был выбран модуль размола, как средневзвешенный диаметр частиц (модуль). Исходя из работы [137] измельчители фуражного зерна должны обеспечивать такой средневзвешенный размер частиц дерти (модуль размола), который соответствует потребностям каждого вида сельскохозяйственных животных.

С целью определения качественной оценки получаемого продукта были проведены исследования на лабораторном образце дробилки, в ходе которых при помощи ситового анализа, на наборах сит с круглыми отверстиями диаметром: 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 мм, устанавливался модуль размола исходного материала M , и соответствие полученной в результате измельчения средневзвешенном размере частиц измельченного сырья требованиям для кормления сельскохозяйственных животных [22, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 37, 41, 43, 44, 45, 50, 51, 52, 54, 76, 88, 132, 144, 146].

Остаток на сите с соответствующими диаметрами отверстий регламентируется ГОСТом [22, 26, 27, 29, 30, 32, 41, 43-45, 50, 52, 54]. При помощи программного обеспечения «PTC Mathcad 15.0» обработаны результаты проведённого эксперимента о средневзвешенном размере частиц полученной дерти при измельчении пшеницы и ячменя по величине модуля размола исходного материала M , и вычислены коэффициенты для поверхности многомерной полиномиальной регрессии, приведённые в расчетной бланк-

матрице, представленной в листинге приложений Б3 и Б4.

Уравнение регрессии модуля размола при измельчении пшеницы, исходя из статистической обработки результатов эксперимента, выглядит следующим образом в кодированных переменных:

$$Y_2(X_1, X_2, X_3) = 1.131 + 0.038 \cdot X_1 + 0.106 \cdot X_2 - 0.233 \cdot X_3 - 0.03 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.012 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.013 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.016 \cdot X_1^2 + 0.024 \cdot X_2^2 + 0.046 \cdot X_3^2. \quad (4.3)$$

Уравнение регрессии в кодированных переменных для модуля размола при измельчении ячменя, в результате статистической обработки результатов эксперимента, имеет следующий вид:

$$Y_2(X_1, X_2, X_3) = 1.289 + 0.033 \cdot X_1 + 0.088 \cdot X_2 - 0.244 \cdot X_3 - 0.017 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.021 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.03 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.015 \cdot X_1^2 + 0.002 \cdot X_2^2 + 0.096 \cdot X_3^2. \quad (4.4)$$

Результаты регрессионного анализа модели уравнения полиномиальной регрессии, записанные в матрице Y , к данным, содержащимся в матрице X , представленные в листинге приложений Б3 и Б4, в строке 2 отображены коэффициенты детерминации, при дисперсионном анализе составляющие значение при измельчении пшеницы $R^2 = 98,9\%$, при измельчении ячменя – $R^2 = 99,3\%$, это показывает адекватность модели для зависимости между переменными-предикторами и переменной отклика Y_2 .

Для определения области оптимальных значений факторов из составленных уравнений регрессии (4.3; 4.4) программой «PTC Mathcad 15.0» спроецированы поверхности отклика в аксонометрии в проекциях на координатную плоскость, представленные на рисунках 4.6 4.7, 4.8, на которых один из факторов X_3 установлен на постоянном уровне, так как одновременное сочетание всех участвующих в эксперименте независимых переменных факторов не дает возможность разграничить поверхности отклика для анализа.

Анализируя полученные результаты экспериментальной зависимости модуля размола от сочетаний двух из трех факторов, можно сделать следующие выводы: при измельчении пшеницы, исходя из проекций на координатную

плоскость, при минимальном значении третьего фактора угловой скорости вращения ротора $X_3 = -1$, границы модуля размола варьируются в диапазоне от 1,27 до 1,59 мм, ячменя – от 1,45 до 1,8 мм.

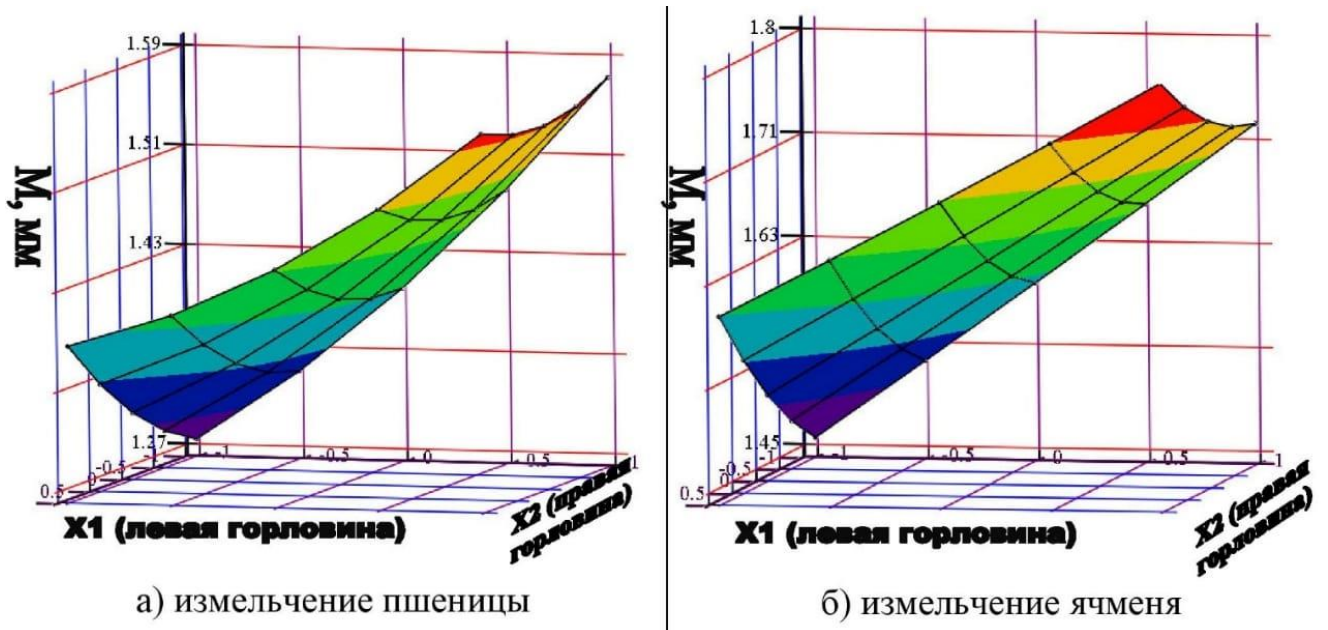


Рисунок 4.6 – Поверхность отклика, характеризующая влияние сочетаний факторов подачи исходного материала в левое X_1 и правое отверстие X_2 , при значении третьего фактора уравнения $X_3 = -1$, на величину модуля размола Y_2

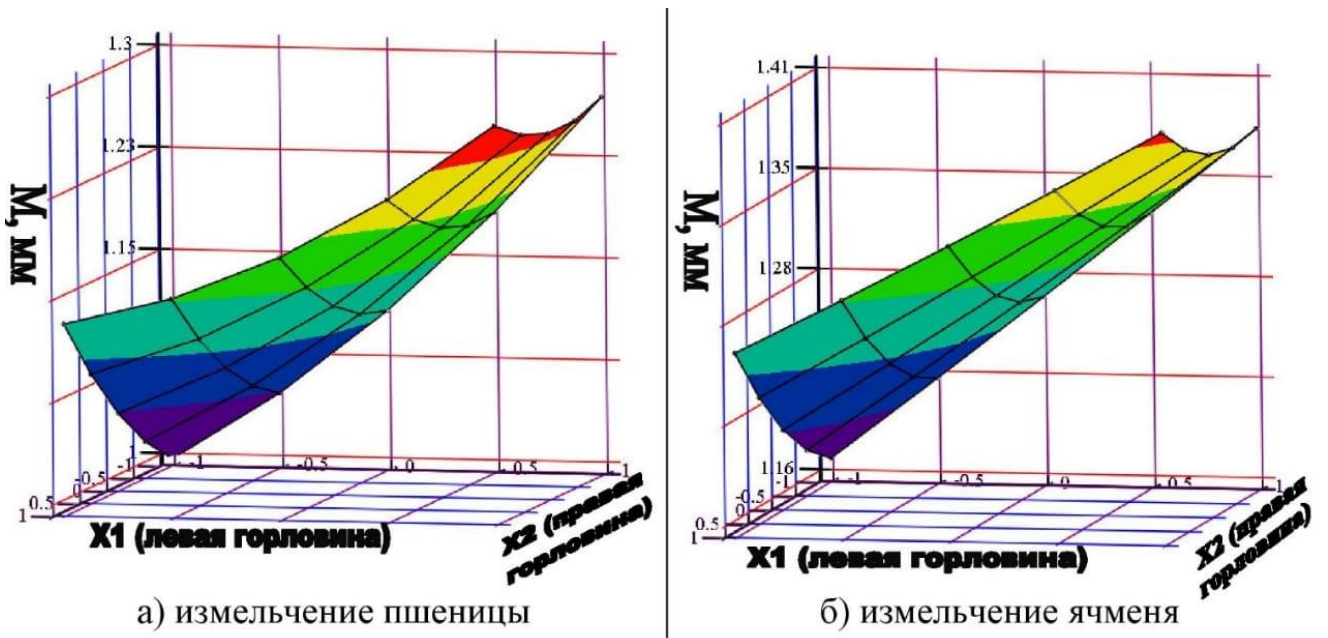


Рисунок 4.7 – Поверхность отклика, характеризующая влияние сочетаний факторов подачи исходного материала в левое X_1 и правое отверстие X_2 , при значении третьего фактора уравнения $X_3 = 0$, на величину модуля размола Y_2

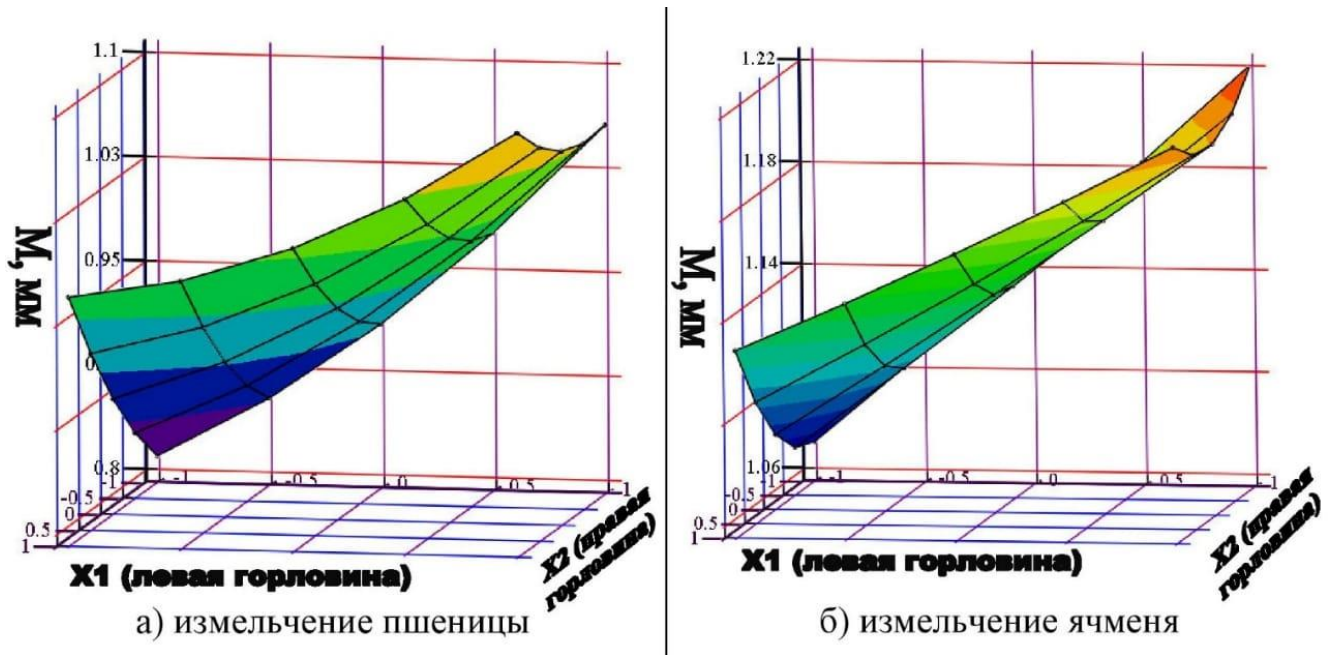


Рисунок 4.8 – Поверхность отклика, характеризующая влияние сочетаний факторов подачи исходного материала в левое X_1 и правое отверстие X_2 , при значении третьего фактора уравнения $X_3 = +1$, на величину модуля размола Y_2

После повышения окружной скорости молотков, при значении третьего фактора $X_3 = 0$, наблюдается уменьшение средневзвешенного размера частиц полученной дерти и снижение границ диапазона, которые при измельчении пшеницы варьируют в диапазоне от 1 до 1,3 мм, при измельчении ячменя – от 1,16 до 1,41 мм. При верхнем уровне варьирования фактора увеличения значения угловой скорости ротора до верхнего предела $X_3 = +1$, границы модуля размола пшеницы варьируют в диапазоне от 0,8 до 1,1 мм, ячменя – от 1,06 до 1,22 мм. При парном сочетании изменяемых величин X_1 и X_2 и постепенном выравнивании подачи материала в камеру измельчения наблюдается увеличение модуля размола и увеличение средневзвешенного размера частиц от мелкого к более крупному размолу.

Таким образом, при увеличении значения третьего фактора угловой скорости вращения ротора модуль размола становится меньше.

При измельчении пшеницы и парном сочетании факторов X_1 и X_2 наблюдается увеличение размера частиц дерти и преобразование тонкости размола

в соответствии с ГОСТом 8770-58 из мелкого в средний размол и при парном соотношении подачи материала в загрузочные горловины, в размоле наблюдается преобладание диаметра частиц более крупных размеров.

При оптимизации процесса измельчения пшеницы и ячменя, используя среду MathCAD для отыскания значения факторов, при которых достигается локальный минимум и максимум значений функции модуля размола. Получены расчетные значения факторов, представленные в листинге приложений Б3 и Б4, которые отражают, что для получения продукции более тонкого размола, необходимо увеличение угловой скорости ротора и снижение подачи исходного материала в загрузочные горловины как в парном соотношении, так и по отдельности. Для получения продукции более крупного дробления и грубого размола необходимо парное сочетание факторов X_1 и X_2 и максимальное снижение значения угловой скорости X_3 .

Исходя из вышеизложенного можно утверждать, что размер частиц продукта, получаемого после размола зерен с помощью молотковой дробилки с оппозитной загрузкой, подходит для использования в кормлении сельскохозяйственных животных различных половозрастных групп и видов и соответствует зоотехническим нормам предъявляемым к комбикормам [22, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 37, 41, 43, 44, 45, 50, 51, 52, 54].

4.3. Влияние факторов на коэффициент вариации модуля размола в молотковой дробилке с оппозитной загрузкой исходного материала

Средневзвешенный коэффициент вариации модуля размола был принят в качестве критерия оптимальности Y_3 , отражающего степень изменчивости (разбросанности) значений модуля размола.

Средневзвешенный коэффициент вариации модуля размола используется для сравнения и оценки вариации (меры разбросанности) значений и в целях установления, насколько велика степень рассеивания модуля размола относительно среднего значения.

В процессе экспериментальных исследований с последующей обработкой данных программным обеспечением “PTC Mathcad 15.0” были вычислены коэффициенты многомерного полинома, которые были использованы для определения коэффициента вариации модуля размола при измельчении пшеничных и ячменных зерен. Эти данные представлены в расчетной бланковой матрице в приложениях Б5 и Б6 соответственно.

Статистические данные анализа уравнения полиномиальной регрессии, содержащиеся в приложениях Б5 и Б6, имеют коэффициент детерминации при дисперсионном анализе, показывающий силу детерминированной зависимости между переменными-предикторами и переменной отклика Y_3 , при измельчении пшеницы $R^2 = 98,8\%$, при измельчении ячменя – $R^2 = 99,3\%$.

Уравнение регрессии для коэффициента вариации модуля размола при измельчении пшеницы в результате статистической обработки данных эксперимента имеет вид в кодированных переменных:

$$Y_3(X_1, X_2, X_3) = 2.866 - 0.112 \cdot X_1 - 0.268 \cdot X_2 + 0.556 \cdot X_3 + 0.106 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.056 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.09 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.047 \cdot X_1^2 - 0.010 \cdot X_2^2 - 0.005 \cdot X_3^2. \quad (4.5)$$

При измельчении ячменя уравнение регрессии в кодированных переменных имеет вид:

$$Y_3(X_1, X_2, X_3) = 1.632 - 0.022 \cdot X_1 - 0.086 \cdot X_2 + 0.272 \cdot X_3 - 0.004 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.015 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0.004 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.036 \cdot X_1^2 - 0.006 \cdot X_2^2 - 0.051 \cdot X_3^2. \quad (4.6)$$

На рисунках 4.9, 4.10 и 4.11 представлены поверхности отклика в аксонометрии составленных уравнений регрессии (4.5, 4.6), на которых фактор X_3 установлен на постоянном уровне.

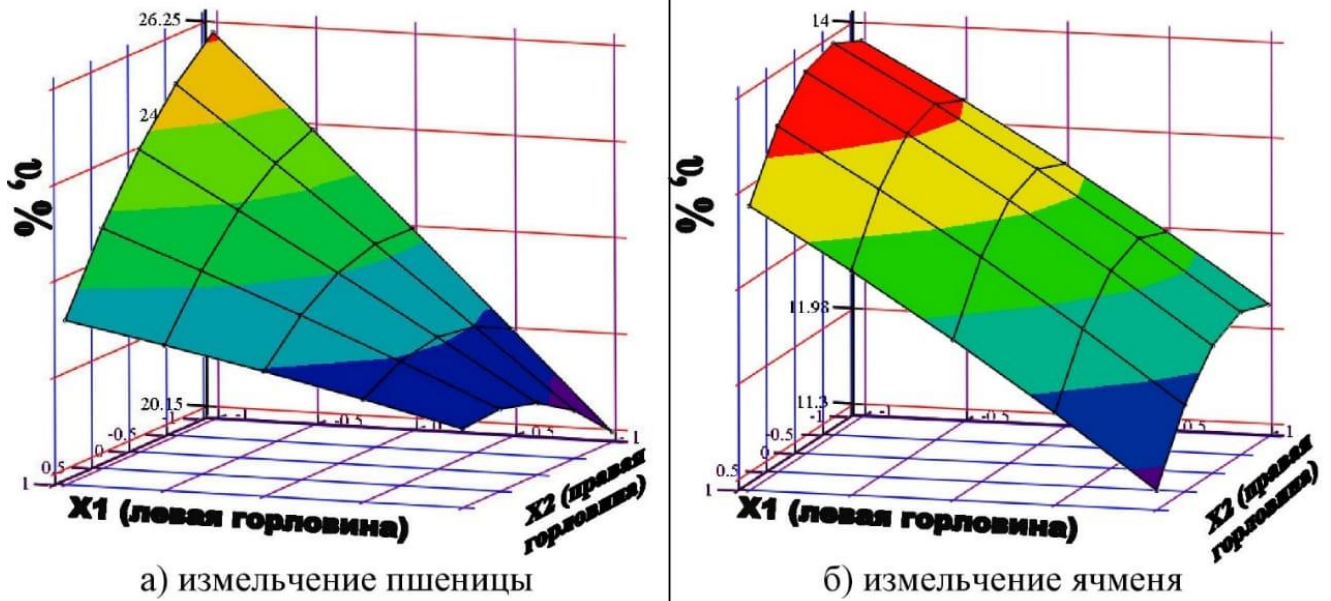


Рисунок 4.9 – Поверхность отклика коэффициента вариации модуля размола Y_3 в зависимости от сочетаний факторов подачи исходного материала в левое отверстие X_1 и правое отверстие X_2 , при значении третьего фактора уравнения

$$X_3 = -1$$

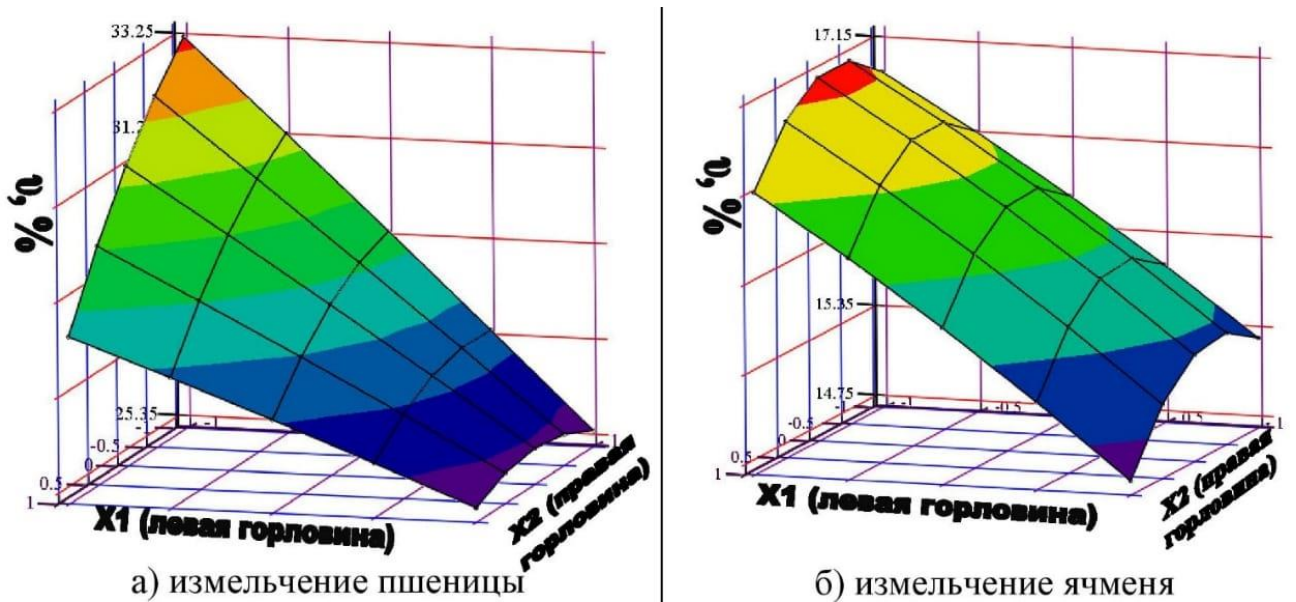


Рисунок 4.10 – Поверхность отклика коэффициента вариации модуля размола Y_3 в зависимости от сочетаний из трех факторов подачи исходного материала в левое отверстие X_1 и правое отверстие X_2 , при значении третьего фактора уравнения

$$X_3 = 0.$$

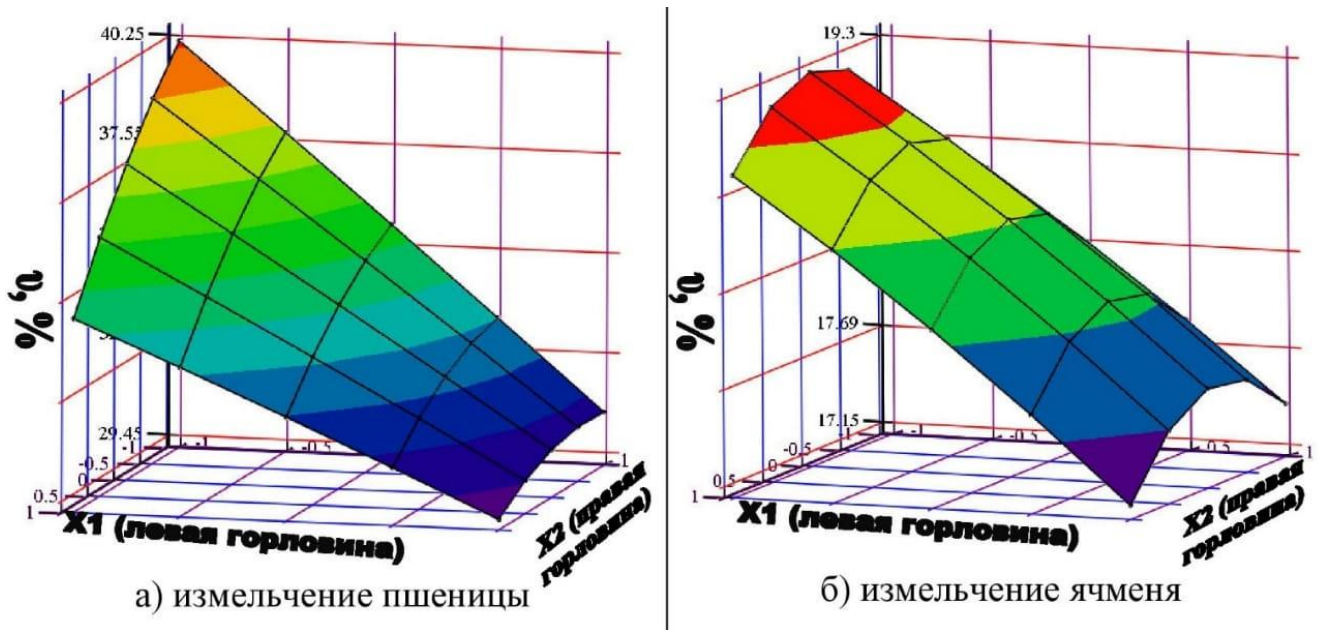


Рисунок 4.11 – Поверхность отклика коэффициента вариации модуля размола Y_3 в зависимости от сочетаний из трех факторов подачи исходного материала в левое отверстие X_1 и правое отверстие X_2 , при значении третьего фактора уравнения $X_3 = +1$

Анализируя результаты спроецированного программой «PTC Mathcad 15.0» каждого уравнения регрессии в проекциях на координатную плоскость (рисунок 4.9, 4.10, 4.11), представляющего поверхность отклика в аксонометрии, на изображении котором приведена экспериментальная зависимость коэффициента вариации модуля размола от сочетаний двух из трех факторов подачи исходного материала в левое отверстие X_1 и правое отверстие X_2 , при постоянной величине третьего фактора угловой скорости вращения ротора $X_3 = -1; 0; +1$, можно сделать следующие выводы: при нижнем уровне третьего фактора угловой скорости вращения ротора $X_3 = -1$, границы коэффициента вариации модуля размола пшеницы варьируются в диапазоне от 20,15 до 26,25 %, ячменя – от 11,3 до 14 %.

После повышения окружной скорости молотков, при значении третьего фактора $X_3 = 0$, наблюдается снижение коэффициента вариации модуля размола и снижение границ диапазона, которые при измельчения пшеницы варьируются в диапазоне от 25,35 до 33,25 %, при измельчении ячменя наблюдается расширение

границ диапазона от 14,75 до 17,15 % по сравнению с нижним уровнем. При верхнем уровне варьирования фактора (увеличении значения) угловой скорости ротора до верхнего предела $X_3 = +1$ границы коэффициента вариации модуля размола пшеницы варьируются в диапазоне – от 29,45 до 40,25 %, ячменя – от 17,15 до 19,3 %. При парном сочетании изменяемых величин X_1 и X_2 , и постепенном выравнивании подачи материала в камеру измельчения наблюдается снижение степени рассеивания данных величин коэффициента вариации модуля размола.

При увеличении значения третьего фактора угловой скорости вращения ротора коэффициент вариации модуля размола снижается по линейной зависимости.

Парная подача материала в камеру измельчения приводит к снижению коэффициента вариации модуля размола, что говорит об уменьшении рассеивания модуля размола и увеличении однородной совокупности гранулометрического состава.

При оптимизации процесса измельчения пшеницы по критерию минимума коэффициента вариации модуля размола, расчеты которых представлены в листинге приложения Б 5, установлено, что для снижения степени рассеивания модуля размола значения факторов должны составлять $X_1 = -1$, $X_2 = 1$, $X_3 = -1$, то есть необходимо соблюдение условия минимального значения угловой скорости при закрытой левой заслонки и открытой заслонки, расположенной с правой стороны. Для снижения степени рассеивания модуля размола (коэффициента вариации) при измельчении пшеницы, рациональные значения в раскодированном виде натуральных величин факторов должны соответствовать следующим значениям: угловая скорость ротора $\omega = 351,8$ рад/с, при соотношении подачи материала в правое отверстие $q_1 = 0,00 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, в левое отверстие – $q_2 = 0,08 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$. Эти данные являются минимумом по критерию модулю размола. Производственное значение имеет оптимизацию с ограничениями, которая изложена ниже.

Для ячменя расчеты представлены в листинге приложения Б 6. Оптимизация процесса измельчения имеет иную структуру значений: $X_1 = 1$, $X_2 = 1$, $X_3 = -1$. Указанные значения при измельчении ячменя отражают, что для достижения степени рассеивания необходимо снижение угловой скорости до нижнего предела при условии полностью открытых шиберных заслонок.

В раскодированном виде натуральные значения режимных параметров при измельчении ячменя, для снижения степени рассеивания модуля размола (коэффициента вариации) значения варьируемых параметров должны иметь следующие значения: угловая скорость вращения ротора должна соответствовать значению $\omega = 351,8$ рад/с, при соотношении подачи в правое отверстие $q_1 = 0,08 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, в левое отверстие – $q_2 = 0,08 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$.

При оптимизации процесса измельчения пшеницы и ячменя по критерию минимума коэффициента вариации модуля размола, указанные данные отражают, что для получения продукции с незначительным рассеиванием модуля размола, необходимо снижение угловой скорости ротора и максимизировать подачу исходного материала в загрузочные горловины как в парном соотношении так и по отдельности, так как увеличение подачи способствует получению более однородной совокупности и выравненного гранулометрического состава.

Из проанализированных выше условий следует, в диапазоне угловой скорости вращения ротора $X_3 \leq 0$ степень рассеивания коэффициента вариации модуля размола имеет тенденцию к снижению и более однородную совокупность. После повышения окружной скорости молотков, при значении третьего фактора $X_3 \geq 0$, степень рассеивания превышает значение 33% и совокупность, претерпевая данный барьер, становится более неоднородной. Получение однородной совокупности и снижение коэффициента вариации модуля размола при измельчении пшеницы возможны при парной подаче исходного материала в загрузочные горловины при максимально открытых шиберных заслонках, что приводит к значительному снижению степени рассеивания.

При измельчении ячменя значение коэффициента вариации модуля размола имеет незначительную степень рассеивания данных и находится в диапазоне от 10% до 20%, то есть совокупность является однородной. Минимальное значение коэффициента вариации модуля размола достигается при парной подаче материала в обе загрузочные горловины, при установлении третьего фактора X_3 на нижнем уровне.

4.4. Оценка получаемого продукта по относительному (по массе) количеству целых зерен

В результате обработки данных, содержащихся в матрице X и полученных результатов, записанных в матрице Y по значению относительного (по массе) количества целых зерен $Ц$ (%), как остатке на решетке с диаметром отверстий 3-5 мм, где в качестве исходного материала взяты пшеница и ячмень, при помощи функции «polyfitstat» программного обеспечения «PTC Mathcad 15.0» нами вычислены коэффициенты для поверхности регрессии многомерного полинома, которые приведены в расчетной бланк-матрице приложений Б7 и Б8, на основании которых составлены следующие уравнения в кодированных переменных:

а) при измельчении пшеницы

$$Y_4(X_1, X_2, X_3) = 0.725 - 0.023 \cdot X_1 + 0.367 \cdot X_2 - 0.381 \cdot X_3 - 0.063 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.001 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.17 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.131 \cdot X_1^2 - 0.133 \cdot X_2^2 + 0.161 \cdot X_3^2. \quad (4.7)$$

б) при измельчении ячменя

$$Y_4(X_1, X_2, X_3) = 0.365 - 0.104 \cdot X_1 + 0.046 \cdot X_2 - 0.201 \cdot X_3 + 0.111 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.058 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.057 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.055 \cdot X_1^2 + 0.065 \cdot X_2^2 + 0.009 \cdot X_3^2. \quad (4.8)$$

Результаты регрессионного анализа модели уравнения полиномиальной регрессии, приведённые в расчетной бланк-матрице приложений Б7 и Б8,

отражают, что для уравнений (4.7, 4.8) коэффициент детерминации при дисперсионном анализе равен $R^2 = 97.5\%$ при измельчении пшеницы и 95.4% при измельчении ячменя.

Для получения визуального представления составленных уравнений регрессии (4.7, 4.8) построены поверхность отклика в аксонометрии (рис. 4.12, 4.13, 4.14), где приведена экспериментальная зависимость количества целых зерен в размоле от сочетаний двух из трех факторов подачи исходного материала в левое отверстие X_1 и правое отверстие X_2 , при установлении на постоянном уровне третьего фактора угловой скорости вращения ротора $X_3 = -1; 0; +1$.

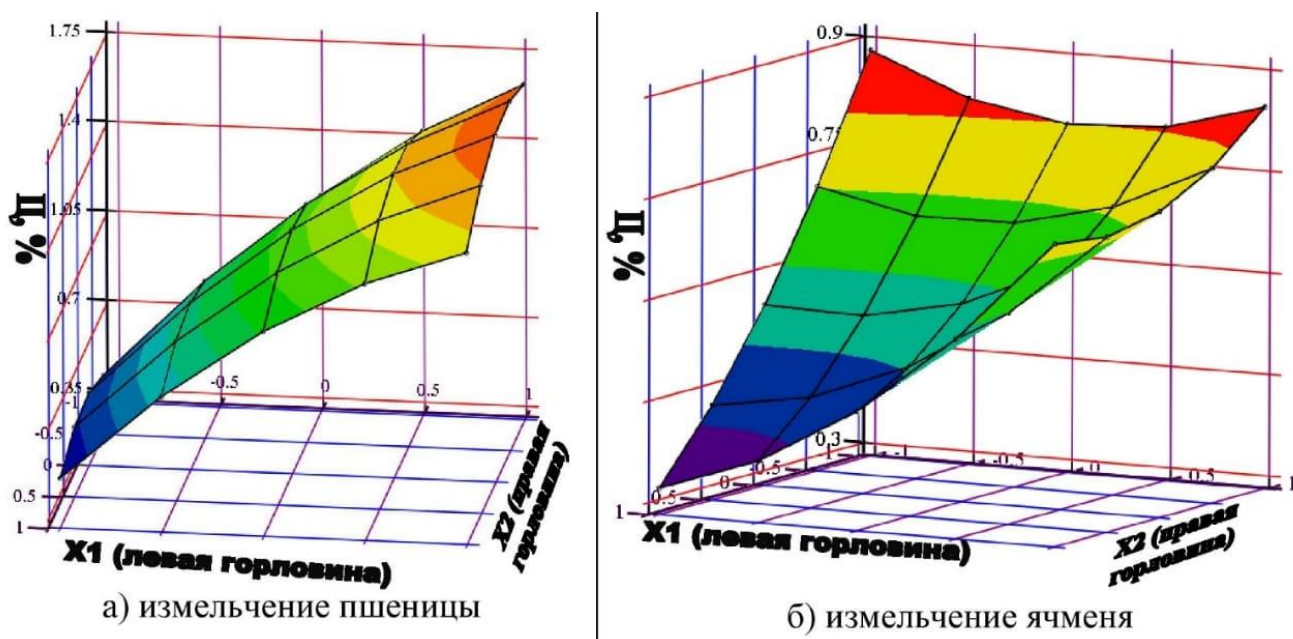
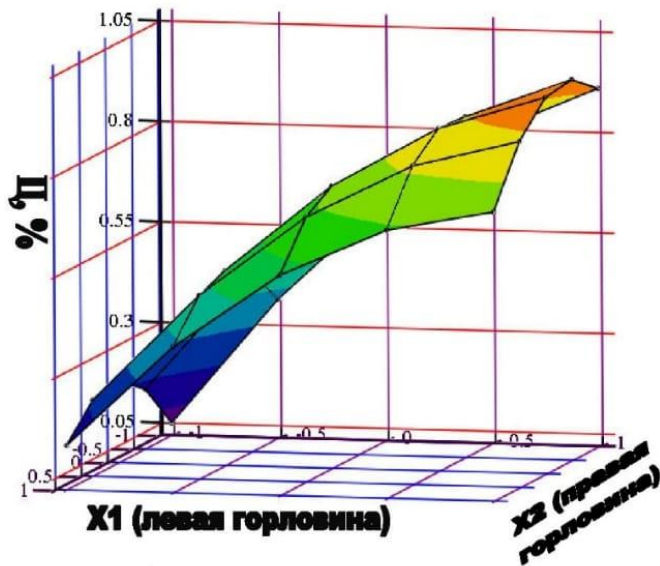
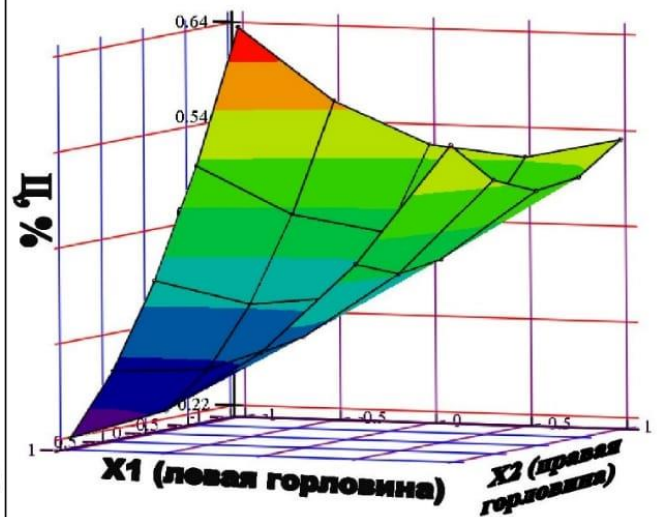


Рисунок 4.12 – Поверхность отклика, характеризующая влияние сочетаний факторов подачи исходного материала в левую X_1 и правую загрузочную горловину X_2 , при значении третьего фактора уравнения $X_3 = -1$, на показатель относительного (по массе) количества целых зерен в размоле Y_4

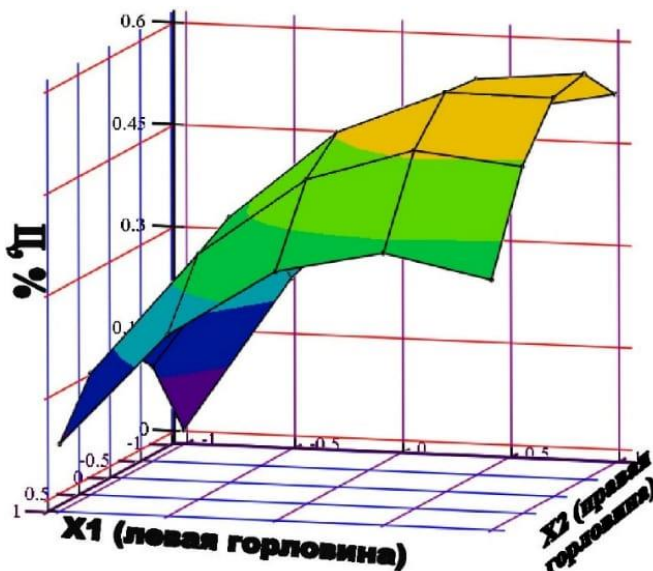


а) измельчение пшеницы

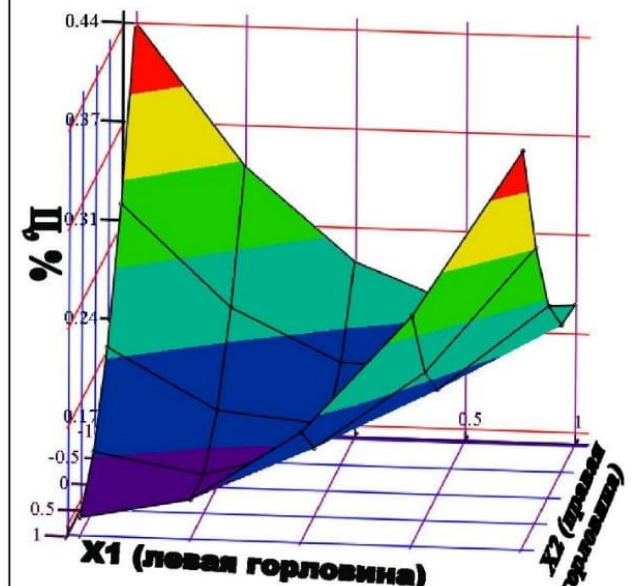


б) измельчение ячменя

Рисунок 4.13 – Поверхность отклика, характеризующая влияние сочетаний факторов подачи исходного материала в левую X_1 и правую загрузочную горловину X_2 , при значении третьего фактора уравнения $X_3 = 0 = const$, на показатель относительного (по массе) количества целых зерен в размоле Y_4



а) измельчение пшеницы



б) измельчение ячменя

Рисунок 4.14 – Поверхность отклика, характеризующая влияние сочетаний факторов подачи исходного материала в левую X_1 и правую загрузочную горловину X_2 , при значении третьего фактора уравнения $X_3 = +1 = const$, на показатель относительного (по массе) количества целых зерен в размоле Y_4

Анализируя результаты приведенного материала (рис. 4.12, 4.13 и 4.14), можно сделать следующие выводы: исходя из проекций на координатную плоскость, при минимальном значении третьего фактора угловой скорости вращения ротора $X_3 = -1$, границы показателя относительно (по массе) количества целых зерен в размоле пшеницы варьируются в диапазоне от 0,35 до 1,75 %, ячменя – в пределах от 0,31 до 0,87 %.

После повышения окружной скорости молотков, при значении третьего фактора $X_3 = 0$, наблюдается снижение количества целых зерен в размоле и сужение границ диапазона, которые при измельчении пшеницы варьируются в диапазоне от 0,05 до 1,05 %, при измельчении ячменя границы диапазона расширяются от 0,22 до 0,66 %. При увеличении угловой скорости ротора до верхнего предела $X_3 = +1$, количество целых зерен в размоле при измельчении пшеницы варьируется в пределах от 0 до 0,6%, ячменя – от 0,17 до 0,44%, при этом границы диапазона также сужаются.

Минимальное значение количества целых зерен в размоле Π (%) в процессе измельчения пшеницы наблюдается при подаче исходного материала в левую загрузочную горловину X_1 , а также при минимальной парной подаче материала. Максимальная значение целых зерен в размоле при измельчении пшеницы наблюдается при подаче исходного материала в правую загрузочную горловину X_2 . При парной подаче одновременно в загрузочные горловины количество целых зерен в размоле незначительно меньше, чем при подаче исходного материала в правую загрузочную горловину X_2 . С увеличением угловой скорости X_3 границы диапазона количественного соотношения целых зерен в размоле постепенно сдвигаются в сторону снижения в 1,5 раза, к нижнему значению шкалы до нулевых значений.

В процессе измельчения ячменя минимальная величина количества целых зерен в размоле наблюдается при подаче исходного материала в левую загрузочную горловину X_1 , максимальная – при подаче исходного материала в правую загрузочную горловину X_2 . С увеличением величины третьего фактора гиперповерхность приобретает более пологую структуру, и постепенно снижается

к нижнему значению шкалы. При измельчении ячменя увеличение угловой скорости X_3 также приводит к снижению величины и границ диапазона целых зерен в размоле в 1,2 раза.

При парном сочетании факторов X_1 и X_2 , и постепенном выравнивании равномерной подачи материала в камеру измельчения, наблюдается снижение количества целых зерен в размоле по сравнению с односторонней подачей в правое отверстие X_2 , односторонняя подача в левое отверстие X_1 приводит к уменьшению количества целых зерен.

Парное сочетание факторов X_1X_3 и установление X_2 на нижнем уровне приводят к минимальному значению количества целых зерен в размоле, по сравнению с парным взаимодействием X_2X_3 , при установлении X_1 на нижнем уровне, или парной подачи материала в камеру измельчения (Приложение Б8).

В целом увеличение угловой скорости ротора приводит к существенному снижению количества целых зерен в размоле, до фактически нулевых значений.

4.5. Влияние оппозитной загрузки материала на виброактивность молотковой дробилки

Для изучения технологического процесса, протекающего в дробилке с оппозитной загрузкой, проверки теоретически полученных данных и подтверждения выводов об уменьшении уровня механических колебаний, возбуждаемых молотками, при реализации многофакторного эксперимента решали задачу получения уравнений регрессии в кодированном виде, где в качестве функции отклика, характеризующего работу дробилки, принят Y_5 – виброактивность механической системы посредством определения амплитуды виброускорения a_B .

По результатам обработки данных, содержащихся в матрице X , и полученных результатов, записанные в матрице Y по виброускорению, где в

качестве исходного материала взята пшеница и ячмень, при помощи функции «polyfitstat» программного обеспечения «PTC Mathcad 15.0», нами вычислены коэффициенты многомерной полиномиальной регрессии второго порядка в кодированном виде. Данные приведены в расчетной бланк-матрице приложений Б9 и Б10.

По результатам статистической обработки результатов эксперимента по параметрам вибрации при помощи программного обеспечения «PTC Mathcad 15.0» составлено уравнение регрессии в кодированных переменных, где в качестве функции отклика принято виброускорение, при измельчении следующего зернового материала:

а) пшеница:

$$Y_5(X_1, X_2, X_3) = 14.63 - 0.20 \cdot X_1 + 1.60 \cdot X_2 + 5.35 \cdot X_3 - 0.325 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.525 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.325 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.196 \cdot X_1^2 + 1.196 \cdot X_2^2 + 1.846 \cdot X_3^2; \quad (4.9)$$

б) ячмень:

$$Y_5(X_1, X_2, X_3) = 12.367 - 0.15 \cdot X_1 + 0.588 \cdot X_2 + 3.813 \cdot X_3 - 0.2 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.85 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.775 \cdot X_2 \cdot X_3 + 1.104 \cdot X_1^2 + 1.179 \cdot X_2^2 + 2.129 \cdot X_3^2. \quad (4.10)$$

Коэффициенты детерминации при измельчении пшеницы составили $R^2 = 97,8\%$, ячменя – $R^2 = 95,9\%$, отражающие степень приближения уравнения регрессии к экспериментальным данным, демонстрируют адекватность уравнений регрессии.

При помощи программного обеспечения «PTC Mathcad 15.0» нами составлены графические изображения уравнений регрессии (4.9, 4.10), представленные на рисунках 4.15, 4.16, 4.17, один из факторов стабилизирован и установлен на постоянном уровне.

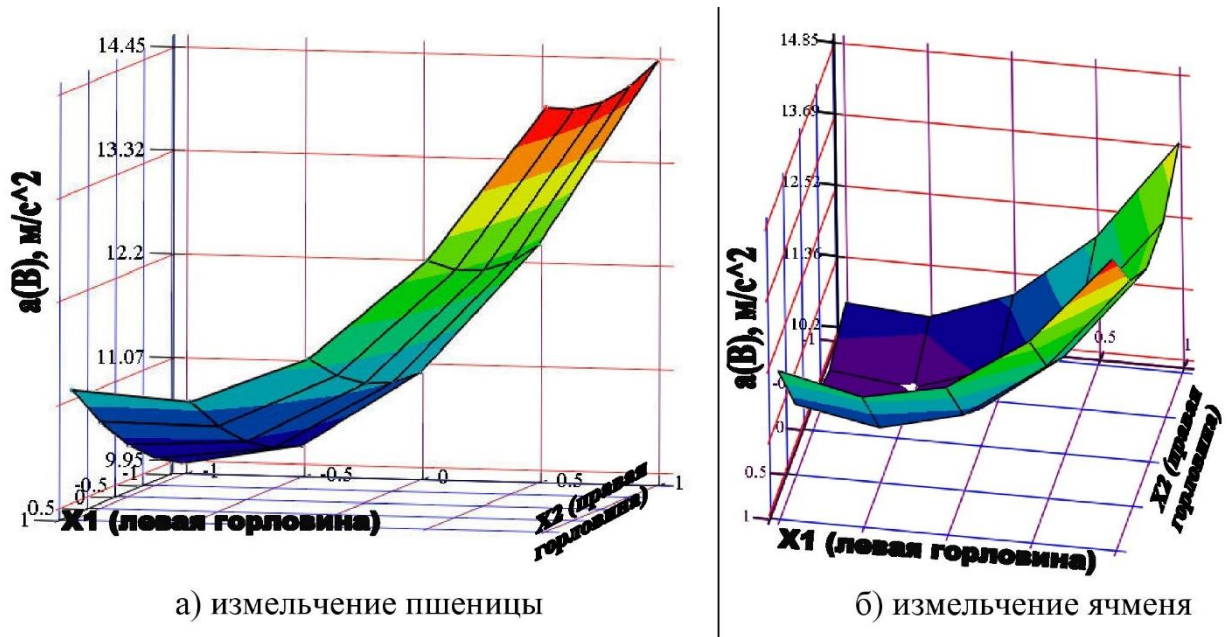


Рисунок 4.15 – Поверхность отклика, характеризующая влияние сочетаний факторов подачи исходного материала в левое X_1 и правое отверстие X_2 , при значении третьего фактора уравнения $X_3 = -1$, на величину виброускорения Y_5

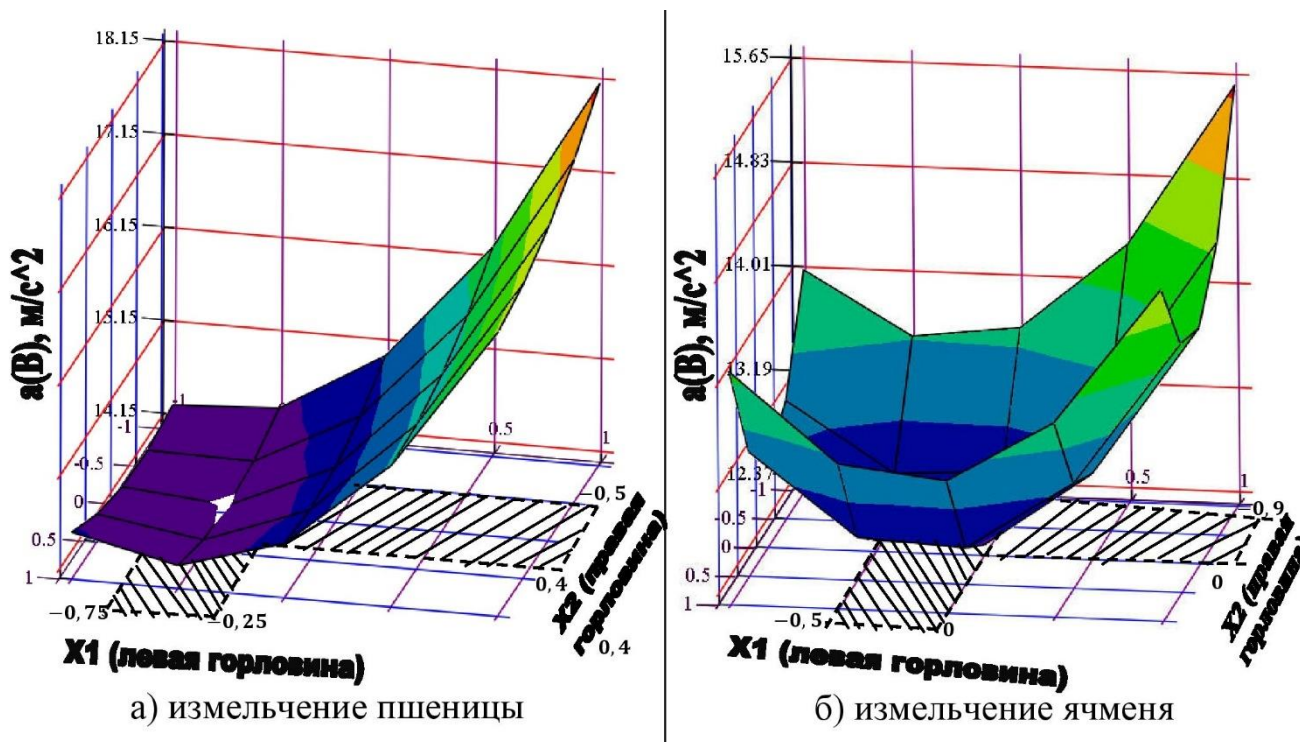
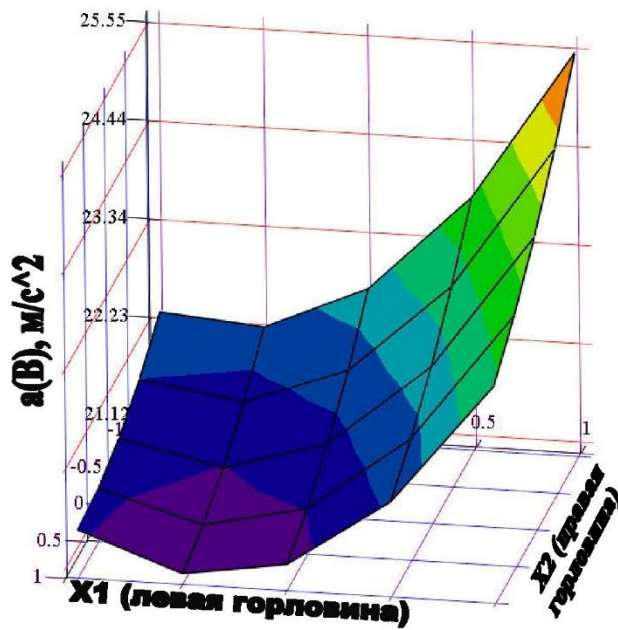
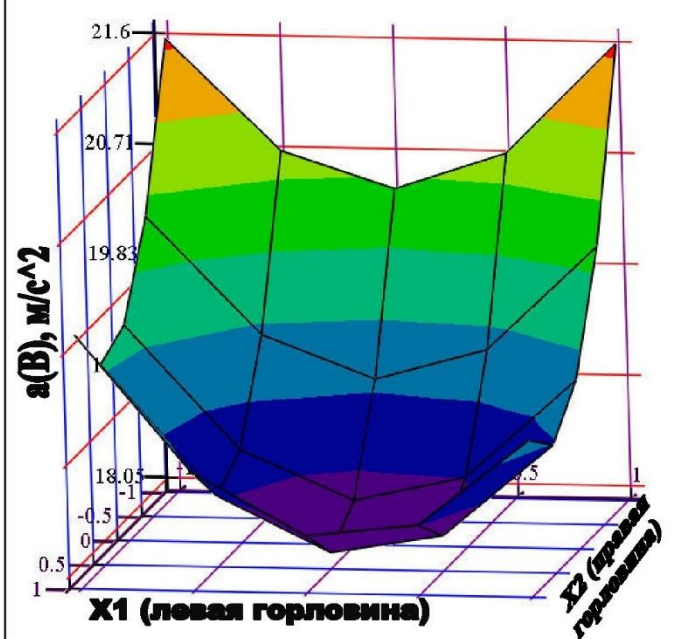


Рисунок 4.16 – Поверхность отклика, характеризующая влияние сочетаний факторов подачи исходного материала в левое X_1 и правое отверстие X_2 , при значении третьего фактора уравнения $X_3 = 0 = const$, на величину виброускорения Y_5



а) измельчение пшеницы



б) измельчение ячменя

Рисунок 4.17 – Поверхность отклика, характеризующая влияние сочетаний факторов подачи исходного материала в левое X_1 и правое отверстие X_2 , при значении третьего фактора уравнения $X_3 = +1 = const$, на величину виброускорения Y_5

Анализируя результаты спроецированного программой «PTC Mathcad 15.0» визуализированного уравнения регрессии, можно сделать следующие выводы:

1. Графические изображения по параметру виброускорения, где в качестве исходного материала взят ячмень, показывают, что парное соотношение подачи исходного материала в левое X_1 и правое отверстие X_2 имеет сильную зависимость и образует поверхность эллиптического параболоида, приближающегося к фиксированному пределу нижней границы величины виброускорения, с центром оси симметрии по оси Z , с ярко выраженной структурой нижней части. Увеличение в некоторой прогрессии величины виброускорения наблюдается с увеличением значений величины парных параметров X_2X_3 и в меньшей степени – X_1X_3 .

При измельчении ячменя, исходя из проекций на координатную плоскость, величина вибрации при угловой скорости вращения ротора $X_3 = -1$ (линейной

скорости 35 м/с) составила от 10,15 до 14,85 м/с²; при $X_3 = 0$ (линейной скорости 45 м/с) границы диапазона составили значения – от 12,37 до 15,65 м/с²; при $X_3 = +1$ (линейной скорости 55 м/с) от 18,05 до 21,6 м/с².

2. В процессе измельчения пшеницы минимальное значение виброактивности достигается при увеличении подачи измельчаемого материала в левое отверстие по сравнению с правым, по соотношению 3/1, что приводит к снижению виброактивности. Это прослеживается из рисунков 4.15 «б», 4.16 «б», 4.17 «б», на которых представлены эллиптические параболоиды, лежащие в декартовой прямоугольной системе координат. Парабола приближается к фиксированному пределу на своей вершине, в форме точки на оси OY , которая представляет собой прямую, лежащую по оси OX системы координат в центре сечения поверхности отклика, равной -0.5 , то есть нижняя часть параболоида представляет собой нижнюю границу величины виброускорения, результатом которой явилось сочетание двух парных параметров X_1X_2 , т.е. подачи исходного материала в левое и правое отверстие.

При измельчении пшеницы, исходя из проекций на координатную плоскость представленных на графических изображениях, минимальные параметры вибрации при угловой скорости вращения ротора $X_3 = -1$ (линейной скорости 35 м/с) составили от 9,95 до 14,45 м/с²; $X_3 = 0$ (линейной скорости 45 м/с) – от 14,15 до 18,15 м/с²; $X_3 = +1$ (линейной скорости 55 м/с) – от 21,12 до 25,55 м/с².

3. С увеличением параметра X_2 , характеризующего подачу исходного материала в правое отверстие, наблюдается возрастание величины выходного параметра виброускорения по закону экспоненциального роста и имеет ярко выраженную структуру с правой стороны. При увеличении третьего фактора уравнения X_3 наблюдается постепенная пологая структура параболоида от центра к периферии, что свидетельствует о расширении границ диапазона в результате сочетания двух парных параметров X_1X_2 которые могут оказывать в меньшей

степени влияние на виброускорение, в сравнении с сочетанием данных факторов при минимальном значении угловой скорости.

При решении оптимизационной задачи процесса измельчения пшеницы при применении функции «Minimize (Y, X)» программы «PTC Mathcad 15.0» на заданном множестве значений факторов установлено минимальное значение функции, при которых уравнение регрессии достигает локального минимума параметров виброускорения, значения факторов составили следующие величины: $X_1 = -0.947, X_2 = -0.872, X_3 = -0.548$.

При оптимизации процесса измельчения ячменя по критерию минимума параметров виброускорения значения факторов составили: $X_1 = -0.372, X_2 = -0.61, X_3 = -1$.

Анализ оптимизации процесса измельчения пшеницы по критерию минимума величины виброускорения указывает на тот факт, что при увеличении параметра угловой скорости вращения ротора X_3 наблюдается незначительное уменьшение соотношения загружаемого материала в левое отверстие по сравнению с правым, от 2,9 кг/сек. : 1 кг/сек. до 3,3 кг/сек. : 1кг/сек. Анализ оптимизации процесса измельчения ячменя по критерию минимума величины виброускорения на корпусе дробилки указывает на тот факт, что минимальное значение виброускорения возможно в случае сочетания двух факторов двусторонней подачи материала. Указанное свидетельствует о том, что минимальное значение виброускорения при измельчении пшеницы достигается при оппозитной загрузке дробилки.

Для формализации этих закономерностей построены двухмерные графики каждого в отдельности фактора X_1 и X_2 при установлении значений фактора X_3 и значений второго аргумента X_1 или X_2 на постоянном уровне (рис. 4.18, 4.19).

На графиках 4.18, 4.19 представлены параболы, ветви которых направлены вверх по оси ординат.

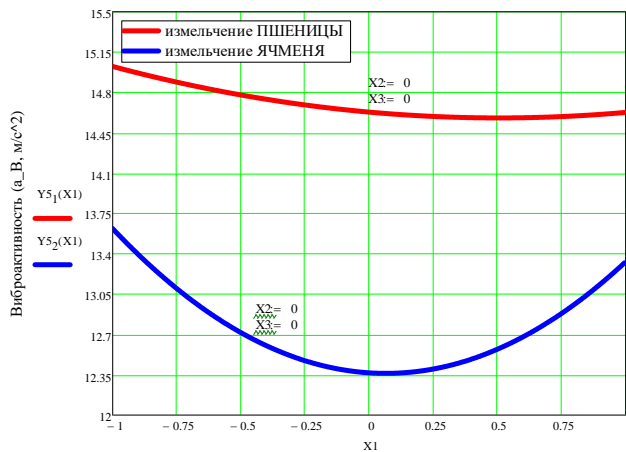


Рисунок 4.18 – Параметры виброктивности, в зависимости от подачи материала в левую загрузочную горловину при значениях подачи материала в правую $X_2 = 0$ и угловой скорости $X_3 = 0$

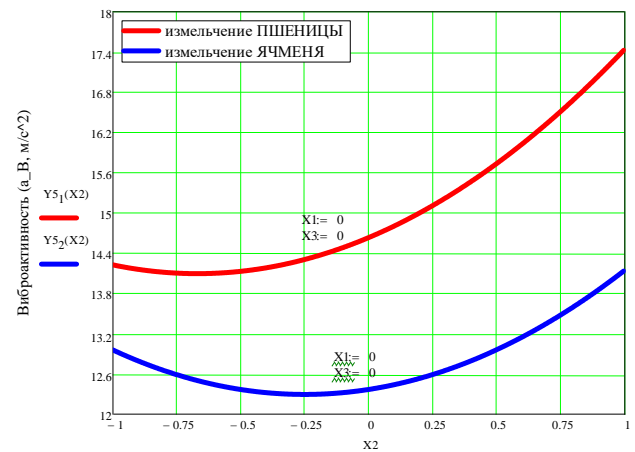


Рисунок 4.19 – Параметры виброктивности, в зависимости от подачи материала в правую загрузочную горловину при значениях подачи материала в левую $X_1 = 0$ и угловой скорости $X_3 = 0$

На графике (рисунок 4.18), отображающем параметры виброктивности в зависимости от подачи материала в левую загрузочную горловину, представлены параболы, которые симметричны относительно прямой, перпендикулярной оси OX_1 . При этом образуются вершины в процессе измельчения пшеницы в точке $X_1 = 0,52$, ячменя – $X_1 = 0,11$ при различных значениях подачи материала в левую загрузочную горловину и значении факторов $X_2 = 0$ и $X_3 = 0$. Для начальной точки параболы характерно достижение граничных максимумов со значения $15,02 \text{ м/с}^2$ в процессе измельчения пшеницы, и $13,55 \text{ м/с}^2$ - при измельчении ячменя. В последующем при увеличении подачи в левую загрузочную горловину кривая имеет тренд к снижению по нисходящей траектории, при этом обнаруживается минимум. Виброактивность при указанных минимумах соответствует значениям при измельчении пшеницы $14,5 \text{ м/с}^2$, ячменя – $12,36 \text{ м/с}^2$. В дальнейшем при увеличении объема материала, поступающего на измельчение в левую загрузочную горловину ветвь параболы, имеет восходящий тренд, достигая значения при измельчении пшеницы $14,6 \text{ м/с}^2$, ячменя – $13,3 \text{ м/с}^2$.

При подаче материала в правую загрузочную горловину и значении факторов $X_1 = 0$ и $X_3 = 0$ (рисунок 4.19), в прямоугольной системе координат наблюдаются параболы, имеющие ось симметрии, проходящие через вершины

перпендикулярно оси OX , в процессе измельчения пшеницы фокальные точки составляют $X_2 = -0,64$, ячменя – $X_2 = -0,25$, при которых виброактивность достигает минимума и соответствует значению при измельчении пшеницы $14,1 \text{ м/с}^2$, ячменя – $12,3 \text{ м/с}^2$. Для данного интервала характерен узкий диапазон снижения, который указывает на необходимость увеличения подачи материала со стороны X_1 . Также как и в предыдущем графическом изображении, с вершины ветви параболы характеризующие значения виброактивности, начинают расти по восходящей траектории при увеличении подачи в правую загрузочную горловину, имея более широкий диапазон роста, достигая локальных максимумов в точке $X_2 = 1$, при которых значения виброактивности механической системы достигает при измельчении пшеницы $17,45 \text{ м/с}^2$, ячменя – $14,05 \text{ м/с}^2$.

Анализируя совокупные данные графических изображений (рисунок 4.18, 4.19), целесообразно уточнить, что для снижения виброактивности молотковой дробилки необходимо увеличение подачи материала в горловину, расположенную со стороны молотков, совершающих движение вертикально вверх по восходящей траектории.

Результаты эксперимента показали, что односторонняя загрузка материала в горловину камеры измельчения, расположенную со стороны вращающихся молотков, совершающих движение вертикально вниз по нисходящей траектории X_2 , приводит к увеличению величины виброускорения. Воздушный поток, создаваемый вращающимися ударными элементами в камере измельчения, а также вращающийся воздушно-продуктовый слой создают препятствие проникновению материала внутрь камеры измельчения дробилки из горловины, расположенной со стороны вращающихся молотков, совершающих движение вертикально вверх по восходящей ветви траектории, что обуславливает в меньшей степени влияние фактора X_1 на величину виброускорения.

При измельчении пшеницы и ячменя величина виброускорения снижается до нижней границы исследуемого диапазона, при условии парной подачи материала, с увеличением объема материала в горловину, расположенную со стороны вращающихся молотков, совершающих движение вертикально вверх по

восходящей траектории, уровень вибрации повышается при односторонней подаче.

4.6. Характеристика шума молотковой дробилки с оппозитной загрузкой исходного материала

При реализации многофакторного эксперимента, до момента запуска электродвигателя измельчителя, при проведении измерения уровня звука (октавных уровней звукового давления) помех (шумов, которые не подлежат измерению) в производственном помещении, значение шума (октавного уровня звукового давления) согласно дисплею шумомера Мегеон – 92140, составило 39,2 дБА, при установлении переключателя частотной характеристики уровней звука в положение «А».

По результатам обработки полученной статистической информации в процессе проведения опытов при измельчении пшеницы и ячменя, при использовании функции «polyfitc(X, Y, n)» в среде MathCAD, вычислены коэффициенты для поверхности регрессии многомерного полинома по параметрам уровня звука, данные которой приведены в расчетной бланк-матрице листинга приложений Б 11 и Б 12.

Регрессивный анализ полученной статистической информации многомерной полиномиальной регрессии по параметрам уровня звука, произведен при использовании функции «polyfitstat(X, Y, n)» в среде MathCAD, результаты которого представлены в приложении Б 11 и Б 12. Полученные значения в результате расчетов отображают зависимость статистических данных между переменными-предикторами, содержащимися в матрице X и переменной отклика Y , согласно которым коэффициенты детерминации при дисперсном анализе при измельчении пшеницы составили $R^2 = 95.9\%$, ячменя – 96.2% , демонстрирующие

на адекватность уравнений регрессии, и показывают силу нелинейной зависимости.

В результате статистической обработки результатов эксперимента по параметрам уровня звука (общий уровень звукового давления во всем спектре частот) L_A , где исходным материалом для измельчения являлась пшеница, рассчитано уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$Y_6(X_1, X_2, X_3) = 83.067 + 0.138 \cdot X_1 + 1.475 \cdot X_2 + 1.087 \cdot X_3 - 1.675 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.1 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1.075 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.667 \cdot X_1^2 + 1.542 \cdot X_2^2 + 1.067 \cdot X_3^2. \quad (4.11)$$

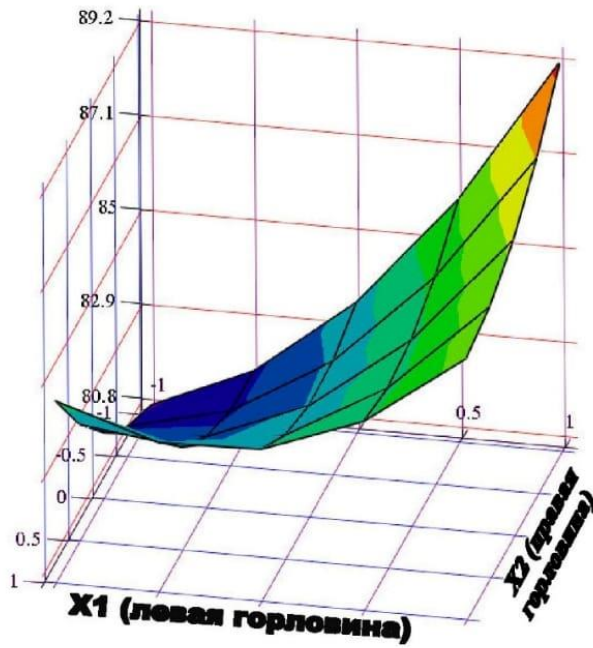
Статистическая обработка результатов эксперимента, где в качестве исходного материала для измельчения взят ячмень, дала возможность вычисления коэффициентов регрессии, при помощи которых составлено уравнение регрессии в кодированных переменных, представляющее вид:

$$Y_6(X_1, X_2, X_3) = 80.533 + 1.125 \cdot X_1 + 1.875 \cdot X_2 - 0.05 \cdot X_3 - 1.675 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.075 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.725 \cdot X_2 \cdot X_3 + 2.996 \cdot X_1^2 + 2.696 \cdot X_2^2 + 2.096 \cdot X_3^2. \quad (4.12)$$

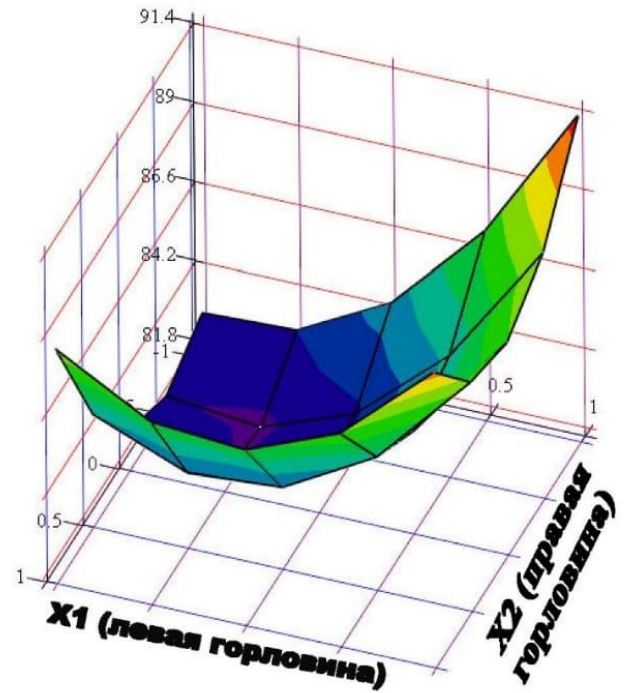
По уравнениям (4.11, 4.12) были построены поверхности отклика, представленные на рисунках 4.20, 4.21, 4.22.

Анализируя результаты спроецированного программой «PTC Mathcad 15.0» визуализированного уравнения регрессии (рисунок 4.20; 4.21; 4.22) представляющее поверхность отклика в аксонометрии, можно сделать следующие выводы:

1. При измельчении ячменя образуется поверхность параболоида, которая приближается к фиксированному пределу и представляет форму точки на осях OX , OY и прямую с центром оси симметрии по оси OZ , перемещающуюся в системе координат по осям OX , OY от поверхности отклика приближенной к значению от -0.5 до 0 при изменении угловой скорости, то ось нижняя граница величины уровня звука смещается от периферии к центру при увеличении значения третьего фактора X_3 .

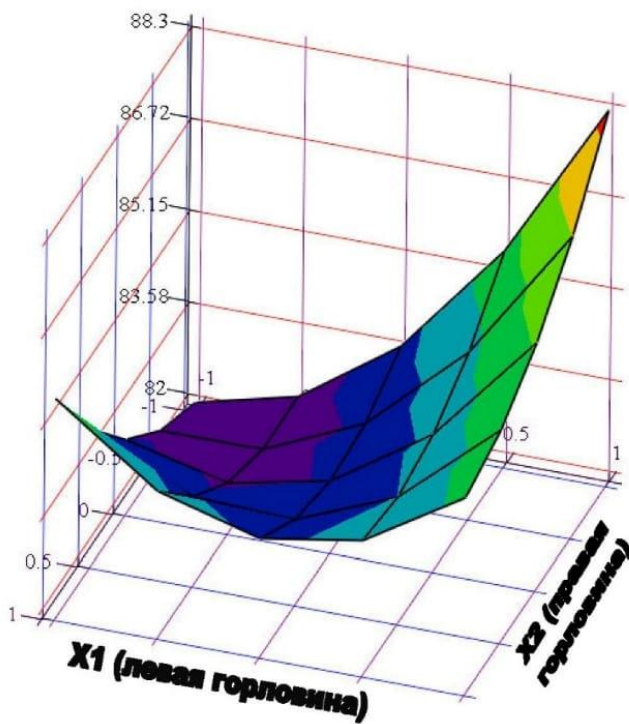


а) измельчение пшеницы

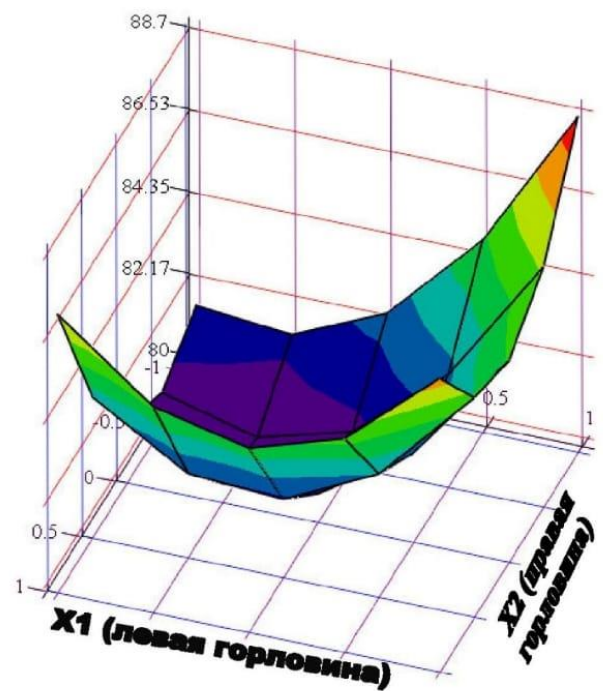


б) измельчение ячменя

Рисунок 4.20 – Поверхность отклика, характеризующая влияние сочетаний факторов подачи исходного материала в левое X_1 и правое отверстие X_2 , при значении третьего фактора уравнения $X_3 = -1$, на уровень звука Y_6



а) измельчение пшеницы



б) измельчение ячменя

Рисунок 4.21 – Поверхность отклика, характеризующая влияние сочетаний факторов подачи исходного материала в левое X_1 и правое отверстие X_2 , при значении третьего фактора уравнения $X_3 = 0$, на уровень звука Y_6

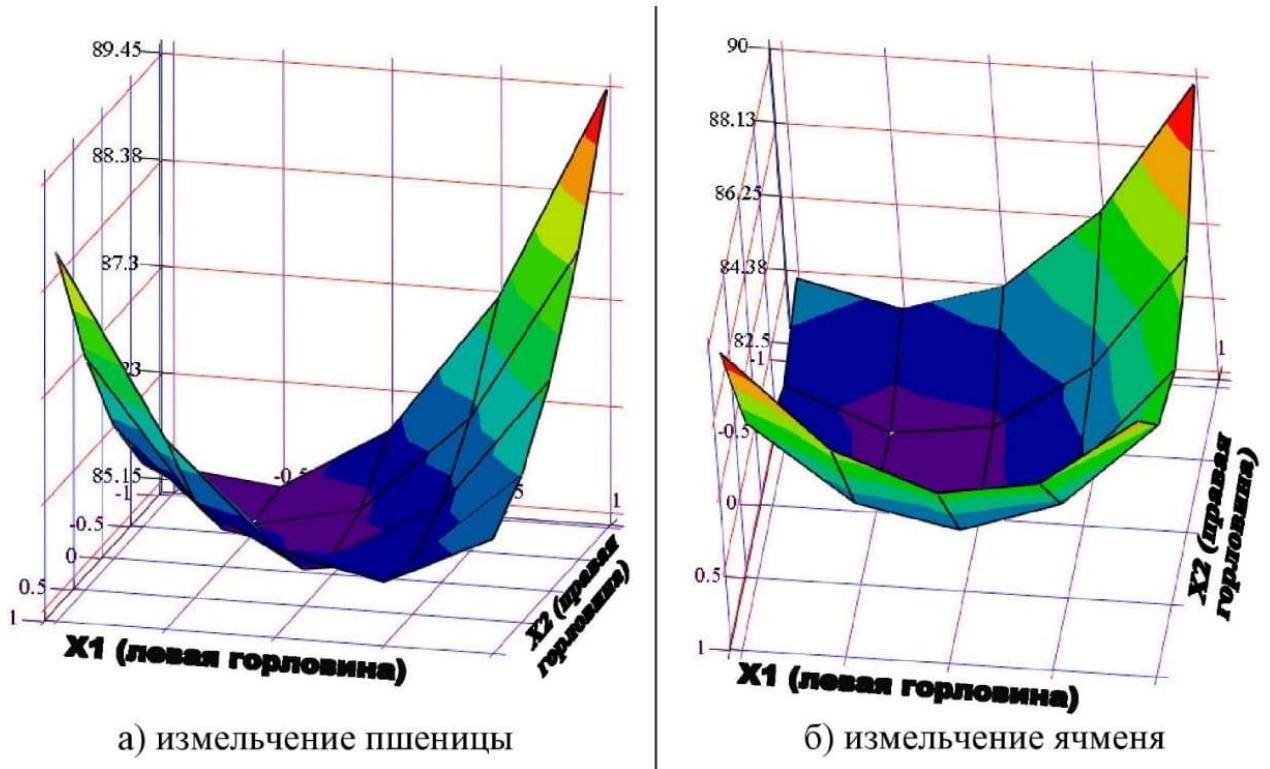


Рисунок 4.22 – Поверхность отклика, характеризующая влияние сочетаний факторов подачи исходного материала в левое X_1 и правое отверстие X_2 , при значении третьего фактора уравнения $X_3 = +1$, на уровень звука Y_6

2. Увеличение величины уровня звука наблюдается с увеличением значений величины парных параметров X_2X_3 и в меньшей степени X_1X_3 , возрастающего в данном диапазоне работы дробилки при отдалении от прямой с центром оси симметрии OZ . Указанное говорит, что в процессе измельчения ячменя минимальное значение уровня звука достигается при увеличении подачи измельчаемого материала в левое отверстие по сравнению с правым, по соотношению 5/3.

3. При измельчении ячменя, исходя из проекций на координатную плоскость, минимальные параметры вибрации при угловой скорости вращения

ротора $X_3 = -1$ составили от 81,8 до 91,4 дБА; $X_3 = 0$ – от 80 до 88,7 дБА; $X_3 = +1$ – от 82,5 до 90 дБА.

При оптимизации процесса измельчения ячменя по критерию минимума параметров уровня звука L_A использовали функцию «Minimize (Y, X)» пакета MathCAD, расчетные значения которых приведены в бланк-матрице приложений Б 11 и Б 12, получили следующие значения оптимальных значений факторов: $X_1 = -0.316, X_2 = -0.456, X_3 = -0.073$.

Анализ оптимизации процесса измельчения ячменя по критерию минимума величины уровня звука L_A указывает на тот факт, что при увеличении параметра угловой скорости вращения ротора X_3 наблюдается уменьшение соотношения загружаемого материала в левое отверстие по сравнению с правым – от 5/3 (или в 1,6 раз) до 1/1.

На показатели величины уровня звука в процессе измельчения оказывают существенное влияние такие факторы, как подача исходного материала отдельно в левое X_1 или правое отверстие X_2 , а также угловая скорость вращения ротора X_3 , при снижении последней наблюдается более пологая структура графических изображений зависимостей.

Отсюда следует, что с ростом частоты вращения ротора нижняя граница параболоида, проецируемого зависимость уровня звука от факторов, смещается от периферии к центру, при наличии условий парной подачи материала на измельчение и увеличении частоты вращения.

Минимальное значение уровня звука L_A возможно в случае сочетания двух факторов двусторонней подачи материала при минимальном значении угловой скорости вращения ротора.

В процессе измельчения пшеницы минимальное значение уровня звука L_A достигается при увеличении подачи измельчаемого материала в левое отверстие по сравнению с правым, по соотношению 4/3, что приводит к снижению уровня звука. Это прослеживается из графических изображений поверхности отклика на рисунках 4.20; 4.21; 4.22, на которых представлены параболоиды, лежащие в декартовой прямоугольной системе координат, парабола приближается к

фиксированному пределу на своей вершине в нижней границе на оси OY . С увеличением параметра X_2 , характеризующего подачу исходного материала в правое отверстие, наблюдается возрастание величины выходного параметра уровня звука. При увеличении третьего фактора уравнения X_3 наблюдается постепенная пологая структура параболоида, которая смещается от центра к периферии, что свидетельствует о расширении границ диапазона в результате сочетания двух парных параметров X_1X_2 , которые могут оказывать в меньшей степени влияние на уровень звука, в сравнении с сочетанием данных факторов при минимальном значении угловой скорости.

При измельчении пшеницы, исходя из проекций на координатную плоскость представленных на графических изображениях, минимальные параметры вибрации при угловой скорости вращения ротора $X_3 = -1$ составили от 80,8 до 89,2 дБ А; при $X_3 = 0$ – от 82 до 88,3 дБ А; при $X_3 = +1$ – от 85,15 до 89,45 дБ А.

На графических изображениях наиболее четко продемонстрировано, что сочетание парных факторов X_1X_2 приводят к снижению величины уровня звука, чем при односторонней загрузке.

При оптимизации процесса измельчения пшеницы по критерию минимума параметров уровня звука получили следующие значения факторов для достижения рациональных параметров и минимальных значений уровня звука: $X_1 = -0.94$, $X_2 = -0.714$, $X_3 = -0.79$.

Анализ оптимизации процесса измельчения пшеницы по критерию минимума величины уровня звука указывает на тот факт, что при увеличении параметра угловой скорости вращения ротора X_3 наблюдается незначительное уменьшение соотношения загружаемого материала в левое отверстие по сравнению с правым – 4 кг/сек : 3 кг/сек. Указанное говорит о том, что минимальное значение уровня звука при измельчении пшеницы достигается при увеличении загружаемого материала в загрузочную горловину, расположенную со стороны движения молотков, совершающих вертикально вверх движение по восходящей ветви траектории.

Для визуализации изменения уровня звука молотковой дробилки в процессе измельчения, в зависимости от значений подачи материала в левую и правую загрузочную горловину, построены двухмерные графики (рисунок 4.23, 4.24) каждого в отдельности фактора X_1 и X_2 при установлении фактора X_3 и значении второго аргумента X_1 или X_2 на постоянном уровне. На этих графиках видны области минимальных значений критерия Y_6 .

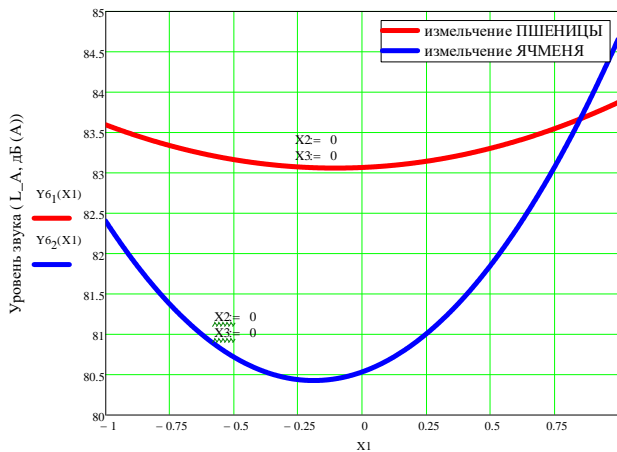


Рисунок 4.23 – Параметры уровня звука, в зависимости от подачи материала в левую загрузочную горловину при значениях подачи материала в правую $X_2 = 0$ и угловой скорости $X_3 = 0$

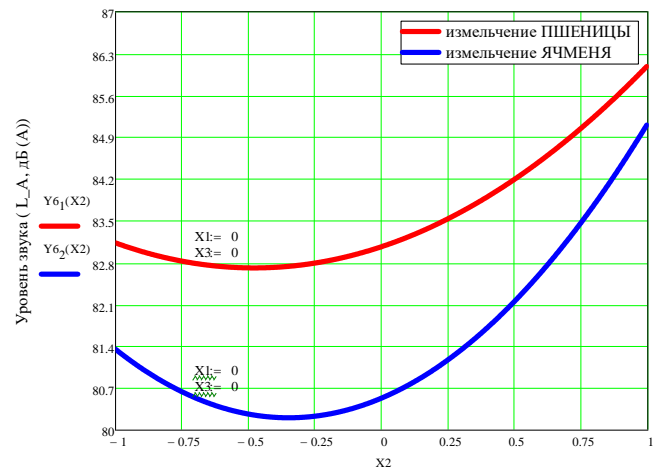


Рисунок 4.24 – Параметры уровня звука, в зависимости от подачи материала в правую загрузочную горловину при значениях подачи материала в левую $X_1 = 0$ и угловой скорости $X_3 = 0$

При рассмотрении рисунка 4.23, можно указать следующее: точки параболы, ближайšie к её директрисе по оси OX , образуют впадину параболы с осью симметрии, которая проходит параллельно оси OY . При измельчении пшеницы точка минимума составляет $X_1 = -0,22$ при величине уровня звука 83,1 дБ (A), ячменя – $X_1 = -0,24$ при 80,4 дБ (A). В границах диапазона по оси ординат от 80,3-82,4 дБ (A) имеется участок параболы, указывающий на снижение уровня звука при парном соотношении подачи материала. При увеличении подачи материала в левую загрузочную горловину, в интервале $X_1 = (-1) - (-0,22)$, ячменя – $X_1 = (-1) - (-0,24)$ наблюдается снижение величины уровня звука. Удаляясь от впадины параболы за пределы данных интервалов уровень звука имеет тенденцию к увеличению, достигая граничного максимума в точке $X_1 = 1$,

при которых уровень шума при измельчении пшеницы достигает 83,8 дБ (А), ячменя – 84,75 дБ (А)

Аналогичны свойства парабол, представленных на рисунке 4.24, имеющих фокальную ось OY , перпендикулярную оси ординат, где уровень звука достигает минимальные значения в процессе измельчения пшеницы 82,75 дБ (А) в точке $X_2 = -0,45$, ячменя – 80,3 дБ (А) в точке $X_2 = -0,36$. Для данных графических изображений характерен ограниченный диапазон спада величины уровня звука при увеличении подачи материала со стороны ударных элементов, вращающихся по восходящей ветви траектории. Диапазон варьируется при измельчении пшеницы в пределах интервала $X_1 = (-1) - (-0,45)$, ячменя – $X_1 = (-1) - (-0,36)$. Удаляясь от данного интервала до границы при $X_1 = 1$, имеем тенденцию роста, при которой уровень звука при измельчении пшеницы достигает пиковых значений 86 дБ (А), ячменя – 85,1 дБ (А).

Таким образом, обобщенные консолидированные данные графических изображений (рисунок 4.23, 4.24) говорят о том, что для снижения уровня звука как при измельчении пшеницы, так и при измельчении ячменя необходимо парное соотношение подачи материала в обе загрузочные горловины, при условии увеличения подачи материала в горловину, расположенную со стороны молотков, вращающихся по восходящей ветви траектории.

Сравнивая уровень звука при односторонней и парной подаче в процессе измельчения ячменя, было установлено, что среднее значение снижения уровня звука при парной подаче составило 4,7 % в отличие от односторонней подачи. При загрузке отдельно в правое отверстие X_1 уровень звука увеличился на 5,1% в отличие от парной подачи, при загрузке отдельно в левое отверстие X_2 – на 4,3 %.

При сравнительной оценке уровня звука при парной и односторонней подаче в процессе измельчения пшеницы было установлено, что среднее значение снижения уровня звука при парной подаче составило 2,5 % в отличие от односторонней. При загрузке материала отдельно в правое отверстие X_1 уровень звука увеличился на 2,7% в отличие от парной подачи, при загрузке отдельно в левое X_2 – на 2,2%.

Исследование влияния оппозитной загрузки измельчаемого материала на уровень звука показало, что при равном соотношении подачи материала в камеру измельчения шум, создаваемый молотковой дробилкой при измельчении материала снижается, особенно это заметно при линейной скорости молотков более 45 м/сек., с увеличением угловой скорости ротора границы диапазона постепенно сдвигаются в сторону увеличения значений уровня звука.

4.7. Оптимизация процесса измельчения зерна в дробилке с оппозитной загрузкой сырья

Процедура оптимизации проведена на основе методики, изложенной в главе 3 на (см. соотношения (3.18) – (3.22)). Напомним, что при этом первоначальная многокритериальная задача была переведена в ранг однокритериальной на основе выделения одного комплексного критерия оптимальности – энергоемкости $\mathcal{E}(x_i)$, а другие критерии оптимальности были преобразованы в ограничения задачи.

По результатам обработки и анализа данных зависимости энергоемкости процесса измельчения и иных исследуемых величин от пяти выбранных величин были получены уравнения регрессии (4.1 – 4.12) и установлены оптимальные параметры.

При проведении эксперимента за основную величину оптимизации процесса измельчения был принят параметр энергоемкости процесса измельчения. Результаты лабораторных исследований показали, что минимальная энергоемкость процесса измельчения достигается при нулевом уровне фактора X_3 . С уменьшением величины фактора X_3 границы диапазона энергоемкости сдвигаются в верхнюю часть измерительной шкалы, увеличивая значение данной величины.

Для решения задачи оптимизации и отыскания искомой величины минимальных энергозатрат в процессе измельчения и получения продукции

требуемого размола, запишем ее как сумму произведения факторов, влияющих на процесс измельчения:

а) для измельчения пшеницы

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{п}}(X_1, X_2, X_3) := & 5.357 - 0.59 \cdot X_1 - 1.162 \cdot X_2 - 0.103 \cdot X_3 + 0.572 \cdot X_1 \cdot X_2 + \\ & 0.264 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.58 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.192 \cdot X_1^2 + 0.902 \cdot X_2^2 + 1.191 \cdot X_3^2; \end{aligned} \quad (4.13)$$

б) для измельчения ячменя

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{я}}(X_1, X_2, X_3) = & 7.574 - 2.174 \cdot X_1 - 3.564 \cdot X_2 + 2.066 \cdot X_3 + 2.217 \cdot X_1 \cdot X_2 - \\ & 2.317 \cdot X_1 \cdot X_3 - 2.22 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.154 \cdot X_1^2 + 1.889 \cdot X_2^2 + 3.315 \cdot X_3^2. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Задача применительно к процессу измельчения зерновых материалов формулируется как задача поиска условного минимума целевой функции при наличии ряда ограничений.

Реализация оптимизации энергоемкости процесса измельчения осуществлена посредством использования двух программных модулей – модуль ввода исходных данных и модуль результатов оптимизации и проверки решения поставленной задачи, представленных в приложениях Б 13 и Б 14.

Модуль ввода исходных данных включает приведение системы нелинейных балансовых уравнений регрессии, полученных по иным критериям оптимальности, переведенных в ограничения, исходя из установленных требований:

- 1) для модуля размола $0,2 \leq Y_2(X_1, X_2, X_2) \leq 1,2$;
- 2) для коэффициента вариации модуля размола $0 \leq Y_3(X_1, X_2, X_2) \leq 50$;
- 3) для относительного (по массе) количества целых зерен $0 \leq Y_4(X_1, X_2, X_2) \leq 1$;
- 4) для уровня звука $0 \leq Y_6(X_1, X_2, X_2) \leq 85$.

В результате оптимизации процесса измельчения пшеницы в среде MathCAD с использованием функций «Minimize (Y, X)», посредством поиска экстремумов значений факторов, при которых функция цели достигает локального минимума $\Theta = 4.864 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \lambda}$, значения факторов составили $X_1 = 0.949$, $X_2 = 0.345$, $X_3 = 0.049$. Расчетные данные представлены в листинге приложения б

13. Проверка решений линейных балансовых уравнений показала, что при заданном значении энергоемкости процесса измельчения значения искомых величин составили: $M = 1,2$ мм, $v = 26,83$ %, $\text{Ц} = 0,654$ %, $a_B = 15,441$ м/с², $L_A = 83,976$ дБА. Натуральные значения переменных составляют $q_1 = 0,078 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $q_2 = 0,054 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $\omega = 457,2$ рад/с.

При подаче исходного материала только в одну из загрузочных горловин (например, в левую $X_1 = -1$) энергоемкость измельчения пшеницы при прочих равных условиях составляет около $5,26 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \lambda}$.

Снижение энергоемкости при оппозитной загрузке составляет, таким образом, величину $\frac{5,263-4,864}{4,864} = 0,082$ (8,2%).

При оптимизации процесса измельчения ячменя в среде Mathcad расчеты представленные в Приложении Б14, показали, что при заданных ограничениях минимальное значение энергоемкости – $\Theta = 7.536 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \lambda}$, при которых кодированные значения факторов составили $X_1 = 0.865$, $X_2 = 0.267$, $X_3 = 0.749$. В результате чего получены значения искомых величин при заданном значении энергоемкости процесса измельчения: $M = 1.2$ мм, $v = 17.465$ %, $\text{Ц} = 0.284$ %, $a_B = 16.6$ м/с², $L_A = 85.0$ дБА. Натуральные значения аргументов имеют следующие значения: $q_1 = 0,075 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $q_2 = 0,051 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $\omega = 527,57$ рад/с.

Аналогичные, как по пшенице, расчеты показывают снижение энергоемкости при измельчении ячменя за счет использования оппозитной загрузки на 19,9 %.

Процесс оптимизации в среде MathCAD позволил доказать, что показатели энергоемкости процесса измельчения и иные искомые величины снижаются до нижних границ и имеют минимальное значение при парной подаче материала в равном соотношении в зеркально расположенные загрузочные горловины при соблюдении условий $X_1 = X_2$.

Сделанный анализ указывает на подтверждение теоретических исследований о том, что достижение минимальных значений уровня

виброактивности возможно за счет соосной загрузки сопряженных молотков измельчаемым материалом, которое в целом приводит к снижению энергоемкости процесса измельчения.

4.8. Выводы по 4 главе

1. Проведенными экспериментальными исследованиями подтверждены ранее полученные теоретические выводы, что виброактивность молотковых дробилок для фуражного зерна может быть снижена при оппозитной загрузке измельчаемого материала через две зеркально расположенные загрузочные горловины. Было установлено, что парное взаимодействие указанных факторов значительно снижает виброактивность.

2. В процессе измельчения ячменя и пшеницы минимальное значение величины энергоемкости процесса измельчения достигается при увеличении подачи измельчаемого материала в левое и правое отверстие, при условии парной подачи материала. Для дробилки горизонтального типа наиболее оптимальны условия двусторонней загрузки материала в камеру измельчения, при равном соотношении подачи материала, которое приводит к снижению значения энергоемкости процесса измельчения.

3. Анализ показывает, что с увеличением в отдельности величины фактора X_1 или X_2 показатели энергоемкости процесса измельчения, уровня виброактивности и звука равномерно возрастают. Поверхности отклика показывают увеличение значений величин при односторонней подаче материала, отдельно в загрузочную горловину X_1 или X_2 , при значении второго из представленных факторов на нижнем уровне, то есть при полностью закрытой шиберной заслонке. Дальнейшее увеличение фактора X_1 или X_2 приводит к увеличению значений изучаемых показателей.

Верхняя граница величин энергоёмкости процесса измельчения уровня виброактивности, а также уровня шума постепенно снижается, смещаясь от периферии к центру при $X_1 \geq 0$ и $X_2 \geq 0$. Величины показателей снижаются до нижних границ и имеют минимальное значение при парной подаче материала в равном соотношении в зеркально расположенные загрузочные горловины, то есть при условии $X_1 = X_2$.

4. Результаты проведенного дисперсионного анализа позволяют заключить, что угловая скорость существенно влияет на значения энергоёмкости процесса измельчения, оптимальным значением для измельчителей с оппозитной загрузкой будет величина линейной скорости, равная 45 м/с.

5. В результате поиска экстремумов значений факторов, при которых функция цели процесса измельчения пшеницы достигает локального минимума, значение энергоёмкости $\Theta = 4.87 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \lambda}$, при которых значения факторов в натуральных выражениях переменных составляют $q_1 = 0,078 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $q_2 = 0,054 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $\omega = 457,2$ рад/с, значения искомых величин переведенных в ограничения: $M = 1.2$ мм, $\nu = 26.8$ %, $\text{Ц} = 0.65$ %, $a_B = 15.4$ м/с², $L_A = 83.9$ дБА.

При оптимизации процесса измельчения ячменя, при заданных ограничениях оптимальное значение энергоёмкости составило $\Theta = 7.54 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \lambda}$, при которых факторы в натуральных значениях аргументов имеют следующие значения: $q_1 = 0,075 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $q_2 = 0,050 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $\omega = 527,6$ рад/с, значения величин переведенных в ограничения составили следующие показатели: $M = 1.2$ мм, $\nu = 17.5$ %, $\text{Ц} = 0.28$ %, $a_B = 16.6$ м/с², $L_A = 85.0$ дБА.

Снижение энергоёмкости процесса измельчения составляет от 8,2 % (пшеница) до 19,9 % (ячмень).

5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И СОСТОЯНИЕ ВНЕДРЕНИЯ

5.1. Определение базовой стоимости дробилки

Для определения величины капитальных вложений K_B на изготовление молотковой дробилки с оппозитной загрузкой измельчаемого материала необходимо рассчитать величину затрат на сырье, потребное для производства деталей $Z_{\text{мат}}$ для технического переоснащения имеющихся конструкций или на процесс разработки новой конструкции, а также величину фактических затрат на различные операции по механической обработке материала с помощью механических инструментов, с учетом монтажных работ $Z_{\text{обр}}$.

В целях определения бюджета проекта, по созданию новой конструкции молотковой дробилки с оппозитной загрузкой исходного материала, в таблице 5.1 представлены (в ценах 2023 года) перечень и стоимость сырьевых ресурсов и комплектующего оборудования и элементов, необходимых для изготовления предлагаемого измельчителя молоткового типа.

Таблице 5.1 – Перечень и стоимость материальных ресурсов и технических комплектующих элементов, необходимых для изготовления молотковой дробилки с оппозитной загрузкой измельчаемого материала (в ценах 2023 года)

Наименование изделия	Наименование применяемого материала	Количество	Цена за ед. руб.	Всего, руб.
Молотки 132 шт	Полоса г/к ст.3 4x20	7,92 м	68	538,56
	Круг отрезной	1,98	35	69,3
Ротор	Круг металлический г/к	0,6 м	528	316,8

	диаметр 25			
	Лист г/к ст.3	0,667 м ²	1385,6	924,195 2
	Сварочная проволока	0,3	790	237
	Круг отрезной	2	35	70
Измельчительная камера	Лист г/к ст.3	0,330 м ²	1385,6	457,248
	Полоса г/к ст.3 4x30	2,1 м	98	205,8
	Круг отрезной	1	35	35
	Сварочная проволока	0,3	790	237
	USF 206 подшипник	2	460	920
Отбойная дека	Труба профильная 10x10	5,5 м	40	220
	Круг отрезной	2	35	70
	Сварочная проволока	0,3	790	237
Бункер	Лист г/к ст.3	0,302 м ²	1385,6	418,451 2
	Круг отрезной	1	35	35
	Сварочная проволока	0,2	790	158
Рама для крепления измельчительной камеры	Труба профильная 25x25	4,28	130	556,4
	Полоса г/к ст.3 4x25	1 м	98	98
	Круг отрезной	1,5	35	52,5
	Сварочная проволока	0,4	790	316
Рама для разгрузочного короба	Труба профильная 25x25	6,35	130	825,5
	Круг отрезной	1,5	35	52,5
	Сварочная проволока	0,4	790	316
Рама основания для крепления	Лист г/к ст.3	0,140 м ²	1385,6	193,984

электродвигателя	Труба профильная 25x25	1,220	130	158,6
	Труба профильная 30x30	0,680	135	91,8
	Круг отрезной	0,5	35	17,5
	Сварочная проволока	0,2	790	158
Шкив для электродвигателя четырех-ручейковый		1	1150	1150
Шкив ротора		1	700	700
Электродвигатель		1	8500	8500
Ремень электропривода		1	200	200
Кабель электропроводки		3 м	720	720
Автоматический выключатель		1	550	550
Крепежные изделия для соединения частей конструкции		50	280	280
Итого, руб.				20 086,14

Таким образом, стоимость расходов на материальные ресурсы и технически комплектующих элементов, затраченных для производства одной единицы продукции измельчителя $Z_{\text{мат}}$, в денежном выражении составили 20 тыс. руб.

В соответствии с методиками, изложенными в работах [18, 33, 55, 80, 81, 88, 90, 92, 94, 150, 151], затраты на процесс транспортировки сырья и компоненты, различные операции по механической обработке материальных ресурсов, прочие затраты прямо или косвенно относятся к изготовлению технически сложной продукции, а также с учетом работ по изготовлению, представляющих как

расходы затраченного периода времени работника на изготовление единицы продукции, составляют 50 % от расходов на материальные ресурсы и технические устройства затраченных на выпуск единицы продукции, руб.:

$$Z_{\text{обр}} = 0,5 \times Z_{\text{мат}} = 0,5 \times 20\,086,14 = 10\,043,07 \text{ руб.}$$

Таким образом, сумма капитальных вложений K_B в результате финансирования проекта для производства одной единицы продукции измельчителя в денежном выражении составит:

$$K_B = Z_{\text{мат}} + Z_{\text{обр}} = 20\,086,14 + 10\,043,07 = 30\,129,21 \text{ руб.}$$

В итоге сумму всех затрат, связанных с производством дробилки, представляющая собой расчётно-балансовую стоимость единицы продукции, возможно определить по формуле

$$C_{\text{Трас}} = C_{\text{опт}} \times k_6, \quad (5.1)$$

где $C_{\text{опт}}$ – оптовая цена зернодробилки;

k_6 – коэффициент перехода от оптовой цены к средне-балансовой стоимости, $k_6 = 1,2$.

Расчетное значение сумма всех затрат составляет:

$$C_{\text{Трас}} = 30\,129,21 \times 1,2 = 36\,155,052 \text{ руб.}$$

Сумма мала поскольку производительность измельчителя составляет всего 0,2 т/час, что, однако достаточно для подсобных и некоторых фермерских хозяйств.

5.2. Оценка экономической эффективности предлагаемого измельчителя

Для анализа экономической эффективности применения предлагаемого измельчителя для отрасли животноводства проведем расчёт показателей, которые

используются для оценки эффективности и результативности внедрения механизированного средства, представляющих собой технико-экономические показатели.

Анализ годовой экономической эффективности процесса производства от процесса использования нового механизированного средства кормопроизводства по прямому назначению, возможно рассчитать по формуле:

$$\mathcal{E}_r = B_3 \times (CЗ_B - CЗ_H + \mathcal{E}),$$

где $CЗ_B$ и $CЗ_H$ – сумма совокупных расходов, затраченных для выполнения механизированным средством определенного количества работы для переработки сырья за определенный период времени в процессе эксплуатации (наработка) по базовому и создаваемому измельчителю, руб/ед. наработки;

\mathcal{E} – экономический эффект от экономии затрат за счет сокращения численности работников, занятых в производстве, достигнутых улучшений условий труда рабочего персонала и изменения количества рабочих часов, в результате изменения прироста объема производства, количественных и качественных характеристик перерабатываемого сырья от внедрения новой машины, на количество измельченного материала за один час работы (определяющая в соответствии с нормативно-технической документацией), руб/(т/ч);

B_3 – количество времени, в течение которого новая машина будет эксплуатироваться в данной природно-климатической зоне в течение одного года, (т/ч)/год.

Оценку экономической эффективности создаваемого измельчителя за период времени, в течение которого может использоваться без существенного снижения своей производительности или качества, определим по выражению:

$$\mathcal{E}_{с.с.} = \frac{\mathcal{E}_r}{a_H + E}, \quad (5.2)$$

где a_H – коэффициент, определяющий размер отчислений в течение срока службы создаваемого измельчителя по мере его физического износа на ее

амортизацию;

E – нормативный показатель, используемый для оценки экономической эффективности долгосрочных вложений средств в реализацию данного проекта с целью получения прибыли, $E = 0,12$ [112].

Лимитная (максимальная) цена, которая может быть установлена на создаваемый измелечитель без риска убытков:

$$Ц_{л} = Ц_{в.п.} \times \sigma, \quad (5.3)$$

где $Ц_{в.п.}$ – максимальная стоимость, установленная изготовителем на создаваемый измелечитель, руб.;

σ – коэффициент, гарантирующий соответствие требованиям создаваемого измелечителя экономической эффектности и потребностям потребителей в результате использования в процессе производства, $\sigma = 0,80$ [33].

Максимальная стоимость, установленная изготовителем на создаваемый измелечитель, рассчитывается по выражению:

$$Ц_{в.п.} = \left(\frac{\Delta_{г}}{a_{н=E}} + B_{н} \right) \times \frac{1}{\delta}, \quad (5.4)$$

где δ – коэффициент, используемый для определения балансовой стоимости в результате перевода оптовой цены, определяется как отношение балансовой цены к оптовой цене, $\delta = 1,2$;

$B_{н}$ – стоимость измелечителя, которая включает в себя все затраты на ее производство, доставку, установку и настройку, а также налоги и другие расходы, связанные с ее приобретением, определяемая как балансовая цена, руб.

Годовое значение эффективности использования создаваемого измелечителя в производстве, позволившее произвести снижение затрат труда (экономия труда) в материальном производстве в результате эксплуатации новой машины:

$$З_{г} = (З_{т.б.} - З_{т.н.}) \times В_{з}, \quad (5.5)$$

где $З_{т.б.}$, $З_{т.н.}$ – количество затраченного рабочего времени, для производства единицы продукции за единицу времени в результате переработки сырья по

базовому и создаваемому измельчителю, чел.ч/(т/ч).

Для расчета технико-экономических показателей и сравнения изготовленного лабораторного образца с имеющимися измельчителями примем универсальную дробилку молотковую ДМ-200 Артикул: IDP0019518, производства ООО "ДиПиПром", производительностью 0,2 т/ч [62].

Энергоемкость для предлагаемого образца примем, согласно полученным данным по результатам эксперимента, при условии парной подачи материала в зеркально расположенные загрузочные горловины, равной $5,1 \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$.

Для сравниваемого образца

$$q_{\text{Э}} = \frac{N_{\text{дв}}}{W_{\text{Э}}}, \quad (5.6)$$

где $N_{\text{дв}}$ – мощность приводного электродвигателя при полной загрузке;

$W_{\text{Э}}$ – производительность измельчителя.

Количественные и качественные характеристики, описывающие совокупность технико-экономических показателей эффективности производственных процессов по базовому и создаваемому измельчителю приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Исходные сведения о технико-экономических показателях характеризующих эффективность производственных процессов, в результате применения базового и создаваемого измельчителя (в ценах 2023 г.)

Показатель	Обозначение	Базовый вариант (ДМ-200)	Лабораторный образец
Рыночная (балансовая) стоимость, руб.	Б	110 247	36 155,05
Величина массы измельчителя, кг	G_m	45	35

Энергопотребление измельчителя при производстве ед. продукции, кВт-ч/т	q	7,5	5,1
Производительность измельчителя, т/ч	$W_{\text{Э}}$	0,2	0,2
Установленная мощность, кВт	P	1,5	1,5
Годовая фактическая загрузка техники, ч.	$T_{\text{ч}}$	1976	1976
Норма отчислений на амортизацию, %	a	16,7	16,7
Норматив затрат на капитальный ремонт, %	$r_{\text{К}}$	0	0
Норматив затрат на ремонт и техническое обслуживание, %	r_{T}	13,0	13,0
Количество обслуживающего персонала, чел.	L	1	1
Часовая ставка обслуживающего персонала, руб/ч.	τ_j	127,84	127,84

Для измерения изменений в затратах на производство и эксплуатацию при применении нового измельчителя в сравнении с базовым используем показатель степени динамики затрат, которую определим по выражению:

$$C = \frac{z'_{\text{Г.Б.}} - z'_{\text{Г.Н.}}}{z'_{\text{Г.Б.}}} \times 100\% , \quad (5.7)$$

где $z'_{\text{Г.Б.}}$, $z'_{\text{Г.Н.}}$ – затраты в годовом исчислении (затраты труда рабочего времени, прямые расходы, связанные с эксплуатацией объекта, затраты на создание измельчителя, совокупные затраты), соответственно, по базовому и создаваемому измельчителю, рассчитанные на производство продукции за период одного года, чел.-ч, руб.

Сумму совокупных затрат на выполнение работ по переработке сырья за

определенный промежуток времени для производства единицы продукции по базовому и создаваемому измельчителю (единица наработки) рассчитаем по выражению:

$$СЗ = И + К \cdot Е, \quad (5.8)$$

где И – сумма всех прямых эксплуатационных расходов, связанных с количеством произведенной продукции за единицу времени, руб/(т/ч);

К – долгосрочные вложения средств в реализацию данного проекта с целью получения прибыли на единицу переработанного материала за единицу времени, руб/ (т/ч);

Е – нормативный показатель, используемый для оценки экономической эффективности долгосрочных вложений средств в реализацию данного проекта, определяющий минимальную норму прибыли; для сельского хозяйства не ниже 0,12 [112].

Прямые эксплуатационные расходы в год на содержание измельчителя молоткового типа:

$$И = З + Г + Р + А + Ф, \quad (5.9)$$

где З – расходы на выплату заработной платы сотрудникам, обслуживающим измельчитель, руб/ (т/ч);

Г – расходы на электрическую энергию, потребляемую измельчителем из расчета мощности, руб/ (т/ч);

Р – расходы на проведение работ по поддержанию работоспособности и исправности измельчителя (техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонт), руб/ (т/ч);

А – сумма отчислений в течение срока службы создаваемого измельчителя по мере его физического износа на ее амортизацию, руб/ (т/ч);

Ф – прочие прямые расходы на приобретение материалов, не относящихся к основным и вспомогательным, руб/ (т/ч), отсутствуют.

Расходы на выплату заработной платы и социальные взносы сотрудникам, обслуживающим измельчитель:

$$z = \frac{1}{w_{\text{см}}} \times \sum_i l_j \times \tau_j \times K_{\text{д}}, \quad (5.10)$$

где $w_{\text{см}}$ – количество перерабатываемого материала измельчителем за период 1 ч сменного времени, $w_{\text{см}} = 0,2$ т/ч;

τ_j – размер оплаты труда обслуживающего персонала за один час работы $\tau_j = 127,84$ руб/ч.

$K_{\text{д}}$ – коэффициент доплат, учитывающий все виды выплат обслуживающего персонала, такие как оплата за продукцию, премиальные, надбавки за стаж работы и квалификацию, отпускные и начисления по соцстрахованию,

$$K_{\text{д}} = 1,2 [107];$$

l_j – количество j -го сотрудника, обслуживающих измельчитель, $l_j = 1,0$ чел.

$$z_{\text{н}} = \frac{1}{0,2} \times 1,0 \times 127,84 \times 1,2 = 7,67 \text{ руб./т.}$$

Расходы на электрическую энергию, затрачиваемую измельчителем, определяются по формуле:

$$\Gamma = q \times \text{Ц}, \quad (5.11)$$

где q – объем электроэнергии, потребляемой измельчителем на единицу продукции, $q = 5,1$ кВт·ч/т;

Ц – рыночная стоимость 1 кВт·ч электрической энергии в регионе, $\text{Ц} = 5,10$ руб/кВт·ч.

$$\Gamma_{\text{н}} = 5,10 \times 5,1 = 26,01 \text{ руб./т.}$$

Финансирование расходов на проведение ремонтных работ и технического обслуживания P , рассчитываемых на основе нормативов отчислений от суммы всех затрат, связанных с производством дробилки, представляющие собой балансовую стоимость измельчителя, рассчитывали по выражению:

$$P = \frac{B \times (r_{\text{T}} + r_{\text{K}})}{w_{\text{ЭК}} \times T_{\text{ч}}}, \quad (5.12)$$

где B – балансовая стоимость измельчителя, $B = 36\,155$ руб. – дробилки зерна;

$w_{\text{ЭК}}$ – количество перерабатываемого материала измельчителем за 1 час

эксплуатации, $w_{\text{эк}} = 0,2$ т/ч;

r_T – коэффициент для расчета размера отчислений на проведение ремонтных работ и техническое обслуживание измельчителя, $r_T = 0,13$ [81];

r_K – коэффициент отчислений, направляемый на проведение комплекса ремонтных работ по восстановлению работоспособности измельчителя, при ухудшении его эксплуатационных характеристик, $r_K = 0$ [81];

$T_{\text{ч}}$ – объем перерабатываемого зерна в год измельчителем, при котором обеспечивается максимальная эффективность его использования, $T_{\text{ч}} = 1976$ ч.

$$P = \frac{36155 \times (0,13 + 0)}{0,2 \times 1976} = 11,89.$$

Размер отчислений в течение срока службы создаваемого измельчителя по мере физического износа на его амортизацию A определяется выражением:

$$A = \frac{B \times a}{w_{\text{эк}} \times T_{\text{ч}}}, \quad (5.13)$$

где a – норматив определяющий размер отчислений в течение срока службы создаваемого измельчителя по мере его физического износа на ее амортизацию, $a = 0,167$ [111].

$$A_{\text{н}} = \frac{36\,155 \times 0,167}{0,2 \times 1976} = 15,28 \text{ руб/т.}$$

Подставляем полученные значения в выражение (5.9):

$$I_{\text{н}} = 764,04 + 26,01 + 11,89 + 15,28 = 820,22 \text{ руб/т.}$$

Долгосрочные вложения средств в реализацию проекта по созданию измельчителя с целью получения прибыли на количество переработанного материала за единицу времени:

$$K = \frac{B}{w_{\text{э}} \times T_{\text{ч}}} \quad (5.14)$$

$$K_{\text{н}} = \frac{36\,155,05}{0,2 \times 1976} = 91,49 \text{ руб/т.}$$

Количество затраченного рабочего времени (трудовых усилий) на производство единицы продукции в результате переработки сырья рассчитаем по выражению:

$$Z_T = \frac{L}{W_3} \quad (5.15)$$

$$Z_{TH} = \frac{1,0}{0,2} = 5 \text{ чел. ч/т.}$$

Объем продукции, который может произвести создаваемый измельчитель в течение года при условии правильной эксплуатации машины в зоне ее применения:

$$V_3 = W_3 \times T_3 \quad (5.16)$$

$$V_{3.H} = 0,2 \times 1976 = 395,2 \text{ т/год,}$$

$$C_{3.H} = 820,22 + 91,49 \times 0,12 = 831,20 \text{ руб/т,}$$

$$K_{H.год} = K_H \times V_{3.H} = 91,49 \times 395,2 = 36\,156,85 \text{ руб/год.}$$

В целях сравнения технико-экономических характеристик эффективности производственных процессов создаваемого измельчителя проведем расчет совокупных расходов на производство единицы измельченной продукции для базовой модели ДМ-200, используя приведенные в тексте формулы (5.5–5.16).

$$z_B = \frac{1}{0,2} \times 1,0 \times 127,84 \times 1,2 = 767,04 \text{ руб/т.}$$

$$\Gamma_B = 5,1 \times 7,5 = 36,21 \text{ руб/т.}$$

$$P_B = \frac{110\,247 \times (0,13 - 0)}{0,2 \times 1\,976} = 36,27 \text{ руб/т.}$$

$$A_B = \frac{110\,247 \times 0,167}{0,2 \times 1976} = 46,59 \text{ руб/т.}$$

$$И_{\text{Б}} = 767,04 + 36,21 + 36,27 + 46,59 = 886,11 \text{ руб/т.}$$

$$K_{\text{Б}} = \frac{110\,247}{0,2 \times 1\,976} = 278,97 \text{ руб/т.}$$

$$З_{\text{ТБ}} = \frac{1,0}{0,2} = 5 \text{ чел. ч/т.}$$

$$V_{\text{ЗБ}} = 0,2 \times 1\,976 = 395,2 \text{ т/год}$$

$$СЗ_{\text{Б}} = 886,11 + 278,97 \times 0,12 = 919,59 \text{ руб/т.}$$

$$K_{\text{Б.ГОД}} = K_{\text{Б}} \times V_{\text{З.Б.}} = 278,97 \times 395,2 = 110\,248,94 \text{ руб/год}$$

$$C = \frac{5 - 5}{5} \times 100 \% = 0$$

$$\mathcal{E} = (5 - 5) \times 127,84 = 0$$

$$\mathcal{E}_{\Gamma} = 395,2 \times (919,59 - 831,20 + 0) = 34\,931,73 \text{ руб/год}$$

$$\mathcal{E}_{\text{С.С.}} = \frac{34\,931,73}{0,167+0,12} = 121\,713,35 \text{ руб.}$$

$$\mathcal{C}_{\text{В.П}} = \left(\frac{34\,931,73}{0,167+0,12} + 36\,155,05 \right) \times \frac{1}{1,2} = 131\,557,00 \text{ руб.}$$

$$\mathcal{C}_{\text{Л}} = 131\,557,00 \times 0,8 = 105\,245,6 \text{ руб.}$$

Совокупные результаты полученных значений проведенных расчетов сведены в таблицу 5.3, в которой приведены технико-экономические параметры базового и создаваемого измельчителя.

Таблица 5.3 – Расчетные значения технико-экономических показателей базового и создаваемого измельчителя

Показатель	Единица измерения	Базовый	Новый
Производительность дробилки	т/ч.	0,2	0,2
Прямые эксплуатационные затраты	руб/т	886,11	820,22
В т.ч. заработная плата	руб/т	767,04	767,04
затраты на электроэнергию	руб/т	36,21	26,01
затраты на текущий ремонт	руб/т	36,27	11,89
отчисления на амортизацию	руб/т	46,59	15,28
Удельные капиталовложения	руб/т	278,97	91,49
Совокупные затраты	руб/т	919,59	830,20
Годовой экономический эффект	руб.	-	34 931,73
Срок окупаемости	лет	-	1,08

В результате проведенных расчетов были получены значения технико-экономических параметров, показывающих эффективность применения предлагаемой дробилки с оппозитной загрузкой в линии производства комбикормов по сравнению с дробилкой ДМ-200 может принести годовой экономический эффект около 35 000 рублей. Срок окупаемости представленного измельчителя составляет 1,08 года.

5.3. Состояние внедрение предлагаемого измельчителя

После проведения экспериментальных исследований между ФГБОУ ВО «Алтайский ГАУ» и ООО «АгроТехНовации» заключен лицензионный договор № 107 о предоставлении права использования изобретения по патенту РФ № 2746586 «Молотковая дробилка» с оппозитной загрузкой зерна.

ООО «АгроТехНовации» были разработаны технические условия ТУ 28.30.83—001—95965384—2023 «Дробилка молотковая с оппозитной загрузкой для измельчения зерна «ДМОЗИЗ», и были изготовлены образцы моделей

ДМОЗИЗ-200 и подготовлено обоснование безопасности «ОБ 28.30.83 —001—95965384—2023 дробилка молотковая с оппозитной загрузкой для измельчения зерна «ДМОЗИЗ [122].

Модель ДМОЗИЗ-200 прошла испытания в аккредитованной испытательной лаборатории «Гранум» (Аттестат РОСС RU.31578.04ОЛН0.ИЛ31). ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 001/В-17/08/23 от 17.08.2023 г. (Приложение Г 1), на основании которого ООО «АгроТехНовации» выдан сертификат соответствия РОСС RU.НЕ06.Н11153 № 0033218 сроком действия до 16.08.2028 г. (Приложение Е).

Второй образец изготовленной модели ДМОЗИЗ-200У прошел испытания в аккредитованной испытательной лаборатории «Оникс» ООО «Открытый Сертификат» (Свидетельство (Аттестат аккредитации) № ОНПС RU.04ОПС0.ИЛ02 от 03.06.2019, выдан СДС «ОНПС» (зарегистрирована в едином реестре СДС за № РОСС RU.32069.04ОПС0 от 29.03.2019 года). Созданная конструкция показала положительные результаты, что охарактеризовано протоколом контрольных испытаний № 91470.210823 от 21.08.2023 года (Приложение Г 2), на основании которых зарегистрирована декларация ЕАЭС N RU Д-RU.РА06.В.68685/23 (Приложение Д), сроком действия по 20.08.2028, что подтверждает соответствие созданной конструкции дробилки молотковой с оппозитной загрузкой регламентам Евразийского экономического союза.

Таким образом, дробилка молотковая с оппозитной загрузкой показала положительные качественные характеристики как самого измельчаемого оборудования, так и в процессе измельчения сельскохозяйственной продукции в аккредитованных лабораториях, что способствовало внедрению оборудования в отрасли сельского хозяйства посредством коммерциализации проекта для мелкосерийного производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Дробильные машины молоткового типа с горизонтальным барабаном излучают шум и порождают вибрацию, в особенности в момент совершения технологических операций, т.е. при разрушении материала в рабочей камере. Это обусловлено неуравновешенностью ударных реакций на рабочих органах и отклонением на различные углы (от радиального направления) противоположных молотков. По данным литературных источников, уровень виброактивности подшипниковых узлов дробилок достигает 0,014-0,020 м/с, уровень шума – 103 дБА.

2. Установлено, что одним из источников повышенной виброактивности дробилок с горизонтальным расположением барабана являются ударные импульсы, возникающие при взаимодействии молотков с исходным материалом во время прохождения их около загрузочной горловины. В связи с этим введено новое научное понятие «технологическая виброактивность дробилки». Теоретически показано, что предложенная нами оппозитная загрузка дробилки приводит к тому, что радиально расположенные молотки отклоняются на одинаковый угол от своего радиального направления, тем самым автоматически уравновешивая барабан и снижая виброактивность дробилки в целом.

3. Впервые поставлены и получили теоретическое разрешение научные задачи, касающиеся роли технологической виброактивности в непроизводительных затратах энергии в шарнирах молотков, воздушно-продуктовом слое и грунте, прилегающем к фундаменту дробилки. Анализ полученных математических моделей показывает, что эти затраты могут отбирать до 14-20% мощности приводного электродвигателя в дробилках с традиционной загрузкой исходного зерна. В дробилках с оппозитной загрузкой непроизводительные затраты энергии на вибрирование воздушно-продуктового слоя и грунта, прилегающего к фундаменту дробилки, теоретически могут быть сведены к нулю. Непроизводительные потери энергии в шарнирах молотков могут быть уменьшены наполовину.

4. В результате экспериментов на дробилке с оппозитной загрузкой и оптимизации процесса измельчения пшеницы выявлены рациональные значения конструктивно-режимных параметров: подача исходного материала в левое отверстие (q_1) = $0,078 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, подача исходного материала в правое отверстие (q_2) = $0,054 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, угловая скорость вращения ротора (ω) = $457,3 \text{ рад/с}$, при которых значение энергоёмкости позволяет достичь минимума $\mathcal{E} = 4.86 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \lambda}$. Значения критериев подобия для процесса измельчения пшеницы составили следующие величины: $\pi_1 = 2,366$; $\pi_3 = 1,449$; $\pi_4 = 1,282 \times 10^{-4}$.

Процесс оптимизации измельчения ячменя позволил выявить натуральные значения варьируемых величин базовых конструктивно-режимных параметров: подача исходного материала в левое отверстие (q_1) = $0,075 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, подача исходного материала в правое отверстие (q_2) = $0,051 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, угловая скорость вращения ротора (ω) = $527,6 \text{ рад/с}$, при которых оптимальное значение энергоёмкости с учетом заданных ограничений составило $\mathcal{E} = 7.54 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \lambda}$.

Значения критериев подобия для процесса измельчения ячменя, с учетом найденных оптимальных параметров, составили следующие величины: $\pi_1 = 2,726$; $\pi_3 = 1,472$; $\pi_4 = 1,104 \times 10^{-4}$.

Вышеуказанные критериальные соотношения конструктивно-режимных параметров позволяют проектировать типоразмерный ряд молотковых дробилок с оппозитной загрузкой.

Экспериментальная проверка характеристик энергоёмкости, шума и показателей виброускорения показала улучшение этих характеристик при оппозитной загрузке зерна в сравнении с традиционной загрузкой. Так, при измельчении пшеницы снижение энергоёмкости процесса достигает $8,2 \%$, шума – $2,5\%$, виброускорения – $11,5\%$. Для ячменя соответствующие показатели снижения составляют: энергоёмкости – $19,9 \%$, шума – $4,7 \%$, виброускорения – $14,9 \%$.

5. Экономическая оценка результатов исследования показывает, что, за счет снижения энергоемкости процесса измельчения при оппозитной загрузке зерна в дробилку, удельные совокупные затраты (руб/т) уменьшаются примерно на 9,7%.

Рекомендации производству

Результаты выполненных исследований рекомендуется использовать проектными организациями, разрабатывающими кормоприготовительную технику, для модернизации молотковых зернодробилок.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Перспективным направлением дальнейших научных исследований является изучение процессов, протекающих в местах контакта молотков с восходящим и нисходящим потоками исходного зерна, а также способа принудительной подачи зерна в обе горловины.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева, Л. Б. Причины возникновения и методы уменьшения вибраций роторных машин / Л. Б. Алексеева, В. П. Уваров. – Текст: непосредственный // Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – Санкт-Петербург, – 2012. – С. 172-176.

2. Анисимов, П. Н. Об использовании методики планирования эксперимента в соответствие с трехуровневыми планами Бокса-Бенкена / П. Н. Анисимов – Текст: непосредственный // Вестник магистратуры. – 2017. – № 2-2(65). – С. 29-31

3. Анализ вредных факторов при работе с молотковой дробилкой / А. А. Жумагалиев, К. В. Голиков, Д. Б. Болотов [и др.]. – Текст: непосредственный // Инновационные технологии и технические средства для АПК. Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – Воронеж: Воронежский ГАУ им. Императора Петра I, 2020. – С. 142-146.

4. Афанасьев, В. А. Руководство по технологии комбикормовой продукции с основами кормления животных / В. А. Афанасьев. – Воронеж: ВНИИКП, 2007. – 389 с. – Текст: непосредственный.

5. Барабашкин, В. П. Молотковые и роторные дробилки / В. П. Барабашкин. – 2-е изд. – Москва: Недра, 1973. – 144 с. – Текст: непосредственный.

6. Баранов, Н. Ф. Оценка энергозатрат на трение и вентиляцию молотковой дробилки с кольцевыми деками / Н. Ф. Баранов, В. Н. Шулятьев, Л. А. Лопатин. – Текст: непосредственный // Современное состояние, проблемы и перспективы развития механизации и технического сервиса агропромышленного комплекса: материалы Международной научно-практической конференции Института механизации и технического сервиса. – Казань: Казанский ГАУ, 2018. – С. 41-50.

7. Баркова, Н. А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования: учебное пособие / Н. А. Баркова – Санкт-Петербург: Северо-Западный учебный центр, 2016. – 158 с. – Текст: непосредственный.

8. Беляев, А. К. Принцип локальности вибрации сложных механических систем. Динамика и вибродиагностика механических систем / А. К. Беляев, В. А. Пальмов. – Текст: непосредственный // Межвузовский сборник. – Иваново: Ивановский государственный университет, 1985. – С. 14-28.

9. Бесполденов, Р. Усовершенствование конструкции молотковой дробилки с вертикальным валом ротора / Р. Бесполденов, И. Федоренко – Текст: непосредственный // Комбикорма. – 2022. – № 1. – С. 39-40. – DOI 10.25741/2413-287X-2022-01-2-159. – EDN IMYXDN.

10. Богданов, А. А. Анализ конструкций молотковых дробилок для зерна / А. А. Богданов, А. Н. Глобин. – Текст: непосредственный // Активная честолюбивая интеллектуальная молодёжь сельскому хозяйству. – 2022. – № 2(13). – С. 55-66. – EDN JSGCQW.

11. Борщев, В. Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы: учебное пособие / В. Я. Борщев. – Тамбов: Изд-во Тамбовского гос. техн. ун-та, 2004. – 75 с. – Текст: непосредственный.

12. Борьба с производственным шумом и вибрацией: сборник докл. науч.-практ. конф. (14-16 дек. 1970 г.) / М-во судостроит. пром-сти СССР, ЦК Профсоюза рабочих судостроит. пром-сти, М-во здравоохранения СССР. – [Б. м.]: Судостроение, 1972. – 70 с.; 21 см. – Текст: непосредственный.

13. Брюховецкий, А. Н. Факторы, влияющие на энергоёмкость процесса измельчения кормов в измельчителе роторного типа ИРТ-Ф-25/40 «Фермер» с применением универсального рабочего органа / А. Н. Брюховецкий, В. Ю. Чурсин. – Текст: непосредственный // Современные научно-практические решения XXI века: материалы Международной научно-практической конференции. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2016. – С. 246-251.

14. Быховский, И. И. Основы теории вибрационной техники / И. И. Быховский. – Москва: Машиностроение, 1969. – 363 с. – Текст: непосредственный.

15. Вибрации в технике: справочник: в 6 томах / редакционный совет: В. Н. Челомей (пред.) [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1981. – Т. 6: Защита от

вибрации и ударов / под редакцией К. В. Фролова. – 1981. – 456 с. – Текст: непосредственный.

16. Волошин, Е. В. Анализ конструктивных особенностей измельчающих машин / Е. В. Волошин. – Текст: непосредственный // Научный альманах. – 2015. – № 11-3 (13). – С. 69-71.

17. Волошин, Е. В. Совершенствование процесса измельчения зернового сырья при производстве комбикормов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.18.12 / Волошин Евгений Викторович. – Москва, 2002. – 153 с.: ил. – Текст: непосредственный.

18. Гаврилов, Т. А. Исследование процесса измельчения мягких субпродуктов и разработка конструкции измельчителя для звероводства: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.01 / Гаврилов Тиммо Александрович; [Место защиты: С.-Петербург. гос. аграр. ун-т]. – Петрозаводск, 2014. – 147 с. – Текст: непосредственный.

19. Гернет, М. М. Курс теоретической механики / М. М. Гернет. – Москва: Высшая школа, 1973. – 464 с. – Текст: непосредственный.

20. Гималтдинов, И. Х. Повышение работоспособности молотковых дробилок кормов на основе технического диагностирования подшипников ротора по параметрам вибрации: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.03 / Гималтдинов Ильдус Хафизович; [Место защиты: Башкир. гос. аграр. ун-т]. – Казань, 2018. – 142 с.

21. Горячкин, В. П. Собрание сочинений: в 3 т. / В. П. Горячкин. – 2-е изд. – Москва: Колос, 1968. – Т. 2. – 455 с. – Текст: непосредственный.

22. ГОСТ 10199-81. Комбикорма-концентраты для овец. Технические условия. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 118 с. – Текст: непосредственный.

23. ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. – Москва: Стандартинформ, 2008. – 12 с. – Текст: непосредственный.

24. ГОСТ 12.1.012-2004. Система стандартов безопасности труда. Вибрационная безопасность. Общие требования. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 16 с. – Текст: непосредственный.

25. ГОСТ 12376-71. Дробилки однороторные среднего и мелкого дробления. Технические условия, введен в действие постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 1 декабря 1971 г. № 1957. – Москва: Издательство стандартов, 1981. – 22 с. – Текст: непосредственный.

26. ГОСТ 13299-71. Комбикорма-концентраты для поросят-сосунов. Технические условия. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 118 с. – Текст: непосредственный.

27. ГОСТ 13496.8-72. Комбикорма. Методы определения крупности размола и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений. – Москва: Издательство стандартов, 2002. – 2 с. – Текст: непосредственный

28. ГОСТ 13496.0-80. Комбикорма. Комбикормовое сырье. Методы анализа. – Москва: Издательство стандартов, 2002. – 5 с. – Текст: непосредственный.

29. ГОСТ 16955-71. Комбикорм для контрольного откорма свиней. Технические условия. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 118 с. – Текст: непосредственный.

30. ГОСТ 18221-99. Комбикорма полнорационные для сельскохозяйственной птицы. Технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2006. – 7 с. – Текст: непосредственный.

31. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины. Определения. – Москва: Государственный комитет по управлению качеством продукции и стандартам, 1990. – 13 с. – Текст: непосредственный.

32. ГОСТ 21055-96. Комбикорма полнорационные для беконного откорма свиней. Общие технические условия. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 118 с. – Текст: непосредственный.

33. ГОСТ 23729-88. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки специализированных машин. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 12 с. (дата завершения срока действия: 01.09.2019). – Текст: непосредственный.

34. ГОСТ 24346-80. Вибрация. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 28 с. – Текст: непосредственный.
35. ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. – Москва: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1989. – 21 с. – Текст: непосредственный.
36. ГОСТ 28098-89. Дробилки кормов молотковые. Общие технические условия. – Москва: Издательство стандартов, 1989. – 2 с. – Текст: непосредственный.
37. ГОСТ 28672-90. Ячмень. Требования при заготовках и поставках. Межгосударственный стандарт. – Москва: Стандартинформ, 2006. – 7 с. – Текст: непосредственный.
38. ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997). Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Часть 1. Общие требования – Москва: Стандартинформ, 2008. – 28 с. – Текст: непосредственный.
39. ГОСТ 31191.1-2004. Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Часть 1. Общие требования вибрации. – Москва: Стандартинформ, 2008. – 24 с. – Текст: непосредственный.
40. ГОСТ 31319-2006. Вибрация. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Требования к проведению измерений на рабочих местах. – Москва: Стандартинформ, 2008. – 19 с. – Текст: непосредственный.
41. ГОСТ 50257-92. Комбикорма полнорационные для свиней. Технические условия. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 118 с. – Текст: непосредственный.
42. ГОСТ 7090-72. Дробилки молотковые однороторные. Технические условия: утв. и введ. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 29 марта 1972 г. N 635. – Москва: Издательство стандартов, 1981. – 14 с. – Текст: непосредственный.
43. ГОСТ 9265-72. Комбикорма-концентраты для рабочих лошадей. Технические условия. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 118 с. – Текст: непосредственный.

44. ГОСТ 9267-68. Комбикорма-концентраты для свиней. Технические условия. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 118 с. – Текст: непосредственный.

45. ГОСТ 9268-90. Комбикорма-концентраты для крупного рогатого скота. Технические условия. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 118 с. – Текст: непосредственный.

46. ГОСТ ИСО 10816-4-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на не вращающихся частях. Часть 4. Газотурбинные установки. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 8 с. – Текст: непосредственный.

47. ГОСТ ИСО 5348-2002. Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров. – Москва: Стандартинформ, 2003. – 16 с. – Текст: непосредственный.

48. ГОСТ ИСО 7919-1-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на вращающихся валах. Общие требования. – Москва: Стандартинформ, – 2003. – 16 с. – Текст: непосредственный.

49. ГОСТ ИСО 8041-2006. Вибрация. Воздействие вибрации на человека. Средства измерений. – Москва: Стандартинформ, 2008. – 81 с. – Текст: непосредственный.

50. ГОСТ Р 51166-98. Комбикорма для пушных зверей, кроликов и нутрий. Технические условия. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 118 с. – Текст: непосредственный.

51. ГОСТ Р 51419-99 (ИСО 6498-98). Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Подготовка испытуемых проб. – Москва: Издательство стандартов, 2002. – 6 с. – Текст: непосредственный.

52. ГОСТ Р 51550-2000. Комбикорма-концентраты для свиней. Общие технические условия. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 118 с. – Текст: непосредственный.

53. ГОСТ Р 51848-2001. Продукция комбикормовая. Термины и определения. – Москва: Изд-во стандартов, 2020. – 14 с. – Текст: непосредственный.

54. ГОСТ Р 52255-2004. Комбикорма для свиней. Номенклатура показателей. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 4 с. – Текст: непосредственный.

55. ГОСТ Р 53056-2008. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. – Москва: Стандартинформ, 2009. – 19 с. – Текст: непосредственный.

56. ГОСТ Р 8.714-2010. Государственная система обеспечения единства измерений. Фильтры полосовые октавные и на доли октавы. Технические требования и методы испытаний. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 26 с. – Текст: непосредственный.

57. ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния маши. Часть. 2. Обработка, анализ и представление результатов измерения вибрации. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 28 с. – Текст: непосредственный.

58. Данилин, А. С. Производство комбикормов за рубежом / А. С. Данилин. – Москва: Колос, 1968. 336 с. – Текст: непосредственный.

59. Долгополова, Н. В. Значение озимой и яровой пшеницы в производстве продуктов питания / Н. В. Долгополова. – Текст: непосредственный // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2009. – № 5. – С. 52-56.

60. Дринча, В. М. Применение молотковых мельниц в индивидуальном производстве кормов / В. М. Дринча. – Текст: непосредственный // Кормопроизводство. – 2013. – № 1. – С. 43-45.

61. Дробилка молотковая безрешетная для измельчения концентрированных кормов / Ф. Ф. Хасанова, И. Р. Нафиков, Ф. Ф. Хасанов [и др.]. – Текст: непосредственный // Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы: труды III Международной научно-практической конференции,

Казань, 22 мая 2019 г. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2019. – С. 197-201. – EDN TXUKKS.

62. Дробилка молотковая ДМ-200 (380 В) производитель ООО «ДиПиПром» Артикул: IDP0019518./ ООО «ДиПиПром» . – Текст: электронный // Общество с ограниченной ответственностью «ДиПиПром» : [сайт] – URL: <https://www.dpprom.ru/products/drobilka-molotkovaya-dm-200-380-v/> (дата обращения: 20.05.2023). – Текст: электронный.

63. Дружинин, Р. А. Совершенствование рабочего процесса ударно-центробежного измельчителя: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.01 / Дружинин Роман Александрович; [Место защиты: Воронеж. гос. аграр. ун-т им. императора Петра I]. – Воронеж, 2014. – 169 с.: ил. – Текст: непосредственный.

64. Егоров, Г. А. Технологические свойства зерна / Г. А. Егоров – Москва: Агропромиздат, 1985. – 334 с. – Текст: непосредственный.

65. Зиганшин, Б. Г. Анализ технических решений в оптимизации условий содержания молочного скота при строительстве и реконструкции животноводческих ферм / Б. Г. Зиганшин, Р. Р. Шайдуллин, А. Р. Валиев. – Текст: непосредственный // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2018. – № 2 (49). – С. 138-143.

66. Зиганшин, Б. Г. Определение рабочей площади торцевых решет дробилки зерна с увеличенной сепарирующей поверхностью / Б. Г. Зиганшин, С. Ю. Булатов, К. Е. Миронов. – Текст: непосредственный // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 15, № 2 (58). – С. 87-91.

67. Иванов, В. В. Совершенствование режимов работы дискового измельчителя фуражного зерна: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.01 / Иванов Вячеслав Владимирович; [Место защиты: Всерос. науч.-исслед. ин-т электрификации сельс. хоз-ва]. – Зерноград, 2014. – 132 с. – Текст: непосредственный.

68. Иванов, И. И. Исследование молотковой дробилки при осевой и радиальной подаче зерна / И. И. Иванов, В. А. Сухляев, А. И. Сухопаров. – Текст:

непосредственный // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 6-3 (108). – С. 114-118.

69. Исследование шума: методические указания к лабораторной работе для студентов всех специальностей / составитель Т. В. Тупицына. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского гос. ун-та, 2008. – 32 с. – Текст: непосредственный.

70. Казаров, А. Р. Влияние измельчаемого продукта на шумовибрационные характеристики дробилкой молотковой МДУ-1 / А. Р. Казаров, А. Е. Яблоков. – Текст: непосредственный // Тенденции формирования науки нового времени: сборник статей Международной научно-практической конференции. – Уфа: Омега Сайнс, 2015. – С. 27-28.

71. Китун, А. В. Определение пропускной способности горизонтально расположенного решета дробилки зернофуража / А. В. Китун. – Текст: непосредственный // Вестник Белорусского государственного аграрного технического университета. – 2015. – № 4. – С. 61-66.

72. Колосов, М. В. Лабораторные работы по информатике / М. В. Колосов. Красноярск, 2016. – 132 с. – URL: <http://energyed.ru> (дата обращения: 16.05.2023). – Текст: электронный.

73. Кононенко, С. И. Нетрадиционные зерновые компоненты в рационах свиней / С. И. Кононенко. – Текст: непосредственный // ПСЭНЖ Кубанского ГАУ. – 2012. – № 79. – С. 402-414.

74. Кормодробилки: конструкция, расчет / под редакцией Г. С. Ялпачик. – Запорожье: Коммунар, 1992. – 292 с. – Текст: непосредственный.

75. Корнев, А. С. Научные изыскания по подбору оптимальных параметров работы молотковых дробилок / А. С. Корнев, С. В. Корнев, Е. С. Корнева. – Текст: непосредственный // Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции. – 2023. – № 1 (20). – С. 44-50. – DOI 10.53914/issn2311-6870_2023_1_44. – EDN TGYPUG.

76. Кошелев, А. Н. Производство комбикормов и кормовых смесей / А. Н. Кошелев, Л. А. Глебов. – Москва: Агропромиздат, 1990. – 432 с. – Текст: непосредственный.

77. Коэффициенты регрессии многомерного полинома. – Текст: электронный // PTC Mathcad Prime. – URL: https://support.ptc.com/help/mathcad/r8.0/ru/index.html#page/PTC_Mathcad_Help/coefficients_of_multivariate_polynomial_regression.html# (дата обращения: 14.05.2023).

78. Лаврентьев, А. Ю. Научно-практическое обоснование включения в состав комбикормов для кур-несушек ферментных препаратов отечественного производства / А. Ю. Лаврентьев. – Текст: непосредственный // Агропромышленные технологии Центральной России. – 2017. – № 4 (6). – С. 46-54.

79. Локтионова, А. Г. Основные параметры, влияющие на эффективность работы молотковой дробилки / А. Г. Локтионова. – Текст: непосредственный // Наука молодых – будущее России: сборник научных статей 6-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых, Курск, 09-10 декабря 2021 г. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – Т. 5. – С. 94-97. – EDN YUAPBX.

80. Лопатин, Л. А. Повышение эффективности процесса измельчения зерна путем совершенствования рабочих органов молотковой дробилки: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.01 / Лопатин Леонид Александрович; [Место защиты: Морд. гос. ун-т им. Н.П. Огарева]. - Киров, 2018. - 185 с. : ил. – Текст: непосредственный.

81. Межгосударственный стандарт ГОСТ 34393-2018. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки (введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 декабря 2018 г. N 1081-ст). – Москва: Стандартинформ, 2018. – 12 с. – Текст: непосредственный.

82. Мельников, С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм: [Для фак. механизации сел. хоз-ва] / С. В. Мельников. – Ленинград: Колос, Ленингр. отд-ние, 1978. – 560 с. – Текст: непосредственный.

83. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Колос: Ленингр. отд-ние, 1980. – 168 с. – Текст: непосредственный.

84. Мельников, С. В. Экспериментальные основы теории процесса измельчения кормов на фермах молотковыми дробилками: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.00.00 / Мельников Сергей Всеволодович. – Ленинград, 1969. – 576 с. – Текст: непосредственный.

85. Механизация и технология производства продукции животноводства / В. Г. Коба, Н. В. Брагинец, Д. Н. Мурусидзе, В. Ф. Некрашевич. – Москва: Колос, 2000. – 528 с. – Текст: непосредственный.

86. Миронов К. Е. Оценка равномерности измельчения зерна / К. Е. Миронов. – Текст: непосредственный // Вестник НГИЭИ. – 2013. – № 2 (21). – С. 37-40.

87. Миронов, К. Е. Повышение эффективности процесса измельчения зерна с обоснованием параметров рабочих органов дробилки ударно-отражательного действия: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.01 / Миронов Константин Евгеньевич; [Место защиты: Морд. гос. ун-т им. Н. П. Огарева]. – Княгинино, 2018. – 142 с.: ил. – Текст: непосредственный.

88. Миронов, К. Е. Приготовление кормов и физико – механические свойства зерна / К. Е. Миронов. – Текст: непосредственный // Вестник НГИЭИ. – 2012. – № 12 (19). – С. 88-91. – EDN PJZFBJ.

89. Милютин, Р. А. Обзор конструкции молотковых дробилок / Р. А. Милютин, Г. С. Юнусов, Н. Н. Андержанова – Текст: непосредственный // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства: Материалы международной научно-практической конференции, Йошкар-Ола, 16–17 марта 2022 года. Том Выпуск XXIV. – ЙОШКАР-ОЛА: Марийский государственный университет, 2022. – Т. 1. – С. 644-647.

90. Мошонкин, А. М. Совершенствование конструкции и оптимизация конструктивно-технологических параметров питающего устройства плющилки зерна : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.01 / Мошонкин Александр Михайлович; [Место защиты: Чувашская государственная сельскохозяйственная академия]. – Киров, 2019. – 157 с.

91. Нечаев, В. Н. Влияние некоторых параметров на рабочий процесс дробилок зерна / В. Н. Нечаев. – Текст: непосредственный // Вестник НГИЭИ. – 2015. – № 6 (49). – С. 67-73. – EDN UBIORJ.

92. Нечаев, В. Н. Технико-экономическое обоснование применения дробилки зерна с ротором-вентилятором / В. Н. Нечаев. – Текст: непосредственный // Вестник НГИЭИ. – 2013. – № 12 (31). – С. 56-64. – EDN PУВЕРС.

93. Носатова, Е. А. Анализ существующих способов защиты от вибрации и шума на предприятиях сборного железобетона / Е.А. Носатова. – Текст: непосредственный // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2009. – № 1. – С. 57-59. – EDN KNURIL.

94. Обоснование и расчет эффективности и цены проектируемых многоцелевых колесных и гусеничных машин: в 2 частях. Часть 1. Тракторы: методические указания по дисциплине «Конструирование и расчет трактора» для студентов специальности 1-37 01 03 «Тракторостроение» / составители: С. Н. Антончик Л. В. Гринцевич, В. В. Гуськов [и др.]; под редакцией В. П. Бойкова. – Минск: Изд-во Белорусского национального технического университета, 2013. – 38 с. – Текст: непосредственный.

95. Обоснование конструкционных и технологических параметров рабочего органа фрезерного измельчителя зерна / А. В. Алешкин, С. Ю. Булатов, В. Н. Нечаев, С. Л. Низовцев. – Текст: непосредственный // Инженерные технологии и системы. – 2023. – Т. 33, № 1. – С. 23-57.

96. Оценка степени воздействия измельчающих и смешивающих машин на окружающую среду / Д. В. Фролов, А. А. Гладышев, Б. Г. Рогачев, Л. Н. Павлов. –

Текст: непосредственный // Вестник мясного скотоводства. – 2010. – Т. 2, № 63. – С. 148-152.

97. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механических колебаний: учебное пособие для вузов / Я. Г. Пановко. – Москва: Наука, 1991. – 256 с. – Текст: непосредственный.

98. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механического удара / Я. Г. Пановко. – Москва: Наука, 1977. – 224 с. – Текст: непосредственный.

99. Патент № 2746586 С1 Российская Федерация, МПК В02С 13/04. Молотковая дробилка: № 2020130348: заявл. 14.09.2020: опубл. 16.04.2021 / Федоренко И. Я., Бесполденев Р. В.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный аграрный университет». – EDN FSBBVQ. – Текст: непосредственный.

100. Поздняков, В. Д. Улучшение работы молотковой дробилки за счёт совершенствования её конструктивной схемы / В. Д. Поздняков, А. С. Куспаков. – Текст: непосредственный // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2011. – № 3 (31). – С. 76-78.

101. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 21 июня 2016 г. N 81 «Об утверждении СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах». – Москва: АО «Кодекс», 2016. – 69 с. – Текст: непосредственный.

102. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 года N 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" (с изменениями на 30 декабря 2022 года) – Текст: электронный // Официальный интернет-портал правовой информации (www.pravo.gov.ru): [сайт]. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102030022> (дата обращения: 03.05.2023).

103. Постановление Госкомсанэпиднадзора России от 31 октября 1996 г. N 36 «Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96. 2.2.4. Физические факторы производственной среды 2.1.8. Физические факторы окружающей природной среды. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы. – Москва: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 11 с. – Текст: непосредственный.

104. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 31 октября 1996 г. N 40 «Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.566-96. 2.2.4. Физические факторы производственной среды. 2.1.8. Физические факторы окружающей природной среды. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы» – Москва: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 41 с. – Текст: непосредственный

105. Постановление Правительства Российской Федерации от 03.09.2021 № 1489 «О внесении изменений в Федеральную научно-техническую программу развития сельского хозяйства на 2017-2025 годы». – Текст: электронный // Официальный интернет-портал правовой информации (www.pravo.gov.ru): [сайт]. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202109130012> (дата обращения: 03.05.2023).

106. Постановление Правительства Российской Федерации от 25.08.2017 № 996 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017-2030 годы» // Собрание законодательства РФ. – 04.09.2017. – № 36. – Ст. 5421. – Текст: непосредственный.

107. Постановление Правительства Российской Федерации от 27 декабря 1997 г. № 1631 «О повышении районного коэффициента к заработной плате на отдельных территориях Алтайского края». – Текст: непосредственный.

108. Превентивная стратегия технического обслуживания дробильного оборудования / И. Х. Гималтдинов, Б. Г. Зиганшин, И. Г. Галиев [и др.]. – Текст: непосредственный // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 15, № 3 (59). – С. 71-76.

109. Прейс, В. В. Обоснование рационального скоростного режима работы молотковой дробилки по критерию удельной энергоемкости процесса измельчения / В. В. Прейс, А. А. Журавлев. – Текст: непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 6. – С. 23-28. – EDN XNTMGO.

110. Приготовление кормов в фермерских хозяйствах: практическое руководство / ГБУ НО «ИКЦ АПК». – Текст: электронный // ГБУ Нижегородской области «Инновационно-консультационный центр агропромышленного комплекса»: [сайт] – URL: <http://www.ncs.ru/biblioteka> (дата обращения: 04.05.2023).

111. Приказ Министра России от 13.12.2021 N 916/пр «Об утверждении Методики определения сметных цен на эксплуатацию машин и механизмов (Зарегистрировано в Минюсте России 05.04.2022 N 68062). – Текст: непосредственный.

112. Приказ Министра РФ от 14 сентября 1992 г. N 209 «Об утверждении методики по определению уровня арендной платы за нежилые здания (помещения)». – Текст: непосредственный.

113. Рындин, А. Ю. Исследование надежности рабочих органов зернодробилки закрытого типа / А. Ю. Рындин, Д. Ю. Данилов – Текст: непосредственный // Карельский научный журнал. – 2015. – № 1(10). – С. 190-192. – EDN TRKXGJ.

114. Рындин, А. Ю. Анализ факторов, влияющих на рабочий процесс молотковых дробилок / А. Ю. Рындин. – Текст: непосредственный // Евразийское научное объединение. – 2020. – № 5-2 (63). – С. 181-183. – EDN VRZZWA.

115. Рюле, М. Измельчение: факторы влияния на размер частиц и их распределение / М. Рюле. – Текст: непосредственный // Комбикорма. – 2020. – № 4. – С. 22-23.

116. Савинов, О. А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет / О. А. Савинов. – Ленинград; Москва, 1964 – 346 с. – Текст: непосредственный.

117. Савиных, П. А. Исследование рабочего процесса молотковой дробилки зерна с ротором-вентилятором / П. А. Савиных, С. Ю. Булатов, В. Н. Нечаев. – Текст: непосредственный // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2013. – № 1(32). – С. 54-59. – EDN PXKNMB.

118. Садов, В. В. Обоснование структуры и состава технологических линий для производства комбикормов в сельскохозяйственных предприятиях: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.20.01 / Садов Виктор Викторович; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова»]. – Барнаул, 2018. – 294 с.: ил. – Текст: непосредственный.

119. Садов, В. В. Повышение эффективности молотковой дробилки с вертикальным валом при измельчении зерновых компонентов / В. В. Садов, С. А. Сорокин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 11(169). – С. 86-92. – EDN ZAATXV.

120. Свод правил СП 26.13330.2012 Фундаменты машин с динамическими нагрузками. Актуализированная редакция СНиП 2.02.05-87. – Москва: ФАУ «ФЦС», 2012. – 66 с. – Текст: непосредственный.

121. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – 10-е изд., доп. – Москва: Наука, 1987. – 430 с. – Текст: непосредственный.

122. Сертификация на продукцию, безопасность, технические условия/ ООО «АгроТехНовации». – Текст: электронный // Общество с ограниченной ответственностью «АгроТехНовации» : [сайт] – URL: <http://agrotechnova22.ru/html/products.html> (дата обращения: 04.09.2023).

123. Серегин, А. А. Основы расчета и конструирования машин и аппаратов перерабатывающих производств: учебное пособие / А. А. Серегин, И. В. Назаров, А. И. Удовкин. – Зерноград: АЧИИ ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2016. – 205 с. – Текст: непосредственный.

124. Смышляев, А. А. Совершенствование рабочих органов дробилок зерна / А. А. Смышляев. – Текст: непосредственный // Тенденции развития науки и

образования. – 2023. – № 94-5. – С. 69-71. – DOI 10.18411/trnio-02-2023-249. – EDN HIOSEB.

125. Совершенствование условий труда в дробильном отделении животноводческого комплекса за счет снижения уровня производственного шума / Е. А. Высоцкая, А. С. Корнев, Р. А. Дружинин, О. Е. Соцков. – Текст: непосредственный // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 219. – Т. 12, № 4 (63). – С. 72-78.

126. Статистика многомерной полиномиальной регрессии. – Текст: электронный // PTC Mathcad Prime. – URL: https://support.ptc.com/help/mathcad/r8.0/ru/index.html#page/PTC_Mathcad_Help/statistics_of_multivariate_polynomial_regression.html#wwID0ESR5V (дата обращения: 14.05.2023).

127. СТО АИСТ 1.14.2-2020. Машины для кормопроизводства. Показатели назначения и надежности. Общие требования: стандарт организации: издание официальное: взамен СТО АИСТ 1.14-2012 (в части значений показателей условий испытаний, назначения и надежности машин для кормопроизводства): дата введения 2020-02-03 / Ассоциация испытателей сельскохозяйственной техники и технологий; Новокубанский филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса» (КубНИИТиМ). – Москва: Росинформагротех, 2020. – III, 26 с. – Текст: непосредственный.

128. Супрунов, Д. А. Использование пшенично-ячменных комбикормов при выращивании цыплят-бройлеров: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук: 06.02.02 / Супрунов Дмитрий Анатольевич; [Место защиты: Всерос. науч.-исслед. и технол. ин-т птицеводства]. – Сергиев Посад, 2009. – 23 с.

129. Сысуев, В. А. Кормоприготовительные машины. Теория, разработка, эксперимент: в 2 томах / В. А. Сысуев, А. В. Алешкин, П. А. Савиных. – Киров: Зональный НИИСХ Северо-Востока, 2008. – Т. 1. – 640 с. – Текст: непосредственный.

130. Теории подобия и размерностей: моделирование: [учебное пособие для вузов] / П. М. Алабужев, В. Б. Геронимус, Л. М. Минкевич, Б. А. Шеховцов. – Москва: Высшая школа, 1968. – 206 с. – Текст: непосредственный.

131. Терехин, С. Ю. Разработка методов и средств виброакустической диагностики оборудования комбикормового производства / С. Ю. Терехин, Л. А. Глебов, А. Е. Яблоков. – Текст: непосредственный // Естественные и технические науки. – 2008. – № 5 (37). – С. 245.

132. Техника и технологии в животноводстве: учебное пособие для студентов, осваивающих образовательные программы бакалавриата и магистратуры по направлению подготовки «Агроинженерия» / В. И. Трухачев, И. В. Атанов, И. В. Капустин, Д. И. Грицай; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Ставропольский государственный аграрный университет. – Ставрополь: АГРУС, 2015. – 403, [1] с.: ил., табл.; 20 см. – (Учебники и учебные пособия для вузов). – ISBN 978-5-9596-1194-1: 100 экз. – Текст: непосредственный.

133. Трифонов, А. П. Шумы и меры борьбы с шумом, вибрацией / А. П. Трифонов, Л. И. Рослякова. – Текст: непосредственный // Проблемы и перспективы развития России: Молодежный взгляд в будущее: сборник научных статей Всероссийской научной конференции: в 4 томах, Курск, 17-18 октября 2018 г. / ответственный редактор А. А. Горохов. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2018. – Т. 4. – С. 78-81.

134. Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» – Текст: электронный // Интернет-портал «Российской газеты»: [сайт]. – URL: <https://rg.ru/documents/2018/05/08/president-ukaz204-site-dok.html> (дата обращения: 20.04.2023).

135. Указ Президента РФ от 21 июля 2016 г. N 350 «О мерах по реализации государственной научно-технической политики в интересах развития сельского хозяйства» // Собрание законодательства РФ. – 25.07.2016. – № 30. – Ст. 4904. – Текст: непосредственный.

136. Федеральный закон от 29 декабря 2006 г. N 264-ФЗ «О развитии сельского хозяйства» // Собрание законодательства РФ. – 01.01.2007. – № 1 (ч. 1). – Ст. 27. – Текст: непосредственный.

137. Федоренко И. Я. Методологические аспекты экспериментальной оптимизации процесса измельчения фуражного зерна / И. Я. Федоренко. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 5 (199). – С. 101-107. – EDN XCTRAV.

138. Федоренко, И. Я. Mathcad в работе магистранта: учебное пособие для студентов вузов, осваивающих образовательные программы магистратуры по направлению подготовки «Агроинженерия» / И. Я. Федоренко. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ. – 2022. – 95 с. – Текст: непосредственный.

139. Федоренко, И. Я. Вибрационные процессы и устройства в АПК / И. Я. Федоренко. – Барнаул: РИО Алтайского, 2016. – 289 с. – ISBN 978-5-94485-296-0. – EDN PSAXXF. – Текст: непосредственный.

140. Федоренко, И. Я. Влияние параметров ротора молотковой дробилки на энергетику процесса измельчения / И. Я. Федоренко. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 5 (163). – С. 178-183. – EDN XUGFGP.

141. Федоренко, И. Я. Динамика молотковой дробилки с вертикальной осью вращения ротора / И. Я. Федоренко, В. В. Мозговых. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 11 (61). – С. 69-75.

142. Федоренко, И. Я. Динамические свойства молотковой зернодробилки с вертикальным расположением барабана / И. Я. Федоренко. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 1. – С. 89-95.

143. Федоренко, И. Я. Проектирование технических устройств и систем: принципы, методы, процедуры: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 110800 «Агроинженерия» /

И. Я. Федоренко, А. А. Смышляев. – Москва: Форум, ИНФРА-М, 2014. – 319 с. – Текст: непосредственный.

144. Федоренко, И. Я. Техника и технологии в животноводстве. Часть 1. Механизация приготовления и раздачи кормов: учебное пособие / И. Я. Федоренко, В. В. Садов. – 1-е изд. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2014. – 207 с. – Текст: непосредственный.

145. Федоренко, И. Я. Технологическая оптимизация хозяйственных комбикормовых предприятий: монография / И. Я. Федоренко, В. В. Садов; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2017. – 249 с. – Текст: непосредственный.

146. Федоренко, И. Я. Технологические процессы и оборудование для приготовления кормов: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности 110301 «Механизация сельского хозяйства» / И. Я. Федоренко. — Москва: Форум, 2007. – 175 с. – Текст: непосредственный.

147. Федеральная служба государственной статистики: официальный сайт. – Москва. – Обновляется в течение суток. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/> (Дата обращения 28.06.2023)

148. Хасанова, Ф. Ф. Дробилка молотковая безрешетная / Ф. Ф. Хасанова, Р. Р. Мусин. – Текст: непосредственный // Современное состояние, проблемы и перспективы развития механизации и технического сервиса агропромышленного комплекса: материалы Международной научно-практической конференции Института механизации и технического сервиса. – Казань: Казанского ГАУ, 2018. – С. 215-219 .

149. Хуснутдинов, Р. Р. Балансировка роторов дробилок кормов / Р. Р. Хуснутдинов. – Текст: непосредственный // Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК: материалы студенческой научно-практической конференции с международным участием, посвященной 80-летию ФГБОУ ВПО ИрГСХА, Иркутск, 19-20 марта 2014 г. – Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2014. – Часть I. – С. 164-167.

150. Черепков, А. В. Совершенствование процесса измельчения зерна с обоснованием конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.01 / Черепков Александр Викторович; [Место защиты: Воронеж. гос. аграр. ун-т им. императора Петра I]. – Орел, 2016. – 152 с. – Текст: непосредственный.

151. Шкондин, В. Н. Разработка способа измельчения фуражного зерна и обоснование параметров двухступенчатого измельчителя: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.01 / Шкондин Владимир Николаевич; [Место защиты: Дон. гос. аграр. ун-т]. – Зерноград, 2017. – 173 с.: ил. – Текст: непосредственный.

152. Шумский, А. С. Повышение долговечности измельчителей зерновых материалов роторного типа : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.03 / Шумский Александр Сергеевич; [Место защиты: Волгогр. гос. аграр. ун-т]. – Ставрополь, 2019. – 155 с.

153. Шараби Н. Н. Обоснование параметров вибрационного аппарата для высева семян кунжута : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.01 / Шараби Нурэлдин Нурэлдин Мосад; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»]. – Ростов-на-Дону, 2021. – 133 с.

154. Экспериментально-теоретическое исследование работы молотковой дробилки / И. В. Коношин, Р. А. Булавинцев, А. В. Волженцев, А. П. Башкирев – Текст: непосредственный // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 9. – С. 198-204.

155. Яблоков А. Е. Влияние резинометаллических опор ротора на динамику дробилки / А.Е. Яблоков, А.Р. Казаров. – Текст: непосредственный // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2015. – № 5. – С. 50-54. – Текст: непосредственный.

156. Яровой, М. Н. Теоретические основы определения энергии перемещения кольцевого слоя в молотковой дробилке / М. Н. Яровой, Р. А. Дружинин, А. С. Корнев. – Текст: непосредственный // АгроЭкоИнфо. – 2022. – № 2 (50). – DOI 10.51419/202122222. – EDN JXOHMA.

157. Bospoldenov, R.V. Mechanical and physical aspects of the theory of interaction between a crusher hammer and an air-grain layer //R.V. Bospoldenov & I.Ya. Fedorenko & T.N. Zemlyanukhina & L.I. Shevtsova & M.V. Polkovnikova and A.V. Ishkov // Journal of Physics: Conference Series, Volume 2573, International Scientific Conference on Advances in Applied Physics and Mathematics 2023 10/04/2023 - 12/04/2023 – Tashkent, Uzbekistan.: Series 2573. 012011. – 2023. – DOI: 10.1088/1742-6596/2573/1/012011.

158. Kiarie, E. G. Role of Feed Processing on Gut Health and Function in Pigs and Poultry: Conundrum of Optimal Particle Size and Hydrothermal Regimens / E. G. Kiarie, A. Mills // Front Vet Sci. – 2019 Feb 19;6:19. – DOI 10.3389/fvets.2019.00019. PMID: 30838217; PMCID: PMC6390496.

159. Morris, C. F. Puroindolines: the molecular genetic basis of wheat grain hardness. / C. F. Morris // Plant Mol Biol. – 2002 Mar-Apr; 48(5-6):633-47. – DOI 10.1023/a:1014837431178. PMID: 11999840.

160. Mustakin, S. P. Particle size and physical characteristic of corn milling results using hammer mill as poultry feed ingredients / S.P. Mustakin, A.S. Jasmal // World Journal of Advanced Research and Reviews. – 2021. – № 11 (2). – P. 298-302. – URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5336967>.

161. Olayinka O. S. An Overview of Industrial Employees' Exposure to Noise in Sundry Processing and Manufacturing Industries in Ilorin Metropolis, Nigeria / Oyedepo S. OLAYINKA, Saadu A. ABDULLAHI // Industrial Health. – 2009. – Vol. 47, Issue 2. – P. 123-133, Released on J-STAGE April 15, 2009, Online ISSN 1880-8026, Print ISSN 0019-8366, <https://doi.org/10.2486/indhealth.47.123>.

162. Pasha, I. Grain hardness: a major determinant of wheat quality / I. Pasha, F. M. Anjum, C. F. Morris // Food Sci Technol Int. – 2010 Dec; 16(6):511-22. – DOI 10.1177/1082013210379691. Epub 2010 Oct 28. PMID: 21339167.

163. Polari, J. J. Impact of industrial hammer mill rotor speed on extraction efficiency and quality of extra virgin olive oil / J. J. Polari, D. Garcí-Aguirre, L. Olmo-García, A. Carrasco-Pancorbo, S. C. Wang // Food Chem. – 2018 Mar 1;242:362-368. – DOI 10.1016/j.foodchem.2017.09.003. Epub 2017 Sep 6. PMID: 29037701.

164. Russell, S. Hunt (1956) Noise Reduction at a Hammer Mill and at a Knife Cutter, *American Industrial Hygiene Association Quarterly*, 17:1,35-36, – DOI 10.1080/00968205609344365.

165. Scholz, V. Energieeffizienz kleiner Hammermühlen beim Zerkleinern von Mais / Scholz, Volkhard, Gutemberg P. Dias, Densilon E. Rodriues, und Ronaldo F. Coelho // *LANDTECHNIK*, – 28 Oktober 2002. – Bd. 57, Nr. 5. – S. 282-283. – DOI <https://doi.org/10.1515/lt.2002.1663>. [zitiert 7. August 2023]; Verfügbar unter: <https://www.landtechnik-online.eu/landtechnik/article/view/2002-57-5-282-283>.

166. Tanaś, W. Modal analysis and acoustic noise characterization of a grain crusher / W. Tanaś, J. Szczepaniak, J. Kromulski, M. Szymanek, J. Tanaś, M. Sprawka // *Ann Agric Environ Med*. – 2018 Sep 25;25 (3):433-436. – DOI 10.26444/aaem/87154. Epub 2018 Sep 17. PMID: 30260195.

167. Tavakoli, H. Effects of moisture content, loading rate, and grain orientation on fracture resistance of barley grain / H. Tavakoli, S. S. Mohtasebi, A. Rajabipour, M. Tavakoli // *Research in Agricultural Engineering*. – 2009. – Vol. 55, iss. 3. – P. 85-93. – DOI 10.17221/6/2009-RAE.

168. Tie, Q. Study on shock vibration analysis and foundation reinforcement of large ball mill. // Q. Tie, T. Biliang, B. Qiang, Z. Xiangyun, C. Ming, Z. Chunjiang // *Sci Rep*. – 2023 Jan 5;13(1):193. – DOI 10.1038/s41598-022-26194-y. PMID: 36604436; PMCID: PMC9814845.

169. Vaculík, P. Disintegration process in disc crushers» / P. Vaculík, J. Maloun, Chládek, M. L. Přikryl // *Research in Agricultural Engineering*. – 2013. – Vol. 59, issue 3. – P. 98-104. – DOI 10.17221/28/2012-RAE.

170. Vinod, K. J. *Mechanics of Hammer Mill Grinding of Corn as Related to its Mechanical Properties*: The Pennsylvania State University, 1975.

171. Zakhezin, A. M. Vibrational methods of the overhead gas- pipelines technological equipment diagnostics / A. M. Zakhezin, T. V. Malysheva // *Proceedings of 2nd International Symposium on Mechanical Vibration (ISMV-2000)*. – Islamabad, 2000. – P. 567-572.

Приложение Б 1

Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на энергоёмкость процесса при измельчении пшеницы

	0	1	2	3	4	
	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"	(0)
0						5.921
1	1	1	-1	-1	0	5.837
2	2	1	1	-1	0	5.047
3	3	1	-1	1	0	7.023
4	4	1	1	1	0	6.069
5	5	1	-1	0	-1	6.883
6	6	1	1	0	-1	6.986
7	7	1	-1	0	1	8.584
8	8	1	1	0	1	7.115
9	9	1	0	-1	-1	8.944
10	10	1	0	1	-1	5.156
11	11	1	0	-1	1	4.707
12	12	1	0	1	1	5.615
13	13	1	0	0	0	(5.750)
14	14	1	0	0	0	
15	15	1	0	0	0	

X := boxbehnken(3) =

Y1 :=

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"p"
1	"Intercept"	5.357	0.422	4.272	6.443	NaN	12.689	2.702·10 ⁻⁵
2	"A"	-0.59	0.259	-1.255	0.075	1	-2.282	0.036
3	"B"	-1.162	0.259	-1.826	-0.497	1	-4.493	3.219·10 ⁻³
4	"C"	-0.103	0.259	-0.767	0.562	1	-0.397	0.354
5	"AB"	0.572	0.366	-0.368	1.512	1	1.565	0.089
6	"AC"	0.264	0.366	-0.676	1.204	1	0.723	0.251
7	"BC"	-0.58	0.366	-1.52	0.36	1	-1.586	0.087
8	"AA"	0.192	0.381	-0.786	1.17	1.011	0.505	0.317
9	"BB"	0.902	0.381	-0.077	1.88	1.011	2.369	0.032
10	"CC"	1.191	0.381	0.212	2.169	1.011	3.129	0.013

polyfitc(X, Y1, 2) =

	0	1
0	"Regression Analysis"	"Value"
1	"Standard Deviation"	0.731
2	"R2"	0.901
3	"Adjusted R2"	0.722
polyfitstat (X, Y1, 2) = 4	"Predicted R2"	0
5	"PRESS"	33.932
6	"Durbin-Watson"	1.807
7	"Coefficients"	[11, 8]
8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]

$$Y_1(X_1, X_2, X_3) = 5.357 - 0.59 \cdot X_1 - 1.162 \cdot X_2 - 0.103 \cdot X_3 + 0.572 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.264 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.58 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.192 \cdot (X_1)^2 + 0.902 \cdot (X_2)^2 + 1.191 \cdot (X_3)^2$$

$$X_1 := 0 \quad X_2 := 0 \quad X_3 := 0$$

Given

$$1 \geq X_1 \geq -1 \quad 1 \geq X_2 \geq -1 \quad 1 \geq X_3 \geq -1$$

$$\text{Minimize}(Y_1, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.331 \\ 0.013 \end{pmatrix}$$

$$Y_1(1, 0.331, 0.013) = 4.862$$

Приложение Б 2

Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на энергоёмкость процесса при измельчении ячменя

	0	1	2	3	4	
0	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"	0
1	1	1	-1	-1	0	7.111
2	2	1	1	-1	0	7.674
3	3	1	-1	1	0	5.670
4	4	1	1	1	0	8.259
5	5	1	-1	0	-1	10.639
6	6	1	1	0	-1	16.081
X := boxbehken(3) =	7	1	-1	0	1	Y1 := 10.185
	8	1	1	0	1	12.203
	9	1	0	-1	-1	8.277
	10	1	0	1	-1	21.719
	11	1	0	-1	1	8.913
	12	1	0	1	1	7.397
	13	1	0	0	0	7.823
	14	1	0	0	0	7.521
	15	1	0	0	0	

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"p"
1	"Intercept"	7.574	0.975	5.069	10.08	NaN	7.77	2.824·10 ⁻⁴
2	"A"	-1.924	0.597	-3.458	-0.389	1	-3.223	0.012
3	"B"	-3.439	0.597	-4.973	-1.904	1	-5.761	1.107·10 ⁻³
4	"C"	2.191	0.597	0.657	3.726	1	3.671	7.216·10 ⁻³
5	"AB"	1.967	0.844	-0.203	4.137	1	2.33	0.034
6	"AC"	-2.067	0.844	-4.237	0.103	1	-2.448	0.029
7	"BC"	-2.22	0.844	-4.39	-0.05	1	-2.63	0.023
8	"AA"	0.154	0.879	-2.104	2.413	1.011	0.176	0.434
9	"BB"	1.639	0.879	-0.62	3.898	1.011	1.865	0.061
10	"CC"	3.565	0.879	1.306	5.823	1.011	4.057	4.879·10 ⁻³

	0	1
0	"Regression Analysis"	"Value"
1	"Standard Deviation"	1.688
2	"R2"	0.95
3	"Adjusted R2"	0.859
4	"Predicted R2"	0.199
5	"PRESS"	226.837
6	"Durbin-Watson"	3.36
7	"Coefficients"	[11, 8]
8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]

$$Y_1(X_1, X_2, X_3) := 7.574 - 1.924 \cdot X_1 - 3.439 \cdot X_2 + 2.191 \cdot X_3 + 1.967 \cdot X_1 \cdot X_2 - 2.067 \cdot X_1 \cdot X_3 - 2.22 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.154 \cdot (X_1)^2 + 1.639 \cdot (X_2)^2 + 3.565 \cdot (X_3)^2$$

$$X_1 := 0 \quad X_2 := 0 \quad X_3 := 0$$

Given

$$1 \geq X_1 \geq -1 \quad 1 \geq X_2 \geq -1 \quad 1 \geq X_3 \geq -1$$

$$\text{Minimize}(Y_1, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.554 \\ 0.155 \end{pmatrix}$$

$$Y_1(1, 0.554, 0.155) = 5.406$$

Приложение Б 3

Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на модуль размола исходного материала при измельчении пшеницы

	0	1	2	3	4	
	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"	0
0	1	1	-1	-1	0	1.157
1	2	1	1	-1	0	1.244
2	3	1	-1	1	0	1.280
3	4	1	1	1	0	1.394
4	5	1	-1	0	-1	1.425
5	6	1	1	0	-1	0.935
6	7	1	-1	0	1	1.015
7	8	1	1	0	1	1.317
8	9	1	0	-1	-1	1.582
9	10	1	0	1	-1	0.845
10	11	1	0	-1	1	1.058
11	12	1	0	1	1	1.106
12	13	1	0	0	0	1.164
13	14	1	0	0	0	1.122
14	15	1	0	0	0	

X := boxbehnken(3) =

Y2 :=

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"P"
1	"Intercept"	1.131	0.02	1.078	1.183	NaN	55.653	1.772·10 ⁻⁸
2	"A"	0.038	0.012	6.019·10 ⁻³	0.07	1	3.054	0.014
3	"B"	0.106	0.012	0.074	0.138	1	8.49	1.863·10 ⁻⁴
4	"C"	-0.233	0.012	-0.265	-0.201	1	-18.738	3.986·10 ⁻⁶
5	"AB"	-0.03	0.018	-0.075	0.015	1	-1.719	0.073
6	"AC"	0.012	0.018	-0.033	0.057	1	0.696	0.259
7	"BC"	-0.013	0.018	-0.058	0.032	1	-0.739	0.247
8	"AA"	0.016	0.018	-0.031	0.063	1.011	0.855	0.216
9	"BB"	0.024	0.018	-0.023	0.071	1.011	1.306	0.124
10	"CC"	0.046	0.018	-1.159·10 ⁻³	0.093	1.011	2.507	0.027

polyfitc(X, Y2, 2) =

	0	1
0	"Regression Analysis"	"Value"
1	"Standard Deviation"	0.035
2	"R2"	0.989
3	"Adjusted R2"	0.969
4	"Predicted R2"	0.866
5	"PRESS"	0.074
6	"Durbin-Watson"	2.823
7	"Coefficients"	[11, 8]
8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]

polyfitstat(X, Y2, 2) =

$$Y2(X1, X2, X3) := 1.131 + 0.038 \cdot X1 + 0.106 \cdot X2 - 0.233 \cdot X3 - 0.03 \cdot X1 \cdot X2 + 0.012 \cdot X1 \cdot X3 - 0.013 \cdot X2 \cdot X3 + 0.016 \cdot (X1)^2 + 0.024 \cdot (X2)^2 + 0.046 \cdot (X3)^2$$

$$X1 := 0 \quad X2 := 0 \quad X3 := 0$$

Given

$$1 \geq X1 \geq -1 \quad 1 \geq X2 \geq -1 \quad 1 \geq X3 \geq -1$$

$$\text{Minimize}(Y2, X1, X2, X3) = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{Maximize}(Y2, X1, X2, X3) = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Приложение Б 4

Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на модуль размола исходного материала при измельчении ячменя

	0	1	2	3	4	
0	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"	0
1	1	1	-1	-1	0	1.262
2	2	1	1	-1	0	1.384
3	3	1	-1	1	0	1.430
4	4	1	1	1	0	1.583
5	5	1	-1	0	-1	1.678
6	6	1	1	0	-1	1.166
7	7	1	-1	0	1	1.177
8	8	1	1	0	1	1.541
9	9	1	0	-1	-1	1.750
10	10	1	0	1	-1	1.085
11	11	1	0	-1	1	1.174
12	12	1	0	1	1	1.276
13	13	1	0	0	0	1.283
14	14	1	0	0	0	1.283
15	15	1	0	0	0	1.309

X := boxbehnken(3) =

Y2 :=

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"P"
1	"Intercept"	1.289	0.016	1.248	1.331	NaN	79.765	0
2	"A"	0.033	0.01	0.008	0.058	1	3.334	0.01
3	"B"	0.088	0.01	0.062	0.113	1	8.84	0
4	"C"	-0.244	0.01	-0.269	-0.218	1	-24.625	0
5	"AB"	-0.017	0.014	-0.052	0.019	1	-1.179	0.146
6	"AC"	-0.021	0.014	-0.057	0.015	1	-1.5	0.097
7	"BC"	-0.03	0.014	-0.066	0.006	1	-2.143	0.042
8	"AA"	0.015	0.015	-0.022	0.053	1.011	1.052	0.17
9	"BB"	0.002	0.015	-0.036	0.039	1.011	0.126	0.452
10	"CC"	0.096	0.015	0.059	0.134	1.011	6.612	0.001

polyfitc(X, Y2, 2) =

	0	1
0	"Regression Analysis"	"Value"
1	"Standard Deviation"	0.028
2	"R2"	0.993
3	"Adjusted R2"	0.981
4	"Predicted R2"	0.908
5	"PRESS"	0.054
6	"Durbin-Watson"	1.523
7	"Coefficients"	[11, 8]
8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]

polyfitstat(X, Y2, 2) =

$$Y_2(X_1, X_2, X_3) := 1.289 + 0.033 \cdot X_1 + 0.088 \cdot X_2 - 0.244 \cdot X_3 - 0.017 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.021 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.03 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.015 \cdot (X_1)^2 + 0.002 \cdot (X_2)^2 + 0.096 \cdot (X_3)^2$$

$$X_1 := 0 \quad X_2 := 0 \quad X_3 := 0$$

Given

$$1 \geq X_1 \geq -1 \quad 1 \geq X_2 \geq -1 \quad 1 \geq X_3 \geq -1$$

$$\text{Minimize}(Y_2, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} -0.967 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{Maximize}(Y_2, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Приложение Б 5

Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на коэффициент вариации модуля размола при измельчении пшеницы

	0	1	2	3	4	
	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"	(0)
0						28.01
1	1	1	-1	-1	0	26.05
2	2	1	1	-1	0	25.32
3	3	1	-1	1	0	23.25
4	4	1	1	1	0	22.73
5	5	1	-1	0	-1	34.66
6	6	1	1	0	-1	31.91
7	7	1	-1	0	1	24.60
8	8	1	1	0	1	20.48
9	9	1	0	-1	-1	38.35
10	10	1	0	1	-1	30.63
11	11	1	0	-1	1	29.29
12	12	1	0	1	1	27.84
13	13	1	0	0	0	28.86
14	14	1	0	0	0	
15	15	1	0	0	0	

X := boxbehnken(3) =

Y3 :=

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"P"
1	"Intercept"	28.663	0.509	27.355	29.972	NaN	56.31	1.671·10 ⁻⁸
2	"A"	-1.167	0.312	-1.969	-0.366	1	-3.745	6.678·10 ⁻³
3	"B"	-2.729	0.312	-3.53	-1.927	1	-8.754	1.612·10 ⁻⁴
4	"C"	5.561	0.312	4.76	6.363	1	17.841	5.078·10 ⁻⁶
5	"AB"	1.152	0.441	0.019	2.286	1	2.614	0.024
6	"AC"	-0.557	0.441	-1.691	0.576	1	-1.265	0.131
7	"BC"	-0.9	0.441	-2.033	0.233	1	-2.042	0.048
8	"AA"	-0.429	0.459	-1.609	0.75	1.011	-0.935	0.196
9	"BB"	-0.052	0.459	-1.231	1.128	1.011	-0.113	0.457
10	"CC"	-0.097	0.459	-1.276	1.083	1.011	-0.211	0.421

polyfitc(X, Y3, 2) =

	0	1
0	"Regression Analysis"	"Value"
1	"Standard Deviation"	0.882
2	"R2"	0.988
3	"Adjusted R2"	0.967
4	"Predicted R2"	0.859
5	"PRESS"	46.933
6	"Durbin-Watson"	2.862
7	"Coefficients"	[11, 8]
8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]

polyfitstat(X, Y3, 2) =

$$Y_3(X_1, X_2, X_3) := 28.663 - 1.167 \cdot X_1 - 2.729 \cdot X_2 + 5.561 \cdot X_3 + 1.152 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.557 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.9 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.429 \cdot (X_1)^2 - 0.052 \cdot (X_2)^2 - 0.097 \cdot (X_3)^2$$

$$X_1 := 0 \quad X_2 := 0 \quad X_3 := 0$$

Given

$$1 \geq X_1 \geq -1 \quad 1 \geq X_2 \geq -1 \quad 1 \geq X_3 \geq -1$$

$$\text{Minimize}(Y_3, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$\text{Maximize}(Y_3, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Приложение Б 6

Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на коэффициент вариации модуля размола при измельчении ячменя

	0	1	2	3	4
0	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"
1	1	1	-1	-1	0
2	2	1	1	-1	0
3	3	1	-1	1	0
4	4	1	1	1	0
5	5	1	-1	0	-1
6	6	1	1	0	-1
7	7	1	-1	0	1
8	8	1	1	0	1
9	9	1	0	-1	-1
10	10	1	0	1	-1
11	11	1	0	-1	1
12	12	1	0	1	1
13	13	1	0	0	0
14	14	1	0	0	0
15	15	1	0	0	0

 $X := \text{boxbehnken}(3) =$

	0
0	16.67
1	15.19
2	14.71
3	13.29
4	12.54
5	18.05
6	17.88
7	13.65
8	12.02
9	19.39
10	17.92
11	16.48
12	16.40
13	16.07

 $Y3 :=$

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"p"
1	"Intercept"	16.317	0.173	15.872	16.761	NaN	94.357	0
2	"A"	-0.216	0.106	-0.488	0.056	1	-2.042	0.048
3	"B"	-0.859	0.106	-1.131	-0.587	1	-8.11	0
4	"C"	2.717	0.106	2.445	2.99	1	25.662	0
5	"AB"	-0.037	0.15	-0.422	0.347	1	-0.25	0.406
6	"AC"	0.145	0.15	-0.24	0.53	1	0.968	0.189
7	"BC"	0.04	0.15	-0.345	0.425	1	0.267	0.4
8	"AA"	-0.365	0.156	-0.765	0.036	1.011	-2.339	0.033
9	"BB"	-0.06	0.156	-0.46	0.341	1.011	-0.382	0.359
10	"CC"	-0.512	0.156	-0.913	-0.111	1.011	-3.285	0.011

 $\text{polyfitc}(X, Y3, 2) =$

	0	1
0	"Regression Analysis"	"Value"
1	"Standard Deviation"	0.3
2	"R2"	0.993
3	"Adjusted R2"	0.981
4	"Predicted R2"	0.913
5	"PRESS"	5.878
6	"Durbin-Watson"	1.074
7	"Coefficients"	[11, 8]
8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]

 $\text{polyfitstat}(X, Y3, 2) =$

$$Y_3(X_1, X_2, X_3) := 16.317 - 0.216 \cdot X_1 - 0.859 \cdot X_2 + 2.717 \cdot X_3 - 0.037 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.145 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0.04 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.365 \cdot (X_1)^2 - 0.06 \cdot (X_2)^2 - 0.512 \cdot (X_3)^2$$

$$X_1 := 0 \quad X_2 := 0 \quad X_3 := 0$$

Given

$$1 \geq X_1 \geq -1 \quad 1 \geq X_2 \geq -1 \quad 1 \geq X_3 \geq -1$$

$$\text{Minimize}(Y_3, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$\text{Maximize}(Y_3, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} -0.047 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Приложение Б 7

Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на относительное (по массе) количество целых зерен в размоле при измельчении пшеницы

	0	1	2	3	4	
	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"	0
1	1	1	-1	-1	0	0.197
2	2	1	1	-1	0	0.852
3	3	1	-1	1	0	0.797
4	4	1	1	1	0	1.280
5	5	1	-1	0	-1	1.117
6	6	1	1	0	-1	0.395
7	7	1	-1	0	1	0.230
8	8	1	1	0	1	0.530
9	9	1	0	-1	-1	1.613
10	10	1	0	1	-1	0.233
11	11	1	0	-1	1	0.635
12	12	1	0	1	1	0.735
13	13	1	0	0	0	0.781
14	14	1	0	0	0	0.660
15	15	1	0	0	0	

X := boxbehnken(3) =

Y4 :=

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"p"
1	"Intercept"	0.725	0.066	0.555	0.896	NaN	10.928	5.577·10 ⁻⁵
2	"A"	-0.023	0.041	-0.128	0.081	1	-0.572	0.296
3	"B"	0.367	0.041	0.263	0.472	1	9.032	1.39·10 ⁻⁴
4	"C"	-0.381	0.041	-0.485	-0.276	1	-9.37	1.167·10 ⁻⁴
5	"AB"	-0.063	0.057	-0.211	0.085	1	-1.096	0.162
6	"AC"	-5·10 ⁻⁴	0.057	-0.148	0.147	1	-8.698·10 ⁻³	0.497
7	"BC"	-0.17	0.057	-0.318	-0.022	1	-2.962	0.016
8	"AA"	-0.131	0.06	-0.284	0.023	1.011	-2.182	0.04
9	"BB"	-0.133	0.06	-0.287	0.021	1.011	-2.228	0.038
10	"CC"	0.161	0.06	6.91·10 ⁻³	0.315	1.011	2.686	0.022

polyfitc(X, Y4, 2) =

	0	1
0	"Regression Analysis"	"Value"
1	"Standard Deviation"	0.115
2	"R2"	0.975
3	"Adjusted R2"	0.931
4	"Predicted R2"	0.644
5	"PRESS"	0.955
6	"Durbin-Watson"	1.695
7	"Coefficients"	[11, 8]
8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]

polyfitstat(X, Y4, 2) =

$$Y_4(X_1, X_2, X_3) := 0.725 - 0.023 \cdot X_1 + 0.367 \cdot X_2 - 0.381 \cdot X_3 - 0.063 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.001 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.17 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.131 \cdot (X_1)^2 - 0.133 \cdot (X_2)^2 + 0.161 \cdot (X_3)^2$$

$$X_1 := 0 \quad X_2 := 0 \quad X_3 := 0$$

Given

$$1 \geq X_1 \geq -1 \quad 1 \geq X_2 \geq -1 \quad 1 \geq X_3 \geq -1$$

$$\text{Minimize}(Y_4, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 0.652 \end{pmatrix}$$

Приложение Б 8

Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на относительное (по массе) количество целых зерен в размоле при измельчении ячменя

	0	1	2	3	4	
0	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"	(0)
1	1	1	-1	-1	0	0.295
2	2	1	1	-1	0	0.452
3	3	1	-1	1	0	0.542
4	4	1	1	1	0	0.827
5	5	1	-1	0	-1	0.427
6	6	1	1	0	-1	0.316
7	7	1	-1	0	1	0.210
8	8	1	1	0	1	0.509
9	9	1	0	-1	-1	0.781
10	10	1	0	1	-1	0.211
11	11	1	0	-1	1	0.337
12	12	1	0	1	1	0.349
13	13	1	0	0	0	0.377
14	14	1	0	0	0	0.377
15	15	1	0	0	0	0.469

X := boxbehnken(3) =

Y4 :=

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"p"
1	"Intercept"	0.365	0.039	0.265	0.465	NaN	9.336	1.187·10 ⁻⁴
2	"A"	-0.096	0.024	-0.158	-0.035	1	-4.026	5.032·10 ⁻³
3	"B"	0.056	0.024	-5.666·10 ⁻³	0.117	1	2.334	0.033
4	"C"	-0.184	0.024	-0.245	-0.122	1	-7.675	2.991·10 ⁻⁴
5	"AB"	0.111	0.034	0.024	0.198	1	3.286	0.011
6	"AC"	0.073	0.034	-0.014	0.161	1	2.171	0.041
7	"BC"	-0.037	0.034	-0.124	0.051	1	-1.078	0.165
8	"AA"	0.053	0.035	-0.038	0.143	1.011	1.493	0.098
9	"BB"	0.067	0.035	-0.023	0.158	1.011	1.905	0.058
10	"CC"	0.027	0.035	-0.063	0.118	1.011	0.777	0.236

polyfitc(X, Y4, 2) =

	0	1
0	"Regression Analysis"	"Value"
1	"Standard Deviation"	0.068
2	"R2"	0.954
3	"Adjusted R2"	0.87
4	"Predicted R2"	0.271
5	"PRESS"	0.361
6	"Durbin-Watson"	3.05
7	"Coefficients"	[11, 8]
8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]

polyfitstat(X, Y4, 2) =

$$Y_4(X_1, X_2, X_3) := 0.365 - 0.096 \cdot X_1 + 0.056 \cdot X_2 - 0.184 \cdot X_3 + 0.111 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.073 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.037 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.053 \cdot (X_1)^2 + 0.067 \cdot (X_2)^2 + 0.027 \cdot (X_3)^2$$

$$X_1 := 0 \quad X_2 := 0 \quad X_3 := 0$$

Given

$$1 \geq X_1 \geq -1 \quad 1 \geq X_2 \geq -1 \quad 1 \geq X_3 \geq -1$$

$$\text{Minimize}(Y_4, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} 1 \\ -0.97 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Приложение Б 9

Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на виброактивность молотковой дробилки при измельчении пшеницы

	0	1	2	3	4	
0	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"	(14.1
1	1	1	-1	-1	0	15.7
2	2	1	1	-1	0	17.0
3	3	1	-1	1	0	17.3
4	4	1	1	1	0	11.9
5	5	1	-1	0	-1	11.2
6	6	1	1	0	-1	23.2
7	7	1	-1	0	1	20.4
8	8	1	1	0	1	9.7
9	9	1	0	-1	-1	14.5
10	10	1	0	1	-1	21.5
11	11	1	0	-1	1	25.0
12	12	1	0	1	1	14.5
13	13	1	0	0	0	14.8
14	14	1	0	0	0	14.6
15	15	1	0	0	0	

X := boxbehken(3) =

Y5 :=

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"P"
1	"Intercept"	14.633	0.627	13.021	16.246	NaN	23.329	1.347·10 ⁻⁶
2	"A"	-0.2	0.384	-1.187	0.787	1	-0.521	0.312
3	"B"	1.6	0.384	0.613	2.587	1	4.165	4.389·10 ⁻³
4	"C"	5.35	0.384	4.363	6.337	1	13.928	1.714·10 ⁻⁵
5	"AB"	-0.325	0.543	-1.721	1.071	1	-0.598	0.288
6	"AC"	-0.525	0.543	-1.921	0.871	1	-0.966	0.189
7	"BC"	-0.325	0.543	-1.721	1.071	1	-0.598	0.288
8	"AA"	0.196	0.565	-1.258	1.649	1.011	0.346	0.372
9	"BB"	1.196	0.565	-0.258	2.649	1.011	2.115	0.044
10	"CC"	1.846	0.565	0.392	3.299	1.011	3.265	0.011

polyfitc (X, Y5, 2) =

	0	1
0	"Regression Analysis"	"Value"
1	"Standard Deviation"	1.086
2	"R2"	0.978
3	"Adjusted R2"	0.94
4	"Predicted R2"	0.658
5	"PRESS"	93.785
6	"Durbin-Watson"	2.847
7	"Coefficients"	[11, 8]
8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]

polyfitstat (X, Y5, 2) =

$$Y5(X1, X2, X3) := 14.63 - 0.20 \cdot X1 + 1.60 \cdot X2 + 5.35 \cdot X3 - 0.325 \cdot X1 \cdot X2 - 0.525 \cdot X1 \cdot X3 - 0.325 \cdot X2 \cdot X3 + 0.196 \cdot (X1)^2 + 1.196 \cdot (X2)^2 + 1.846 \cdot (X3)^2$$

$$X1 := 0 \quad X2 := 0 \quad X3 := 0$$

Given

$$1 \geq X1 \geq -1 \quad 1 \geq X2 \geq -1 \quad 1 \geq X3 \geq -1$$

$$\text{Minimize}(Y5, X1, X2, X3) = \begin{pmatrix} -0.947 \\ -0.872 \\ -0.548 \end{pmatrix}$$

Приложение Б 10

Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на виброактивность молотковой дробилки при измельчении ячменя

	0	1	2	3	4	
0	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"	(12.9
1	1	1	-1	-1	0	13.9
2	2	1	1	-1	0	15.8
3	3	1	-1	1	0	16
4	4	1	1	1	0	11.7
5	5	1	-1	0	-1	12.2
6	6	1	1	0	-1	20.7
7	7	1	-1	0	1	17.8
8	8	1	1	0	1	11
9	9	1	0	-1	-1	12.4
10	10	1	0	1	-1	20.5
11	11	1	0	-1	1	18.8
12	12	1	0	1	1	11.6
13	13	1	0	0	0	12.9
14	14	1	0	0	0	12.9
15	15	1	0	0	0	(12.6

X := boxbehnken(3) =

Y5 :=

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"P"
1	"Intercept"	12.367	0.646	10.705	14.029	NaN	19.129	3.599·10 ⁻⁶
2	"A"	-0.15	0.396	-1.168	0.868	1	-0.379	0.36
3	"B"	0.588	0.396	-0.43	1.605	1	1.484	0.099
4	"C"	3.813	0.396	2.795	4.83	1	9.63	1.024·10 ⁻⁴
5	"AB"	-0.2	0.56	-1.639	1.239	1	-0.357	0.368
6	"AC"	-0.85	0.56	-2.289	0.589	1	-1.518	0.095
7	"BC"	-0.775	0.56	-2.214	0.664	1	-1.384	0.112
8	"AA"	1.104	0.583	-0.394	2.602	1.011	1.895	0.058
9	"BB"	1.179	0.583	-0.319	2.677	1.011	2.024	0.049
10	"CC"	2.129	0.583	0.631	3.627	1.011	3.654	7.345·10 ⁻³

polyfitc(X, Y5, 2) =

	0	1
0	"Regression Analysis"	"Value"
1	"Standard Deviation"	1.12
2	"R2"	0.959
3	"Adjusted R2"	0.886
4	"Predicted R2"	0.433
5	"PRESS"	87.565
6	"Durbin-Watson"	2.125
7	"Coefficients"	[11, 8]
8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]

polyfitstat(X, Y5, 2) =

$$Y5(X1, X2, X3) := 12.367 - 0.15 \cdot X1 + 0.588 \cdot X2 + 3.813 \cdot X3 - 0.2 \cdot X1 \cdot X2 - 0.85 \cdot X1 \cdot X3 - 0.775 \cdot X2 \cdot X3 + 1.104 \cdot (X1)^2 + 1.179 \cdot (X2)^2 + 2.129 \cdot (X3)^2$$

$$X1 := 0 \quad X2 := 0 \quad X3 := 0$$

Given

$$1 \geq X1 \geq -1 \quad 1 \geq X2 \geq -1 \quad 1 \geq X3 \geq -1$$

$$\text{Minimize}(Y5, X1, X2, X3) = \begin{pmatrix} -0.372 \\ -0.61 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Приложение Б 11

Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на уровень шумовой обстановки (общий уровень звукового давления во всем спектре частот) при измельчении пшеницы

	0	1	2	3	4	
	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"	(81.3)
0	1	1	-1	-1	0	85.8
1	2	1	1	-1	0	88.1
2	3	1	-1	1	0	85.9
3	4	1	1	1	0	84.1
4	5	1	-1	0	-1	83.7
5	6	1	1	0	-1	86.1
6	7	1	-1	0	1	85.3
7	8	1	1	0	1	82.1
8	9	1	0	-1	-1	86.7
9	10	1	0	1	-1	86.8
10	11	1	0	-1	1	87.1
11	12	1	0	1	1	82.9
12	13	1	0	0	0	83.3
13	14	1	0	0	0	83.0
14	15	1	0	0	0	

X := boxbehken(3) =

Y6 :=

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"p"
1	"Intercept"	83.067	0.4	82.039	84.095	NaN	207.703	2.454·10 ⁻¹¹
2	"A"	0.138	0.245	-0.492	0.767	1	0.561	0.299
3	"B"	1.475	0.245	0.845	2.105	1	6.023	9.076·10 ⁻⁴
4	"C"	1.087	0.245	0.458	1.717	1	4.44	3.381·10 ⁻³
5	"AB"	-1.675	0.346	-2.565	-0.785	1	-4.836	2.365·10 ⁻³
6	"AC"	-0.1	0.346	-0.99	0.79	1	-0.289	0.392
7	"BC"	-1.075	0.346	-1.965	-0.185	1	-3.104	0.013
8	"AA"	0.667	0.36	-0.26	1.593	1.011	1.849	0.062
9	"BB"	1.542	0.36	0.615	2.468	1.011	4.277	3.945·10 ⁻³
10	"CC"	1.067	0.36	0.14	1.993	1.011	2.959	0.016

polyfitc(X, Y6, 2) =

	0	1
0	"Regression Analysis"	"Value"
1	"Standard Deviation"	0.693
2	"R2"	0.959
3	"Adjusted R2"	0.885
4	"Predicted R2"	0.362
5	"PRESS"	37.195
6	"Durbin-Watson"	2.274
7	"Coefficients"	[11, 8]
8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]

polyfitstat(X, Y6, 2) =

$$Y6(X1, X2, X3) := 83.067 + 0.138 \cdot X1 + 1.475 \cdot X2 + 1.087 \cdot X3 - 1.675 \cdot X1 \cdot X2 - 0.1 \cdot X1 \cdot X3 - 1.075 \cdot X2 \cdot X3 + 0.667 \cdot (X1)^2 + 1.542 \cdot (X2)^2 + 1.067 \cdot (X3)^2$$

$$X1 := 0 \quad X2 := 0 \quad X3 := 0$$

Given

$$1 \geq X1 \geq -1 \quad 1 \geq X2 \geq -1 \quad 1 \geq X3 \geq -1$$

$$\text{Minimize}(Y6, X1, X2, X3) = \begin{pmatrix} -0.94 \\ -0.714 \\ 0.79 \end{pmatrix}$$

Приложение Б 12

Листинг обработки результатов эксперимента в среде MATHCAD по определению влияния факторов на уровень шумовой обстановки (общий уровень звукового давления во всем спектре частот) при измельчении ячменя

X := boxbehnken(3) =		0	1	2	3	4	Y6 :=	81.4
	0	"Run"	"Block"	"A"	"B"	"C"		87.6
	1	1	1	-1	-1	0		88.2
	2	2	1	1	-1	0		87.7
	3	3	1	-1	1	0		84.3
	4	4	1	1	1	0		86.1
	5	5	1	-1	0	-1		85.3
	6	6	1	1	0	-1		86.8
	7	7	1	-1	0	1		83.1
	8	8	1	1	0	1		88.6
	9	9	1	0	-1	-1		83.5
	10	10	1	0	1	-1		86.1
	11	11	1	0	-1	1		81.2
	12	12	1	0	1	1		81
	13	13	1	0	0	0		79.4
	14	14	1	0	0	0		
15	15	1	0	0	0			

polyfitc(X, Y6, 2) =		0	1	2	3	4	5	6	7
	0	"Term"	"Coefficient"	"Std Error"	"95% CI Low"	"95% CI High"	"VIF"	"T"	"p"
	1	"Intercept"	80.533	0.557	79.102	81.965	NaN	144.616	1.5·10 ⁻¹⁰
	2	"A"	1.125	0.341	0.248	2.002	1	3.299	0.011
	3	"B"	1.875	0.341	0.998	2.752	1	5.498	1.359·10 ⁻³
	4	"C"	-0.05	0.341	-0.927	0.827	1	-0.147	0.445
	5	"AB"	-1.675	0.482	-2.915	-0.435	1	-3.473	8.894·10 ⁻³
	6	"AC"	-0.075	0.482	-1.315	1.165	1	-0.156	0.441
	7	"BC"	-0.725	0.482	-1.965	0.515	1	-1.503	0.097
	8	"AA"	2.996	0.502	1.706	4.286	1.011	5.968	9.452·10 ⁻⁴
	9	"BB"	2.696	0.502	1.406	3.986	1.011	5.371	1.507·10 ⁻³
10	"CC"	2.096	0.502	0.806	3.386	1.011	4.175	4.347·10 ⁻³	

polyfitstat(X, Y6, 2) =		0	1
	0	"Regression Analysis"	"Value"
	1	"Standard Deviation"	0.965
	2	"R2"	0.962
	3	"Adjusted R2"	0.894
	4	"Predicted R2"	0.611
	5	"PRESS"	47.66
	6	"Durbin-Watson"	2.173
	7	"Coefficients"	[11, 8]
	8	"ANOVA"	[15, 6]
9	"Diagnostics"	[16, 9]	

$$Y6(X1, X2, X3) := 80.533 + 1.125 \cdot X1 + 1.875 \cdot X2 - 0.05 \cdot X3 - 1.675 \cdot X1 \cdot X2 - 0.075 \cdot X1 \cdot X3 - 0.725 \cdot X2 \cdot X3 + 2.996 \cdot (X1)^2 + 2.696 \cdot (X2)^2 + 2.096 \cdot (X3)^2$$

$$X1 := 0 \quad X2 := 0 \quad X3 := 0$$

Given

$$1 \geq X1 \geq -1 \quad 1 \geq X2 \geq -1 \quad 1 \geq X3 \geq -1$$

$$\text{Minimize}(Y6, X1, X2, X3) = \begin{pmatrix} -0.316 \\ -0.456 \\ -0.073 \end{pmatrix}$$

Приложение Б 13

Листинг результатов оптимизации и проверки решения процесса измельчения пшеницы в среде MATHCAD

ФУНКЦИЯ ЦЕЛИ

$$\Theta(X_1, X_2, X_3) := 5.357 - 0.59 \cdot X_1 - 1.162 \cdot X_2 - 0.103 \cdot X_3 + 0.572 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.264 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.58 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.192 \cdot (X_1)^2 + 0.902 \cdot (X_2)^2 + 1.191 \cdot (X_3)^2$$

ТОЧКИ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ

$$X_1 = 0 \quad X_2 = 0 \quad X_3 = 0$$

Given ОГРАНИЧЕНИЯ

модуль размола $0.2 \leq 1.131 + 0.038 \cdot X_1 + 0.106 \cdot X_2 - 0.233 \cdot X_3 - 0.03 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.012 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.013 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.016 \cdot (X_1)^2 + 0.024 \cdot (X_2)^2 + 0.046 \cdot (X_3)^2 \leq 1.2$

коэф вариации $0 \leq 28.663 - 1.167 \cdot X_1 - 2.729 \cdot X_2 + 5.561 \cdot X_3 + 1.152 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.557 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.9 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.429 \cdot (X_1)^2 - 0.052 \cdot (X_2)^2 - 0.097 \cdot (X_3)^2 \leq 50$

цел зерна $0.725 - 0.023 \cdot X_1 + 0.367 \cdot X_2 - 0.381 \cdot X_3 - 0.063 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.001 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.17 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.131 \cdot (X_1)^2 - 0.133 \cdot (X_2)^2 + 0.161 \cdot (X_3)^2 \leq 1$

шум $83.067 + 0.138 \cdot X_1 + 1.475 \cdot X_2 + 1.087 \cdot X_3 - 1.675 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.1 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1.075 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.667 \cdot (X_1)^2 + 1.542 \cdot (X_2)^2 + 1.067 \cdot (X_3)^2 \leq 85$

$$-1 \leq X_1 \leq 1$$

$$-1 \leq X_2 \leq 1$$

$$-1 \leq X_3 \leq 1$$

встроенная функция для
оптимизации

$$\text{opt}\Theta(X_1, X_2, X_3) := \text{Minimize}(\Theta, X_1, X_2, X_3)$$

$$\text{opt}\Theta(X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} 0.946 \\ 0.345 \\ 0.049 \end{pmatrix}$$

проверка ограничений

$$\underline{X}_1 := 0.949 \quad \underline{X}_2 := 0.345 \quad \underline{X}_3 := 0.049$$

$$1.131 + 0.038 \cdot X_1 + 0.106 \cdot X_2 - 0.233 \cdot X_3 - 0.03 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.012 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.013 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.016 \cdot (X_1)^2 + 0.024 \cdot (X_2)^2 + 0.046 \cdot (X_3)^2 = 1.2$$

$$28.663 - 1.167 \cdot X_1 - 2.729 \cdot X_2 + 5.561 \cdot X_3 + 1.152 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.557 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.9 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.429 \cdot (X_1)^2 - 0.052 \cdot (X_2)^2 - 0.097 \cdot (X_3)^2 = 26.83$$

$$0.725 - 0.023 \cdot X_1 + 0.367 \cdot X_2 - 0.381 \cdot X_3 - 0.063 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.001 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.17 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.131 \cdot (X_1)^2 - 0.133 \cdot (X_2)^2 + 0.161 \cdot (X_3)^2 = 0.654$$

$$14.63 - 0.20 \cdot X_1 + 1.60 \cdot X_2 + 5.35 \cdot X_3 - 0.325 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.525 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.325 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.196 \cdot (X_1)^2 + 1.196 \cdot (X_2)^2 + 1.846 \cdot (X_3)^2 = 15.441$$

$$83.067 + 0.138 \cdot X_1 + 1.475 \cdot X_2 + 1.087 \cdot X_3 - 1.675 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.1 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1.075 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.667 \cdot (X_1)^2 + 1.542 \cdot (X_2)^2 + 1.067 \cdot (X_3)^2 = 83.976$$

значение функции цели в оптимальной точке

$$\Theta(X_1, X_2, X_3) = 4.864$$

Приложение Б 14

Листинг результатов оптимизации и проверки решения процесса измельчения ячменя в среде MATHCAD

ФУНКЦИЯ ЦЕЛИ

$$\Xi(X1, X2, X3) = 7.574 - 1.924 \cdot X1 - 3.439 \cdot X2 + 2.191 \cdot X3 + 1.967 \cdot X1 \cdot X2 - 2.067 \cdot X1 \cdot X3 - 2.22 \cdot X2 \cdot X3 + 0.154 \cdot (X1)^2 + 1.639 \cdot (X2)^2 + 3.565 \cdot (X3)^2$$

ТОЧКИ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ

$$X1 := 0 \quad X2 := 0 \quad X3 := 0$$

Given ОГРАНИЧЕНИЯ

модуль размола $0.2 \leq 1.289 + 0.033 \cdot X1 + 0.088 \cdot X2 - 0.244 \cdot X3 - 0.017 \cdot X1 \cdot X2 - 0.021 \cdot X1 \cdot X3 - 0.03 \cdot X2 \cdot X3 + 0.015 \cdot (X1)^2 + 0.002 \cdot (X2)^2 + 0.096 \cdot (X3)^2 \leq 1.2$

коэф вариации $0 \leq 16.317 - 0.216 \cdot X1 - 0.859 \cdot X2 + 2.717 \cdot X3 - 0.037 \cdot X1 \cdot X2 + 0.145 \cdot X1 \cdot X3 + 0.04 \cdot X2 \cdot X3 - 0.365 \cdot (X1)^2 - 0.06 \cdot (X2)^2 - 0.512 \cdot (X3)^2 \leq 50$

цеп зерна $0.365 - 0.096 \cdot X1 + 0.056 \cdot X2 - 0.184 \cdot X3 + 0.111 \cdot X1 \cdot X2 + 0.073 \cdot X1 \cdot X3 - 0.037 \cdot X2 \cdot X3 + 0.053 \cdot (X1)^2 + 0.067 \cdot (X2)^2 + 0.027 \cdot (X3)^2 \leq 1$

шум $80.533 + 1.125 \cdot X1 + 1.875 \cdot X2 - 0.05 \cdot X3 - 1.675 \cdot X1 \cdot X2 - 0.075 \cdot X1 \cdot X3 - 0.725 \cdot X2 \cdot X3 + 2.996 \cdot (X1)^2 + 2.696 \cdot (X2)^2 + 2.096 \cdot (X3)^2 \leq 85$

$$-1 \leq X1 \leq 1$$

$$-1 \leq X2 \leq 1$$

$$-1 \leq X3 \leq 1$$

встроенная функция для
оптимизации

$$\text{opt}\Xi(X1, X2, X3) = \text{Minimize}(\Xi, X1, X2, X3)$$

$$\text{opt}\Xi(X1, X2, X3) = \begin{pmatrix} 0.865 \\ 0.267 \\ 0.749 \end{pmatrix}$$

проверка ограничений

$$\underline{X1} := 0.865 \quad \underline{X2} := 0.267 \quad \underline{X3} := 0.749$$

$$1.289 + 0.033 \cdot X1 + 0.088 \cdot X2 - 0.244 \cdot X3 - 0.017 \cdot X1 \cdot X2 - 0.021 \cdot X1 \cdot X3 - 0.03 \cdot X2 \cdot X3 + 0.015 \cdot (X1)^2 + 0.002 \cdot (X2)^2 + 0.096 \cdot (X3)^2 = 1.2$$

$$16.317 - 0.216 \cdot X1 - 0.859 \cdot X2 + 2.717 \cdot X3 - 0.037 \cdot X1 \cdot X2 + 0.145 \cdot X1 \cdot X3 + 0.04 \cdot X2 \cdot X3 - 0.365 \cdot (X1)^2 - 0.06 \cdot (X2)^2 - 0.512 \cdot (X3)^2 = 17.465$$

$$0.365 - 0.096 \cdot X1 + 0.056 \cdot X2 - 0.184 \cdot X3 + 0.111 \cdot X1 \cdot X2 + 0.073 \cdot X1 \cdot X3 - 0.037 \cdot X2 \cdot X3 + 0.053 \cdot (X1)^2 + 0.067 \cdot (X2)^2 + 0.027 \cdot (X3)^2 = 0.284$$

$$12.367 - 0.15 \cdot X1 + 0.588 \cdot X2 + 3.813 \cdot X3 - 0.2 \cdot X1 \cdot X2 - 0.85 \cdot X1 \cdot X3 - 0.775 \cdot X2 \cdot X3 + 1.104 \cdot (X1)^2 + 1.179 \cdot (X2)^2 + 2.129 \cdot (X3)^2 = 16.603$$

$$80.533 + 1.125 \cdot X1 + 1.875 \cdot X2 - 0.05 \cdot X3 - 1.675 \cdot X1 \cdot X2 - 0.075 \cdot X1 \cdot X3 - 0.725 \cdot X2 \cdot X3 + 2.996 \cdot (X1)^2 + 2.696 \cdot (X2)^2 + 2.096 \cdot (X3)^2 = 84.999$$

значение функции цели в оптимальной точке

$$\Xi(X1, X2, X3) = 7.536$$

Приложение В 1 к работе (Патент на изобретение)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2746586

Молотковая дробилка

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Алтайский государственный аграрный университет" (ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ) (RU)*

Авторы: *Федоренко Иван Ярославович (RU), Бесподенов Роман Викторович (RU)*

Заявка № 2020130348

Приоритет изобретения 14 сентября 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 16 апреля 2021 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 14 сентября 2040 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



Приложение В 2 к работе (Описание полезной модели к патенту)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(19) **RU** (11)**219 913**⁽¹³⁾ **U1**(51) МПК
B02C 13/04 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B02C 13/04 (2023.05)

(21)(22) Заявка: 2023110433, 21.04.2023

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
21.04.2023

Дата регистрации:
14.08.2023

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 21.04.2023

(45) Опубликовано: 14.08.2023 Бюл. № 23

Адрес для переписки:
658700, Алтайский край, Каменский р-н, г.
Камень-на-Оби, ул. Колесникова, 91, кв. 2,
Генеральному директору Бесплодену Роману
Викторовичу

(72) Автор(ы):
Бесплоден Роман Викторович (RU),
Федоренко Иван Ярославович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Общество с ограниченной ответственностью
"Агротехноваци" (ООО "Агротехноваци")
(RU),
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Алтайский государственный
аграрный университет" (ФГБОУ ВО
Алтайский ГАУ) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 96343 U1, 27.07.2010. RU 2621567
C1, 06.06.2017. RU 2415715 C1, 10.04.2011. KR
100896346 B1, 07.05.2009.

(54) Устройство для измельчения зерновых кормов
(57) Реферат:

Устройство для измельчения зерновых кормов относится к устройствам для измельчения и может быть использовано для переработки сельскохозяйственных компонентов, зерновых и зернобобовых культур на корм животным. Устройство состоит из рамы с размещенными на ней дробилкой, приводом молоткового ротора, бункером для зерновых кормов, с тремя парами, основной и дополнительными, разнонаправленных загрузочных шнеков, расположенных в горизонтальной плоскости симметрии ротора, проходящей через его ось вращения. В корпусе дробилки, в камере измельчения, размещены деки, сита и горизонтально расположенный молотковый ротор. Устройство дополнительно содержит

конический редуктор с ведомым валом на две стороны, дополнительные пары разнонаправленных загрузочных шнеков, которые установлены параллельно основной паре разнонаправленных шнеков. Привод дополнительных и основных разнонаправленных загрузочных шнеков выполнен от приводного вала молоткового ротора. Привод ротора содержит дополнительный вал, установленный за опорами основного вала, который соединен с коническим редуктором. На ведомых валах конического редуктора размещены трехручьевые шкивы, соединенные ременной передачей с приводными шкивами разнонаправленных загрузочных шнеков.

RU 219913 U1

RU 219913 U1

Приложение № Г 1 к работе (Протокол испытаний зернодробилки)

Испытательная лаборатория «Гранум»
 Аттестат РОСС RU.31578.04ОЛН0.ИЛЗ 1
 Срок действия с 18.04.2023 года по 17.04.2026 года
 Адрес: 141802, Россия, Московская область, город Дмитров, улица Бирлово Поле, 21



ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 001/В-17/08/23 от 17.08.2023 года

Заказчик испытаний, адрес заказчика ¹	Общество с ограниченной ответственностью «АгроТехНовации». Адрес: 658700, РОССИЯ, Алтайский край, м.р-н Каменский, г. Камень-на-Оби, ул. Колесникова, 91-2
Наименование объекта испытаний ¹	Дробилка молотковая с оппозитной загрузкой для измельчения зерна «ДМОЗИЗ», модель ДМОЗИЗ-200
Изготовитель ¹	Общество с ограниченной ответственностью «АгроТехНовации». Адрес: 658700, РОССИЯ, Алтайский край, м.р-н Каменский, г. Камень-на-Оби, ул. Колесникова, 91-2
План (метод) отбора образцов ¹	Отбор образцов произведен в соответствии с ГОСТ Р 58972-2020, акт отбора образцов № 001/В-17/08/23
Идентификационный номер образца	№ 001/В-17/08/23
Испытания проведены на соответствие требованиям	ТУ 28.30.83-001-95965384-2023 Дробилка молотковая с оппозитной загрузкой для измельчения зерна «ДМОЗИЗ». Технические условия

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Инженер-испытатель: Н.И. Назаров

При лабораторных испытаниях дробилка молотковая с оппозитной загрузкой для измельчения зерна «ДМОЗИЗ», модель ДМОЗИЗ-200 показала следующие результаты при измельчении пшеницы обыкновенной, с учетом выбранных следующих режимных параметров:

1) Направление вращения ротора - слева направо, при двухстороннем открытии шиберных заслонках в соотношении:

- при площади сечения левого отверстия горловины – 0,475 м²;
- при площади сечения правого отверстия горловины – 0,265 м²;
- при значении угловой скорости – 471,358 рад/сек,
- Значения величин в процессе лабораторных испытаний составили:
- модуль размола – 1,219 мм;
- коэффициент вариации модуля размола – 26,354 %;
- относительное (по массе) количество целых зерен– 0,614%;
- уровень звука –82,06 дБА;
- виброускорение– 12,752 м/с²;
- производительность – 89,388 кг/ч;
- затраты энергии на измельчение (энергоёмкость) – 6,725кВт·т/ч.л.

2) Направление вращения ротора - слева направо, при односторонней подаче материала (при закрытой левой шиберной заслонке)

- при площади сечения левого отверстия горловины – 0,00 м²;
- при площади сечения правого отверстия горловины – 0,53 м²;

¹ Информация представлена заказчиком

Испытательная лаборатория «Гранум»

Аттестат РОСС RU.31578.04ОЛН0.ИЛЗ1

Срок действия с 18.04.2023 года по 17.04.2026 года

Адрес: 141802, Россия, Московская область, город Дмитров, улица Бирлово Поле, 21

при значении угловой скорости – 471,358 рад/сек,
 Значения величин в процессе лабораторных испытаний составили:
 -модуль размола – 1,168 мм;
 -коэффициент вариации модуля размола – 27,828 %;
 -относительное (по массе) количество целых зерен – 0,768%;
 -уровень звука – 83,038дБА;
 -виброускорение – 13,887 м/с²;
 -производительность – 65,087 кг/ч;
 -затраты энергии на измельчение (энергоёмкость) – 7,568 кВт·т/ч·λ.

3) Направление вращения ротора - слева направо, при односторонней загрузке материала (закрытой правой шиберной заслонки)

при значении угловой скорости – 471,358 рад/сек ;
 при площади сечения левого отверстия горловины – 1,025 м²;
 при площади сечения правого отверстия горловины – 0,00 м²;
 Значения величин в процессе лабораторных испытаний составили:
 -модуль размола – 1,405 мм;
 -коэффициент вариации модуля размола – 20,303 %;
 -относительное (по массе) количество целых зерен – 0,857%;
 -уровень звука – 84,182 дБА;
 -виброускорение – 14,365 м/с²;
 -производительность – 147,381 кг/ч;
 -затраты энергии на измельчение (энергоёмкость) – 8,149 кВт·т/ч·λ.

Примечания:

1. Протокол испытаний распространяется только на образцы, прошедшие испытания. Результаты испытаний относятся к предоставленным Заказчиком образцам.
2. Протокол испытаний не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения испытательной лаборатории.
3. Методики проведения испытаний включены в Перечень стандартов, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения требований технических регламентов.

 ОКОНЧАНИЕ ПРОТОКОЛА ИСПЫТАНИЙ

Приложение № Г2 к работе (Протокол испытаний зернодробилки)

Испытательная лаборатория «ОНИКС»
Общества с ограниченной ответственностью «Открытый Сертификат»
(ИЛ «ОНИКС»)

Россия, 119311 г. Москва, проспект Вернадского, дом 15, комната 1
Телефон: +7 (499) 709 89 27
Email: ilns@ocert.ru

Свидетельство (Аттестат аккредитации) № ОНПС RU.04ОПС0.ИЛ02 от 3.06.2019,
выдан СДС «ОНПС» (зарегистрирована в едином реестре СДС за № РОСС
RU.32069.04ОПС0 от 29.03.2019 года)



УТВЕРЖДАЮ
Начальник ИЛ «ОНИКС»
Раздельнов В.А.
21.08.2023

ПРОТОКОЛ КОНТРОЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ № 91470.210823

<i>Объект испытаний:</i>	Дробилка молотковая с оппозитной загрузкой для измельчения зерна «ДМОЗИЗ», модель ДМОЗИЗ-200У
<i>Изготовитель:</i>	Общество с ограниченной ответственностью «АгроТехНовации»
<i>Место нахождения:</i>	658700, Россия, Алтайский край, муниципальный район Каменский, городское поселение Камень-на-Оби, улица Колесникова, дом 91, квартира 2
<i>Адрес места осуществления деятельности:</i>	658700, Россия, Алтайский край, муниципальный район Каменский, городское поселение Камень-на-Оби, улица Нижегородская, дом 54
<i>Заказчик:</i>	Совпадает с изготовителем

Перепечатка или размножение протокола без письменного разрешения испытательной лаборатории не допускается.
Протокол испытаний распространяется только на образцы, подвергнутые испытаниям.

Приложение № Г2 к работе (Протокол испытаний зернодробилки)

ПИ № 91470.210823 от 21 августа 2023 года

ИЛ «ОНИКС»

Цель испытаний: подтверждение на соответствие требованиям ТР ТС 004/2011 "О безопасности низковольтного оборудования", ТР ТС 010/2011 "О безопасности машин и оборудования", ТР ТС 020/2011 "Электромагнитная совместимость технических средств" (в том числе ГОСТ 12.2.003-91, ГОСТ 12.2.007.0-75, ГОСТ 30804.6.2-2013, ГОСТ 30804.6.4-2013)

Сведения об акте отбора образцов (проб): № 9147 от 07 августа 2023 года

Условия окружающей среды: температура (20...22)⁰С, влажность (46...48)%, давление (744-746) мм. рт. ст.

Условные обозначения в протоколе:

НС – не соответствует

С – соответствует

НП – требования не применяются к испытываемому объекту

Результаты испытаний:

Приложение № Г2 к работе (Протокол испытаний зернодробилки)

ПИ № 91470.210823 от 21 августа 2023 года

ИЛ «ОНИКС»

ГОСТ 12.2.007.0-75

Наименование	ИД на метод испытаний	Значение характеристики по ИД	Результат испытаний
3. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ К ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМУ ИЗДЕЛИЮ И ЕГО ЧАСТЯМ			
п.3.1 Общие требования	ГОСТ 12.2.007.0-75, ГОСТ 12.1.003-83, ГОСТ 12.1.012-90	3.1.1. В конструкции электротехнических изделий должны быть предусмотрены средства шумо- и виброзащиты, обеспечивающие уровни шума и вибрации на рабочих местах в соответствии с утвержденными санитарными нормами. Допустимые значения шумовых и вибрационных характеристик электротехнических изделий должны быть установлены в стандартах и технических условиях на изделия конкретных видов и не должны превышать значений, указанных в ГОСТ 12.1.003-83, ГОСТ 12.1.012-90.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.1.2. Изделия, которые создают электромагнитные поля, должны иметь защитные элементы (экраны, пологители и т.п.) для ограничения воздействия этих полей в рабочей зоне до допустимых уровней. Требования к этим защитным элементам должны быть указаны в стандартах и технических условиях на конкретные виды изделий. Допускается для ограничения воздействия электромагнитного поля использовать защитные элементы, не входящие в состав изделия.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.1.3. Изделия, являющиеся источником теплового, оптического, рентгеновского излучения, а также ультразвука, должны быть оборудованы средствами для ограничения интенсивности этих излучений и ультразвука до допустимых значений. Требования к средствам, ограничивающим интенсивность излучений и ультразвука, а также допустимая температура нагрева поверхности внешней оболочки изделия, должны указываться в стандартах и технических условиях на конкретные виды изделий. Допускается для ограничения воздействия излучений использовать защитные элементы, не входящие в состав изделия.	НП
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.1.4. Требования о наличии в конструкции изделия элементов, предназначенных для защиты от случайного прикосновения к движущимся, токоведущим, нагревающимся частям изделия, и элементов для защиты от опасных и вредных материалов конструкции и веществ, выделяющихся при эксплуатации, а также требования к этим защитным элементам, должны указываться в стандартах и технических условиях на конкретные виды изделий.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.1.5. Электрическая схема изделия должна исключать возможность его самопроизвольного включения и отключения.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.1.4(б). Расположение и соединение частей изделия должны быть выполнены с учетом удобства и безопасности наблюдения за изделием при выполнении сборочных работ, проведении осмотра, испытаний и обслуживания. При необходимости изделия должны быть оборудованы смотровыми окнами, люками и средствами местного освещения. Требования к смотровым окнам, люкам и средствам местного освещения должны указываться в стандартах и технических условиях на конкретные виды изделий.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.1.7. Конструкция изделия должна исключать возможность неправильного присоединения его соединяемых токоведущих частей при монтаже изделий у потребителя. Конструкция штепсельных розеток и вилок для напряжений выше 42 В должна отличаться от конструкции розеток и вилок для напряжений 42 В и менее.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75, ГОСТ Р 12.4.026-2001	3.1.8. При необходимости изделия должны быть оборудованы сигнализацией, надписями и табличками. Для осуществления соединения при помощи розетки вилки к розетке должен подключаться источник энергии, а к вилке - ее приемник. Предупредительные сигналы, надписи и таблички должны применяться для указания на: включенное состояние изделия, наличие напряжения, пробой изоляции, режим работы изделия, запрет доступа внутрь изделия без принятия соответствующих мер, повышение температуры отдельных частей изделия выше допустимых значений, действие аппаратов защиты и т.п. Знаки, используемые при выполнении предупредительных табличек и сигнализации, должны выполняться по ГОСТ Р 12.4.026-2001 и размещаться на изделиях в местах, удобных для обзора.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75, ГОСТ 4751-73	3.1.9. Изделия и их составные части массой более 20 кг или имеющие большие габаритные размеры должны иметь устройства для подъема, опускания и удержания на весу при монтажных и такелажных работах. Форма, размеры и грузоподъемность устройств для подъема - по ГОСТ 4751-73 или ГОСТ 13716-73. Допускается использовать другие	С

Приложение № Г2 к работе (Протокол испытаний зернодробилки)

ПИ № 91470.210823 от 21 августа 2023 года

ИЛ «ОНИКС»

		устройства для подъема, обеспечивающие безопасное проведение	
		монтажных и такелажных работ.	
	ГОСТ 12.2.007.0-75, ГОСТ 12.1.044-89, ГОСТ 8865-93, ГОСТ 12.1.004-91, ГОСТ 12.1.044-89	<p>3.1.10. Пожарная безопасность изделия и его элементов должна обеспечиваться как в нормальном, так и в аварийном режимах работы. Снижение пожарной опасности электротехнических изделий и их частей достигается:</p> <p>исключением использования в конструкции изделий легко воспламеняющихся материалов в соответствии с ГОСТ 12.1.044-89. Пожарная безопасность изделия и его элементов должна обеспечиваться и в нормальном, и в аварийном режимах работы (короткое замыкание, перегрузка, плохой контакт и др.); ограничением массы горючих материалов, а также заменой на более нагревостойкие по ГОСТ 8865-93;</p> <p>ограничением проникновения горючих материалов (веществ) внутрь пожароопасных узлов электротехнических изделий;</p> <p>применением конструкции изделий, обеспечивающих предотвращение выброса раскаленных и (или) горящих частиц;</p> <p>введением в конструкцию изделий и в установки, в которых используются изделия, средств и элементов электротехнической защиты, снижающих вероятность возникновения пожара, в соответствии с нормативами, установленными ГОСТ 12.1.004-91;</p> <p>предпочтительным применением изделий с меньшим количеством на полное последовательных контактных точек, способных стать местом образования плохого контакта;</p> <p>доведением величины переходных сопротивлений в контактных соединениях до уровня, установленного стандартами на конкретные изделия;</p> <p>исключением применения изделий, способных выделять токсичные продукты горения в количествах, представляющих опасность для жизни и здоровья людей;</p> <p>ограничением температуры возможных источников зажигания и выбором режима работы электротехнических изделий;</p> <p>обеспечиванием условия пожаро-взрывобезопасности веществ и материалов в соответствии с ГОСТ 12.1.044-89;</p> <p>применением средств и (или) элементов, предназначенных для автоматического отключения изделия в аварийном режиме работы (перегрузка, перегрев, короткое замыкание и др.) и исключаяющих возгорание частей изделий, выполненных из электроизоляционных материалов.</p>	С
п.3.2. Требования к изоляции	ГОСТ 12.2.007.0-75	<p>3.2.1. Выбор изоляции изделия и его частей следует определять классом нагревостойкости, уровнем напряжения электрической сети, а также значениями климатических факторов внешней среды. Значение электрической прочности изоляции и значение ее сопротивления должны указываться в стандартах и технических условиях на конкретные виды изделий.</p> <p>Допускается для изделий, работающих при напряжении не выше 12 В переменного тока и 36 В постоянного тока, не приводить в указанных документах значения электрической прочности изоляции и ее сопротивления.</p>	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	<p>3.2.2. Изоляция частей изделия, доступных для прикосновения, должна обеспечивать защиту человека от поражения электрическим током. Покрытие токоведущих частей изделий лаком, эмалью или аналогичными материалами не является достаточным для защиты от поражения при непосредственном прикосновении к этим частям и для защиты от переброса электрической дуги от токоведущих частей изделия на другие металлические части (кроме тех случаев, когда применяемые для покрытия материалы специально предназначены для создания такой защиты).</p>	С
п.3.3. Требования к защитному заземлению	ГОСТ 12.2.007.0-75	<p>3.3.1. Элементом для заземления должны быть оборудованы изделия, назначение которых не требует осуществления способа защиты человека от поражения электрическим током, соответствующего классам II и III.</p> <p>Допускается при этом выполнять без элемента заземления и не заземлять следующие изделия:</p> <p>предназначенные для установки в недоступных, без применения специальных средств, местах (в том числе - внутри других изделий);</p> <p>предназначенные для установки только на заземленных металлических конструкциях, если при этом обеспечивается стабильный электрический контакт соприкасающихся поверхностей и выполнения требования п.3.3.7;</p> <p>части которых не могут находиться под переменным напряжением выше 42 В и под постоянным напряжением выше 110 В;</p> <p>заземление которых не допускается принципом действия или назначением изделия.</p>	С

Приложение № Г2 к работе (Протокол испытаний зернодробилки)

ПИ № 91470.210823 от 21 августа 2023 года

ИЛ «ОНИКС»

ГОСТ 12.2.007.0-75	3.3.2. Для присоединения заземляющего проводника должны применяться сварные или резьбовые соединения. По согласованию с потребителем заземляющий проводник может присоединяться к изделию при помощи пайки или опрессовки, выполняемого специальным инструментом, приспособленным или станком.	С
ГОСТ 12.2.007.0-75	3.3.3. Заземляющие зажимы должны соответствовать требованиям ГОСТ 21130-75. Не допускается использование для заземления болтов, винтов, шпилек, выполняющих роль крепежных деталей.	С
ГОСТ 12.2.007.0-75	3.3.4. Болт (винт, шпилька) для присоединения заземляющего проводника должен быть выполнен из металла, стойкого к отношению коррозии, или покрыт металлом, предохраняющим его от коррозии, и контактная часть не должна иметь поверхностной окраски.	С
ГОСТ 12.2.007.0-75, ГОСТ 21130-75	3.3.5. Болт (винт, шпилька) для заземления должен быть размещен на изделии в безопасном и удобном для подключения заземляющего проводника месте. Возле места, в котором должно быть осуществлено присоединение заземляющего проводника, предусмотренного п.3.3.2, должен быть помещен нанесенный любым способом нестираемый при эксплуатации знак заземления. Размеры знака и способ его выполнения - по ГОСТ 21130-75, а для светильников - по ГОСТ Р 54350-2011. Вокруг болта (винта, шпильки) должна быть контактная площадка для присоединения заземляющего проводника. Площадка должна быть защищена от коррозии или изготовлена из антикоррозийного металла и не иметь поверхностной окраски. Должны быть приняты меры против возможного ослабления контактов между заземляющим проводником и болтом (винтом, шпилькой) для заземления (контргайками, пружинными шайбами). Диаметры болта (винта, шпильки) и контактной площадки должны выбираться по току (см. табл.1).	С
ГОСТ 12.2.007.0-75	3.3.6. В случае, если размеры изделия малы, а также если болт (винт) заземления установлен при помощи приварки его головки, допускается необходимую поверхность соприкосновения в соединении с заземляющим проводником обеспечивать при помощи шайб. Материал шайб должен соответствовать тем же требованиям, что и материал заземляющего болта (винта, шпильки).	ПП
ГОСТ 12.2.007.0-75	3.3.7. В изделии должно быть обеспечено электрическое соединение всех доступных присоединению металлических нетокопроводящих частей изделия, которые могут оказаться под напряжением, с элементами для заземления. Значение сопротивления между заземляющим болтом (винтом, шпилькой) и каждой доступной присоединению металлической нетокопроводящей частью изделия, которая может оказаться под напряжением, не должно превышать 0,1 Ом.	С
ГОСТ 12.2.007.0-75	3.3.8. Элементами для заземления должны быть оборудованы следующие металлические нетокопроводящие части изделий, подлежащих заземлению: оболочки, корпуса, шкафы; каркасы, рамы, обоймы, стойки, шасси, основания, панели, плиты и другие части изделий, которые могут оказаться под напряжением при повреждении изоляции. Допускается не выполнять элементы для заземления у следующих частей изделия (из числа перечисленных выше): корпусов изделий, предназначенных для установки на заземленных цитах, металлических стенах камер распределительных устройств, в шкафах; не токопроводящих металлических частей изделия, имеющих электрический контакт с заземленными частями, при условии выполнения требований п.3.3.7; частей, закрепленных в изоляционном материале или проходящих сквозь него и изолированных как от заземленных, так и от находящихся под напряжением частей (при условии, что при работе изделия они не могут оказаться под напряжением или соприкасаться с заземленными частями).	С
ГОСТ 12.2.007.0-75	3.3.9. Каждая часть изделия, оборудованная элементом для заземления, должна быть выполнена так, чтобы была возможность ее независимого присоединения к заземлителю или заземляющей магистрали посредством отдельного ответвления, чтобы при снятии какой-либо заземленной части изделия (например, для текущего ремонта) цепи заземления других частей не прерывались; не возникла необходимость в последовательном соединении нескольких заземляемых частей изделия.	С
ГОСТ 12.2.007.0-75	3.3.10. Заземление частей изделий, установленных на движущихся частях, должно выполняться гибкими проводниками или скользящими контактами.	ПП
ГОСТ 12.2.007.0-75	3.3.11. При наличии металлической оболочки элемент для ее заземления должен быть расположен внутри оболочки.	С

Приложение № Г2 к работе (Протокол испытаний зернодробилки)

ПИ № 91470.210823 от 21 августа 2023 года

ИЛ «ОНИКС»

		Допускается выполнять его снаружи оболочки или выполнять несколько элементов как внутри, так и снаружи оболочки.	
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.3.12. Получение электрического контакта между съемной и заземленной (несъемной) частями оболочки должно осуществляться непосредственным прижатием съемной части к несъемной; при этом в местах контактирования поверхности съемной и несъемной частей оболочки должны быть защищены от коррозии и не покрыты электроизолирующими слоями лака, краски или эмали. Допускается электрическое соединение съемной части оболочки с несъемной заземленной осуществлять через крепежные ее винты или болты при условии, что 1-2 винта или болта имеют противокоррозионное металлическое покрытие, а между головками этих винтов или болтов и съемной металлической частью оболочки нет электроизолирующего слоя лака, краски, эмали или между ними установлены зубчатые шайбы, разрушающие электроизолирующий слой для осуществления электрического соединения или без зубчатых шайб при условии крепления съемной части к несъемной заземленной шестью и более болтами (или винтами) и отсутствия на съемных частях электрических устройств. Допускается применять зубчатые шайбы также для электрического соединения заземленной оболочки и аппаратуры, монтируемой в изделии, и устанавливать их для заземления элементов изделия через болтовые соединения.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75, ГОСТ 15151-69, ГОСТ 9.048-89	3.3.13. Перечисленные в п.3.3 требования не относятся к изделиям, предназначенным для эксплуатации только в районах с тропическим климатом и выполненным по ГОСТ 15151-69, ГОСТ 9.048-89.	НП
п.3.4. Требования к органам управления	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.4.1. Органы управления должны снабжаться надписями или символами, указывающими управляемый объект, к которому они относятся, его назначение и состояние ("включено", "отключено", "ход", "тормоз" и т.п.), соответствующее данному положению органа управления, и (или) дающими другую необходимую для конкретного случая информацию.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.4.2. При автоматическом режиме работы изделия кнопки для наладки и органы ручного управления, кроме органов аварийного отключения, должны быть отключены, за исключением случаев, обусловленных технологической необходимостью.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.4.3. Пользование органами ручного управления и регулировки в последовательности, отличной от установленной, не должно приводить к возникновению опасных ситуаций или должно быть исключено введением блокировки. У изделий, имеющих несколько органов управления для осуществления одной и той же операции с разных постов (например, для дистанционного управления и для управления непосредственно на рабочем месте), должна быть исключена возможность одновременного осуществления управления с различных постов. Кнопки аварийного отключения должны выполняться без указанной блокировки.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.4.4. В изделиях, имеющих несколько кнопок аварийного отключения, из-за большой протяженности или ограниченности обзора, должны быть применены кнопки с фиксацией, которые после их нажатия не возвращаются в первоначальное состояние до тех пор, пока не будут принудительно приведены в это состояние. Допускается применять кнопки без принудительного возврата для случая их воздействия на силовые элементы, которые позволяют подать напряжение только после снятия ручной блокировки.	НП
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.4.5. Органы управления, имеющие фиксацию в установленном положении, должны снабжаться указателем (в отдельных случаях и шкалой), показывающим положение и необходимое направление перемещения органа управления.	НП
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.4.6. Металлические валы ручных приводов, рукоятки, маховички, педали должны быть изолированы от частей изделия, находящихся под напряжением, и иметь электрический контакт с несъемными частями изделия, на которых расположен элемент для заземления. При этом должно выполняться требование п.3.3.7.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.4.7. Температура на поверхности органов управления, предназначенных для выполнения операций без применения средств индивидуальной защиты рук, а также для выполнения операций в аварийных ситуациях во всех случаях, не должна превышать 40 °С для органов управления, выполненных из металла, и 45 °С - для выполненных из материалов с низкой теплопроводностью. Для оборудования, внутри которого температура равна или ниже 100 °С, температура на поверхности не должна превышать 35 °С. При невозможности по техническим причинам достигнуть указанных температур должны быть предусмотрены мероприятия по защите работающих от возможного перегревания.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.4.8. Орган управления, которым осуществляется останов (отключение), должен быть выполнен из материала красного цвета.	С

Приложение № Г2 к работе (Протокол испытаний зернодробилки)

ПИ № 91470.210823 от 21 августа 2023 года

ИЛ «ОНИКС»

		<p>Орган управления, которым осуществляется пуск (выключение), должен иметь ахроматическую расцветку (черную, серую или белую). Допускается выполнять этот орган зеленого цвета.</p> <p>Орган управления, которым может быть попеременно вызван останов или пуск изделия, должен быть выполнен только ахроматического цвета. Рукоятки автоматических выключателей допускается выполнять желто-коричневого цвета.</p> <p>Орган управления, которым осуществляется воздействие, предотвращающее аварийно изделия, должен быть выполнен желтого цвета.</p> <p>Орган управления, которым осуществляются операции, отличные от перечисленных выше, должен быть выполнен ахроматического или синего цвета.</p>	
	ГОСТ 12.2.007.0-75	<p>3.4.9. Кнопка аварийного отключения должна выполняться увеличенного, по сравнению с другими кнопками, размера. Кнопка "Пуск" должна быть утоплена не менее чем на 3 мм или иметь фронтальное кольцо.</p> <p>Допускается выполнять не утопленными и без фронтального кольца кнопки, имеющие свободный ход не менее 4 мм или не вызывающие опасных воздействий при случайном нажатии.</p>	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	<p>3.4.10. Для расположения органов управления, предназначенных для использования более трех раз в течение рабочей смены, следует использовать зоны:</p> <p>1000-1400 мм от уровня пола (рабочей площадки) при управлении изделием стоя;</p> <p>600-1000 мм при управлении изделием сидя.</p>	НП
	ГОСТ 12.2.007.0-75	<p>3.4.11. Для расположения органов управления, предназначенных для использования не более трех раз в течение рабочей смены, следует использовать зоны:</p> <p>1000-1600 мм от уровня пола (рабочей площадки) при управлении изделием стоя;</p> <p>600-1200 мм при управлении изделием сидя.</p>	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	<p>3.4.12. Для органов управления, предназначенных для осуществления плавной регулировки, необходимо, при работе стоя, использовать зону 1200-1400 мм от уровня пола (рабочей площадки), а при работе сидя - 800-1000 мм.</p>	НП
	ГОСТ 12.2.007.0-75	<p>3.4.13. Установку измерительных приборов, отчет по которым необходимо производить в течение всей рабочей смены, следует выполнять таким образом, чтобы шкала каждого из приборов находилась на высоте от пола (рабочей площадки):</p> <p>1000-1800 мм - при работе стоя;</p> <p>800-1300 мм - при работе сидя.</p>	НП
	ГОСТ 12.2.007.0-75	<p>3.4.14. Установку измерительных приборов, по которым необходимо производить точные отчеты, следует производить таким образом, чтобы шкала каждого из приборов находилась на высоте от пола (рабочей площадки):</p> <p>1200-1600 мм - при работе стоя;</p> <p>800-1200 мм - при работе сидя.</p> <p>Размеры, указанные в пп.3.4.10-3.4.14, допускается принимать иными в зависимости от назначения изделия и условий его эксплуатации. В этом случае эти размеры должны указываться в стандартах или технических условиях на конкретные виды изделий.</p>	НП
	ГОСТ 12.2.007.0-75	<p>3.4.15. Усилие нажатия на рукоятки, микровыключатели, кнопки и педали не должны превосходить значений, приведенных в табл.2.</p>	С
п.3.5. Требования к блокировке	ГОСТ 12.2.007.0-75	<p>3.5.1. При выполнении блокировки должна быть исключена возможность ее ложного срабатывания.</p>	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	<p>3.5.2. Блокировка изделий, предназначенных для установки в помещениях, входы в которые не снабжены в свою очередь блокировкой, и имеющих удерживающие электромагниты или извешенные пружины, должна быть выполнена таким образом, чтобы исключалась опасность, связанная с перемещением частей изделия вследствие случайного снятия или подачи напряжения в цепи управления.</p>	НП
	ГОСТ 12.2.007.0-75	<p>3.5.3. По согласованию с потребителем взамен блокировок, устройство которых существенно усложняет обслуживание электротехнических изделий, допускается применять другие меры, обеспечивающие безопасность их обслуживания.</p>	НП
п.3.6. Требования к оболочкам	ГОСТ 12.2.007.0-75	<p>3.6.1. Оболочки должны соединяться с основными частями изделий в единую конструкцию, закрывать опасную зону и сниматься только при помощи инструмента.</p> <p>Не допускается, чтобы винты (болты) для крепления токоведущих и движущихся частей изделия и для крепления его оболочки были общими.</p>	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	<p>3.6.2. При необходимости оболочки должны иметь рукоятки, скобы и другие устройства для удобного и безопасного удерживания их при</p>	НП

Приложение № Г2 к работе (Протокол испытаний зернодробилки)

ПИ № 91470.210823 от 21 августа 2023 года

ИЛ «ОНИКС»

		сьеме или установке. Требования к этим устройствам и необходимость их установки должны быть указаны в стандартах и технических условиях на конкретные виды изделий.	
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.6.3. При открывании и закрывании дверей и люков оболочки должна исключаться возможность их прикосновения (или приближения на недопустимое расстояние) к движущимся частям изделия или к частям, находящимся под напряжением.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75, ГОСТ 14254-96	3.6.4. Степень защиты от прикосновения к токоведущим и движущимся частям при помощи оболочек должна соответствовать ГОСТ 14254-96 и указываться в стандартах и технических условиях на конкретные виды изделий.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.6.5. Оболочки в нормальном и в аварийном режимах работы должны сохранять защитные свойства, соответствующие их маркировке или указанные в документации на изделие.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.6.6. Оболочки изделий, содержащих контактные соединения, не следует изготовлять из термопластичных материалов.	С
п.3.7. Требования к зажимам и вводным устройствам	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.7.1. Ввод проводов в корпуса, коробки выводов, щитки и другие устройства следует осуществлять через изоляционные детали. При этом должна исключаться возможность повреждения проводов и их изоляции в процессе монтажа и эксплуатации изделия. Должно быть предотвращено расщепление многожильных проводов на отдельные жилы. При применении проводов с оплеткой должно быть предотвращено ее расщепление.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.7.2. Конструкция и материал вводных устройств должны исключать возможность случайного прикосновения к токоведущим частям, электрических перекрытий, а также замыкания проводников на корпус и накоротко.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.7.3. Внутри вводного устройства должно быть предусмотрено достаточно места для безопасного доступа к его элементам (контактам, проводникам, зажимам и т.п.) и для осуществления ввода и разделки проводов.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.7.4. Винтовые контактные соединения не должны являться источниками зажигания в режиме "тлеющего" контакта.	С
п.3.8. Требования к предупредительной сигнализации, надписям и табличкам	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.8.1. Сигнализация должна быть выполнена световой или звуковой. Световая сигнализация может быть осуществлена как с помощью непрерывно горящих, так и мигающих огней.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.8.2. Для световых сигналов должны применяться следующие цвета: красный - для запрещающих и аварийных сигналов, а также для предупреждения о перегрузках, неправильных действиях, опасности и о состоянии, требующем немедленного вмешательства (при пожаре и т.п.); желтый - для привлечения внимания (предупреждения о достижении предельных значений, о переходе на автоматическую работу и т.п.); зеленый - для сигнализации безопасности (нормального режима работы изделия, разрешения на начале действия и т.п.); белый - для обозначения включенного состояния выключателя, когда нерационально применение красного, желтого и зеленого цветов; синий - для применения в специальных случаях, когда не могут быть применены красный, желтый, зеленый и белый цвета.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.8.3. Сигнальные лампы и другие светосигнальные аппараты должны иметь знаки или надписи, указывающие значение сигналов (например, "Включено", "Отключено", "Нагрев").	С
п.3.9. Требования к маркировке и различительной окраске	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.9.1. Штепсельные разъемы должны иметь маркировку, позволяющую определить те части разъемов, которые подлежат соединению между собой. Ответные части одного и того же разъема должны иметь одинаковую маркировку. Маркировка должна наноситься на корпусах ответных частей разъемов на видном месте. Допускается не наносить маркировку, если разъем данного типа в изделии единственный.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.9.2. Выводы изделия должны быть снабжены маркировкой или должны быть выполнены таким образом, чтобы была возможность нанесения маркировки. Нанеска маркировочных бирок не допускается.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.9.3. Маркировку проводников следует выполнять на обоих концах каждого проводника по нормативно-технической документации.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.9.4. Маркировка проводника должна быть выполнена так, чтобы при отсоединении проводника от зажима она сохранялась бы на замаркированном проводнике.	С
	ГОСТ 12.2.007.0-75	3.9.5. При необходимости различать проводники по функциональному назначению цепей, в которых они используются, следует применять следующие расцветки изоляции: черную - для проводников в силовых цепях; красную - для проводников в цепях управления, измерения и сигнализации переменного тока;	С

Приложение № Г2 к работе (Протокол испытаний зернодробилки)

ПИ № 91470.210823 от 21 августа 2023 года

ИЛ «ОНИКС»

		синюю - для проводников в цепях управления, измерения и сигнализации постоянного тока; зелено-желтую (двухцветную) - для проводников в цепях заземления; голубую - для проводников, соединенных с нулевым проводом и не предназначенных для заземления.	
--	--	---	--

ГОСТ 30804.6.2-2013

Вид помехи	Наименование и значение параметра	Основной стандарт	Критерий качества функционирования	Заключение
Помехоустойчивость. Порт корпуса				
1.1 Магнитное поле промышленной частоты	Частота 50 Гц, напряженность магнитного поля 30 А/м	ГОСТ 31204	A	C
1.2 Радиочастотное электромагнитное поле (амплитудная модуляция)	Частота 80-1000 МГц, напряженность электрического поля 10 В/м, глубина амплитудной модуляции 80%, частота модуляции 1 кГц	ГОСТ 30804.4.3	A	C
1.3 Радиочастотное электромагнитное поле (амплитудная модуляция)	Частота 1,4-2,0 ГГц, напряженность электрического поля 3 В/м, глубина амплитудной модуляции 80%, частота модуляции 1 кГц	ГОСТ 30804.4.3	A	C
1.4 Радиочастотное электромагнитное поле (амплитудная модуляция)	Частота 2,0-2,7 ГГц, напряженность электрического поля 1 В/м, глубина амплитудной модуляции 80%, частота модуляции 1 кГц	ГОСТ 30804.4.3	A	C
1.5 Электростатический разряд	Испытательное напряжение при контактом разряде ±4 кВ	ГОСТ 30804.4.2	B	C
	Испытательное напряжение при воздушном разряде ±8 кВ			
Помехоустойчивость. Порт корпуса				
2.1 Кондуктивные помехи, наведенные радиочастотными электромагнитными полями	Частота 0,15-80 МГц, напряжение 10 В, глубина амплитудной модуляции 80%, частота модуляции 1 кГц	ГОСТ 30804.4.6	A	C
2.2 Наносекундные импульсные помехи	Амплитуда импульсов ±1 кВ, длительность фронта импульса/длительность импульса 5/50 нс, частота импульсов 5 кГц	ГОСТ 30804.4.4	B	C
2.3 Микросекундные импульсные помехи большой энергии. Подача помехи по схеме "провод - земля";	Длительность фронта импульса/длительность импульса 1,2/50 (8/20) мкс, амплитуда импульсов ±1 кВ	ГОСТ 30804.4.5	B	C
Помехоустойчивость. Входные и выходные порты электропитания постоянного тока				
3.1 Кондуктивные помехи, наведенные радиочастотными электромагнитными полями	Частота 0,15-80 МГц, напряжение 10 В, глубина амплитудной модуляции 80%, частота модуляции 1 кГц	ГОСТ 30804.4.6	A	C
3.2 Микросекундные импульсные помехи большой энергии: - подача помехи по схеме "провод - земля"; подача помехи по схеме "провод - провод"	Длительность фронта импульса/длительность импульса 1,2/50 (8/20) мкс амплитуда импульсов ±0,5 кВ	ГОСТ 30804.4.5	B	C
	амплитуда импульсов ±0,5 кВ			
3.3 Наносекундные импульсные помехи	Амплитуда импульсов 2 кВ, длительность фронта импульса/длительность импульса 5/50 нс, частота импульсов 5 кГц	ГОСТ 30804.4.4	B	C
Помехоустойчивость. Входные и выходные порты электропитания переменного тока				
4.1 Кондуктивные помехи, наведенные радиочастотными электромагнитными полями	Полоса частот 0,15-80 МГц, напряжение 10 В, глубина амплитудной модуляции 80%, частота модуляции 1 кГц	ГОСТ 30804.4.6	A	C
4.2 Провалы напряжения электропитания	Испытательное напряжение 0% Un2, длительность 1 период	ГОСТ 30804.4.11	B	C
	Испытательное напряжение 40 % Un2, длительность 10 периодов при частоте 50 Гц		C	C
	Испытательное напряжение 70 % Un2, длительность 25 периодов при частоте 50 Гц		C	C
4.3 Прерывания напряжения	Испытательное напряжение 0%	ГОСТ 30804.4.11	C	C

Приложение № Г2 к работе (Протокол испытаний зернодробилки)

ПИ № 91470.210823 от 21 августа 2023 года

ИЛ «ОНИКС»

электроштанга	Un2, длительность 250 периодов при частоте 50 Гц			
4.4 Микросекундные импульсные помехи большой энергии:	Длительность фронта импульса/длительность импульса 1,2/50 (8/20) мкс	ГОСТ 30804.4.5	В	С
подача помехи по схеме "провод - земля":	амплитуда импульсов ±2 кВ			
подача помехи по схеме "провод - провод"	амплитуда импульсов +1 кВ			
4.5 Наносекундные импульсные помехи	Амплитуда импульсов ±2 кВ, длительность фронта импульса/длительность импульса 5/50 нс, частота импульсов 5 кГц	ГОСТ 30804.4.4	В	С

ГОСТ 30804.6.4-2013

Порт	Полоса частот	Норма	Наименование НД на метод испытаний	Значение НД на метод испытаний	Заключение
1 Порт корпуса	30-230 МГц	40 дБ (1 мкВ/м) (квазишиковое значение при расстоянии 10 м)	ГОСТ 30805.16.2.3	-	НП
	230-1000 МГц	47 дБ (1 мкВ/м) (квазишиковое значение при расстоянии 10 м)		42 дБ	С
2 Порт электроштанга переменного тока низкого напряжения	0,15-0,5 МГц	79 дБ (1 мкВ) (квазишиковое значение), 66 дБ (1 мкВ) (среднее значение)	ГОСТ 30605.16.2.1, пункт 7.4.1; ГОСТ 30805.16.1.2, подраздел 4.3	-	НП
	0,5-30 МГц	73 дБ (1 мкВ) (квазишиковое значение), 60 дБ (1 мкВ) (среднее значение)		56 дБ	С
3 Порт связи	0,15-0,5 МГц	97-87 дБ (1 мкВ) (квазишиковое значение), 84-74 дБ (1 мкВ) (среднее значение) 53-43 дБ (1 мкА) (квазишиковое значение), 40-30 дБ (1 мкА) (среднее значение)	ГОСТ 30805.22	-	НП
	0,5-30 МГц	87 дБ (1 мкВ) (квазишиковое значение), 74 дБ (1 мкВ) (среднее значение) 43 дБ (1 мкА) (квазишиковое значение), 30 дБ (1 мкА) (среднее значение)		28 дБ	С

ГОСТ 12.2.003-91

Наименование	НД на метод испытаний	Значение характеристики по НД	Результат испытаний
2. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ			
2.1. Требования к конструкции и ее отдельным частям	ГОСТ 12.2.003-91	2.1.1. Материалы конструкции производственного оборудования не должны оказывать опасное и вредное воздействие на организм человека на всех заданных режимах работы и предусмотренных условиях эксплуатации, а также создавать пожаро-взрывоопасные ситуации.	С
		2.1.2. Конструкция производственного оборудования должна исключать на всех предусмотренных режимах работы нагрузки на детали и сборочные единицы, способные вызвать разрушения, представляющие опасность для работающих. Если возможно возникновение нагрузок, приводящих к опасным для работающих разрушениям отдельных деталей или сборочных единиц, то производственное оборудование должно быть оснащено устройствами, предотвращающими возникновение разрушающих нагрузок, а также детали и сборочные единицы должны быть ограждены или расположены так, чтобы их разрушающиеся части не создавали травмоопасных ситуаций.	С

Приложение № Г2 к работе (Протокол испытаний зернодробилки)

ПИ № 91470.210823 от 21 августа 2023 года

ИЛ «ОНИКС»

	<p>2.1.3. Конструкция производственного оборудования и его отдельных частей должна исключать возможность их падения, опрокидывания и самопроизвольного смещения при всех предусмотренных условиях эксплуатации и монтажа (демонтажа). Если из-за формы производственного оборудования, распределения масс отдельных его частей и(или) условий монтажа (демонтажа) не может быть достигнута необходимая устойчивость, то должны быть предусмотрены средства и методы закрепления, о чем эксплуатационная документация должна содержать соответствующие требования.</p>	С
	<p>2.1.4. Конструкция производственного оборудования должна исключать падение или выбрасывание предметов (например, инструмента, заготовок, обработанных деталей, стружки), представляющих опасность для работающих, а также выбросов смазывающих, охлаждающих и других рабочих жидкостей. Если для указанных целей необходимо использовать защитные ограждения, не входящие в конструкцию, то эксплуатационная документация должна содержать соответствующие требования к ним.</p>	С
	<p>2.1.5. Движущиеся части производственного оборудования, являющиеся возможным источником травмопасности, должны быть ограждены или расположены так, чтобы исключалась возможность прикасания к ним работающего или использованы другие средства (например, дистанционное управление), предотвращающие травмирование. Если функциональное назначение движущихся частей, представляющих опасность, не допускает использование ограждений или других средств, исключающих возможность прикасания работающих к движущимся частям, то конструкция производственного оборудования должна предусматривать сигнализацию, предупреждающую о пуске оборудования, а также использование сигнальных цветов и знаков безопасности. В непосредственной близости от движущихся частей, находящихся вне поля видимости оператора, должны быть установлены органы управления аварийным остановом (торможением), если в опасной зоне, создаваемой движущимися частями, могут находиться работающие.</p>	С
	<p>2.1.6. Конструкция зажимных, захватывающих, подъемных и загрузочных устройств или их приводов должна исключать возможность возникновения опасности при полном или частичном самопроизвольном прекращении подачи энергии, а также исключать самопроизвольное изменение состояния этих устройств при восстановлении подачи энергии.</p>	С
	<p>2.1.7. Элементы конструкции производственного оборудования не должны иметь острых углов, кромок, заусенцев и поверхностей с неровностями, представляющих опасность травмирования работающих, если их наличие не определяется функциональным назначением этих элементов. В последнем случае должны быть предусмотрены меры защиты работающих.</p>	С
	<p>2.1.8. Части производственного оборудования (в том числе трубопроводы гидро-, паро-, пневмосистем, предохранительные клапаны, кабели и др.), механическое повреждение которых может вызвать возникновение опасности, должны быть защищены ограждениями или расположены так, чтобы предотвратить их случайное повреждение работающими или средствами технического обслуживания.</p>	С
	<p>2.1.9. Конструкция производственного оборудования должна исключать самопроизвольное ослабление или разъединение крепежных единиц и деталей, а также исключать перемещение подвижных частей за пределы, предусмотренные конструкцией, если это может повлечь за собой создание опасной ситуации.</p>	С
	<p>2.1.10. Производственное оборудование должно быть пожаровзрывобезопасным в предусмотренных условиях эксплуатации. Технические средства и методы обеспечения пожаровзрывобезопасности (например, предотвращение образования пожаро- и взрывоопасной среды, исключение образования источников зажигания и инициирования взрыва, предупредительная сигнализация, система пожаротушения, аварийная вентиляция, герметические оболочки, аварийный слив горючих жидкостей и срабатывание горючих газов, размещение производственного оборудования или его отдельных частей в специальных помещениях) должны устанавливаться в стандартах, технических условиях и эксплуатационных документах на производственное оборудование конкретных групп, видов, моделей (марок).</p>	С
	<p>2.1.11. Конструкция производственного оборудования, приводимого в действие электрической энергией, должна включать устройства (средства) для обеспечения электробезопасности. Технические средства и способы обеспечения электробезопасности (например, ограждение, заземление, зануление, изоляция токоведущих частей, защитное отключение и др.) должны устанавливаться в стандартах и технических условиях на производственное оборудование конкретных групп, видов, моделей (марок) с учетом условий эксплуатации и характеристик источников электрической энергии.</p>	С
	<p>2.1.11.1. Производственное оборудование должно быть выполнено так, чтобы исключить накопление зарядов статического электричества в количестве, представляющем опасность для работающего, и исключить возможность пожара и взрыва.</p>	С

Приложение № Г2 к работе (Протокол испытаний зернодробилки)

ПИ № 91470.210823 от 21 августа 2023 года

ИЛ «ОНИКС»

		<p>2.1.12. Производственное оборудование, действующее с помощью неэлектрической энергии (например, гидравлической, пневматической, энергии пара), должно быть выполнено так, чтобы все опасности, вызываемые этими видами энергии, были исключены. Конкретные меры по исключению опасности должны быть установлены в стандартах, технических условиях и эксплуатационной документации на производственное оборудование конкретных групп, видов, моделей (марок).</p>	НП
		<p>2.1.13. Производственное оборудование, являющееся источником шума, ультразвука и вибрации, должно быть выполнено так, чтобы шум, ультразвук и вибрация в предусмотренных условиях и режимах эксплуатации не превышали установленные стандартами допустимые уровни.</p>	С
		<p>2.1.14. Производственное оборудование, работа которого сопровождается выделением вредных веществ (в том числе пожаровзрывоопасных), и (или) вредных микроорганизмов, должно включать встроенные устройства для их удаления или обеспечивать возможность присоединения к производственному оборудованию удаляющих устройств, не входящих в конструкцию. Устройство для удаления вредных веществ и микроорганизмов должно быть выполнено так, чтобы концентрация вредных веществ и микроорганизмов в рабочей зоне, а также их выбросы в природную среду не превышали значений, установленных стандартами и санитарными нормами. В необходимых случаях должна осуществляться очистка и (или) нейтрализация выбросов. Если совместное удаление различных вредных веществ и микроорганизмов представляет опасность, то должно быть обеспечено их раздельное удаление.</p>	НП
		<p>2.1.15. Производственное оборудование должно быть выполнено так, чтобы воздействие на работающих вредных излучений было исключено или ограничено безопасными уровнями. При использовании лазерных устройств необходимо: исключить непреднамеренное излучение; экранировать лазерные устройства так, чтобы была исключена опасность для здоровья работающих.</p>	НП
		<p>2.1.16. Конструкция производственного оборудования и (или) его размещение должны исключать контакт его горячих частей с пожаровзрывоопасными веществами, если такой контакт может явиться причиной пожара или взрыва, а также исключать возможность соприкосновения работающего с горячими или переохлажденными частями или нахождение в непосредственной близости от таких частей, если это может повлечь за собой травмирование, перегрев или переохлаждение работающего. Если назначение производственного оборудования и условия его эксплуатации (например, использование вне производственных помещений) не могут полностью исключить контакт работающего с переохлажденными или горячими его частями, то эксплуатационная документация должна содержать требование об использовании средств индивидуальной защиты.</p>	С
		<p>2.1.17. Конструкция производственного оборудования должна исключать опасность, вызываемую разбрызгиванием горячих обрабатываемых и (или) используемых при эксплуатации материалов и веществ. Если конструкция не может полностью обеспечить исключение такой опасности, то эксплуатационная документация должна содержать требования об использовании средств защиты, не входящих в конструкцию.</p>	НП
		<p>2.1.18. Производственное оборудование должно быть оснащено местным освещением, если его отсутствие может явиться причиной перенапряжения органа зрения или повлечь за собой другие виды опасности. Характеристика местного освещения должна соответствовать характеру работы, при выполнении которой возникает в нем необходимость. Местное освещение, его характеристика и места расположения должны устанавливаться в стандартах, технических условиях и эксплуатационной документации на производственное оборудование конкретных групп, видов, моделей (марок).</p>	НП
		<p>2.1.19. Конструкция производственного оборудования должна исключать ошибки при монтаже, которые могут явиться источником опасности. В случае, когда данное требование может быть выполнено только частично, эксплуатационная документация должна содержать порядок выполнения монтажа, объем проверок и испытаний, исключающих возможность возникновения опасных ситуаций из-за ошибок монтажа.</p>	С
		<p>2.1.19.1. Трубопроводы, шланги, провода, кабели и другие соединяющие детали и сборочные единицы должны иметь маркировку в соответствии с монтажными схемами.</p>	С
2.2. Требования к рабочим местам	ГОСТ 12.2.003-91	<p>2.2.1. Конструкция рабочего места, его размеры и взаимное расположение элементов (органов управления, средств отображения информации, вспомогательного оборудования и др.) должны обеспечивать безопасность при использовании производственного оборудования по назначению, техническом обслуживании, ремонте и уборке, а также соответствовать эргономическим требованиям. Необходимость наличия на рабочих местах средств пожаротушения и других средств, используемых в аварийных ситуациях, должна быть установлена в стандартах, технических условиях и эксплуатационной документации на производственное оборудование конкретных групп, видов, моделей (марок). Если для защиты от неблагоприятных воздействий опасных и вредных производственных факторов в состав рабочего места входит кабина, то ее конструкция должна обеспечивать необходимые защитные функции, включая</p>	С

Приложение № Г2 к работе (Протокол испытаний зернодробилки)

ПИ № 91470.210823 от 21 августа 2023 года

ИЛ «ОНИКС»

		создание оптимальных микроклиматических условий, удобство выполнения рабочих операций и оптимальный обзор производственного оборудования и окружающего пространства.	
		2.2.2. Размеры рабочего места и размещение его элементов должны обеспечивать выполнение рабочих операций в удобных рабочих позах и не затруднять движений работающего.	С
		2.2.3. При проектировании рабочего места следует предусматривать возможность выполнения рабочих операций в положении сидя или при чередовании положений сидя и стоя, если выполнение операций не требует постоянного передвижения работающего. Конструкции кресла и подставки для ног должны соответствовать эргономическим требованиям. Если расположение рабочего места вызывает необходимость перемещения и (или) нахождения работающего выше уровня пола, то конструкция должна предусматривать площадки, лестницы, перила и другие устройства, размеры и конструкции которых должны исключать возможность падения работающих и обеспечивать удобное и безопасное выполнение трудовых операций, исключая операции по техническому обслуживанию.	С
2.3. Требования к системе управления	ГОСТ 122.003-91	2.3.1. Система управления должна обеспечивать надежное и безопасное ее функционирование на всех предусмотренных режимах работы производственного оборудования и при всех внешних воздействиях, предусмотренных условиями эксплуатации. Система управления должна исключать создание опасных ситуаций из-за нарушения работающим (работающими) последовательности управляющих действий. На рабочих местах должны быть надписи, схемы и другие средства информации о необходимой последовательности управляющих действий.	С
		2.3.2. Система управления производственным оборудованием должна включать средства экстренного торможения и аварийного останова (высключения), если их использование может уменьшить или предотвратить опасность. Необходимость включения в систему управления указанных средств должна устанавливаться в стандартах и технических условиях на производственное оборудование конкретных групп, видов, моделей (марок).	С
		2.3.3. В зависимости от сложности управления и контроля за режимом работы производственного оборудования система управления должна включать средства автоматической нормализации режима работы или средства автоматического останова, если нарушение режима работы может явиться причиной создания опасной ситуации. Система управления должна включать средства сигнализации и другие средства информации, предупреждающие о нарушениях функционирования производственного оборудования, приводящих к возникновению опасных ситуаций. Конструкция и расположение средств, предупреждающих о возникновении опасных ситуаций, должны обеспечивать безошибочное, достоверное и быстрое восприятие информации. Необходимость включения в систему управления средств автоматической нормализации режимов работы или автоматического останова устанавливаются в стандартах и технических условиях на производственное оборудование конкретных групп, видов, моделей (марок).	С
		2.3.4. Система управления технологическим комплексом должна исключать возникновение опасности в результате совместного функционирования всех единиц производственного оборудования, входящих в технологический комплекс, а также в случае выхода из строя какой-либо его единицы.	НП
		2.3.5. Система управления отдельной единицей производственного оборудования, входящей в технологический комплекс, должна иметь устройства, с помощью которых можно было бы в необходимых случаях (например, до окончания работ по техническому обслуживанию) заблокировать пуск в ход технологического комплекса, а также осуществить его останов.	НП
		2.3.6. Центральный пульт управления технологическим комплексом должен быть оборудован сигнализацией, мнемосхемой или другими средствами отображения информации о нарушениях нормального функционирования всех единиц производственного оборудования, составляющих технологический комплекс, средствами аварийного останова (высключения) всего технологического комплекса, а также отдельных его единиц, если аварийный останов отдельных единиц не приведет к усугублению аварийной ситуации.	НП
		2.3.7. Центральный пульт управления должен быть расположен или оборудован так, чтобы оператор имел возможность контролировать отсутствие людей в опасных зонах технологического комплекса либо система управления должна быть выполнена так, чтобы нахождение людей в опасной зоне исключало функционирование технологического комплекса, и каждому пуску предшествовал предупреждающий сигнал, продолжительность действия которого позволяла бы лицу, находящемуся в опасной зоне, покинуть ее или предотвратить функционирование технологического комплекса.	НП
		2.3.8. Командные устройства системы управления (далее – органы управления) должны быть: 1) легко доступны и свободно различимы, в необходимых случаях обозначены надписями, символами или другими способами; 2) сконструированы и размещены так, чтобы исключалось непроизвольное их	С

Приложение № Г2 к работе (Протокол испытаний зернодробилки)

ПИ № 91470.210823 от 21 августа 2023 года

ИЛ «ОНИКС»

		<p>перемещение и обеспечивалось надежное, уверенное и однозначное манипулирование, в том числе при использовании работающим средств индивидуальной защиты;</p> <p>3) размещены с учетом требуемых усилий для перемещения, последовательности и частоты использования, а также значимости функций;</p> <p>4) выполнены так, чтобы их форма, размеры и поверхности контакта с работающим соответствовали способу захвата (пальцами, кистью) или нажатия (пальцем, ладонью, ступней ноги);</p> <p>5) расположены вне опасной зоны, за исключением органов управления, функциональное назначение которых (например, органов управления движением робота в процессе его палатки) требует нахождения работающего в опасной зоне; при этом должны быть приняты дополнительные меры по обеспечению безопасности (например, снижение скорости движущихся частей робота).</p>	
		<p>2.3.9. Пуск производственного оборудования в работу, а также повторный пуск после останова независимо от его причины должен быть возможен только путем манипулирования органом управления пуском.</p> <p>Данное требование не относится к повторному пуску производственного оборудования, работающего в автоматическом режиме, если повторный пуск после останова предусмотрен этим режимом.</p> <p>Если система управления имеет несколько органов управления, осуществляющих пуск производственного оборудования или его отдельных частей и нарушение последовательности их использования может привести к созданию опасных ситуаций, то система управления должна исключать устройства, исключаящие создание таких ситуаций.</p>	С
		<p>2.3.10. Орган управления аварийным остановом после включения должен оставаться в положении, соответствующем останову, до тех пор, пока он не будет возвращен работающим в исходное положение; его возвращение в исходное положение не должно приводить к пуску производственного оборудования.</p> <p>Орган управления аварийным остановом должен быть красного цвета, отличаться формой и размерами от других органов управления.</p>	С
		<p>2.3.11. При наличии в системе управления переключателя режимов функционирования производственного оборудования каждое положение переключателя должно соответствовать только одному режиму (например, режиму регулирования, контроля и т.п.) и надежно фиксироваться в каждом из положений, если отсутствие фиксации может привести к созданию опасной ситуации.</p> <p>Если на некоторых режимах функционирования требуется повышенная защита работающих, то переключатель в таких положениях должен блокировать возможность автоматического управления; движение элементов конструкции осуществлять только при постоянном приложении усилия работающего к органу управления движением; прекращать работу сопряженного оборудования, если его работа может вызвать дополнительную опасность; исключать функционирование частей производственного оборудования, не участвующих в осуществлении выбранного режима; снижать скорости движущихся частей производственного оборудования, участвующих в осуществлении выбранного режима.</p>	С
		<p>2.3.12. Полное или частичное прекращение энергоснабжения и последующее его восстановление, а также повреждение цепи управления энергоснабжением не должны приводить к возникновению опасных ситуаций, в том числе: самонравильному пуску при восстановлении энергоснабжения; невыполнению уже выданной команды на останов; падению и выбрасыванию подвижных частей производственного оборудования и закрепленных на нем предметов (например, заготовок, инструмента и т.д.); снижению эффективности защитных устройств.</p>	С
2.4. Требования к средствам защиты, входящим в конструкцию, и сигнальным устройствам	ГОСТ 122.003-91	2.4.1. Конструкция средств защиты должна обеспечивать возможность контроля выполнения ими своего назначения до начала и (или) в процессе функционирования производственного оборудования.	С
		2.4.2. Средства защиты должны выполнять свое назначение непрерывно в процессе функционирования производственного оборудования или при возникновении опасной ситуации.	С
		2.4.3. Действие средств защиты не должно прекращаться раньше, чем закончится действие соответствующего опасного или вредного производственного фактора.	С
		2.4.4. Отказ одного из средств защиты или его элемента не должен приводить к прекращению нормального функционирования других средств защиты.	С
		2.4.5. Производственное оборудование, в состав которого входят средства защиты, требующие их включения до начала функционирования производственного оборудования и (или) выключения после окончания его функционирования, должно иметь устройства, обеспечивающие такую последовательность.	С
		2.4.6. Конструкция и расположение средств защиты не должны ограничивать технологические возможности производственного оборудования и должны обеспечивать удобство эксплуатации и технического обслуживания.	С
		<p>Если конструкция средств защиты не может обеспечить все технологические возможности производственного оборудования, то приоритетным является</p>	С

Приложение № Г2 к работе (Протокол испытаний зернодробилки)

ПИ № 91470.210823 от 21 августа 2023 года

ИЛ «ОНИКС»

		требование обеспечения защиты работающего.	
		2.4.7. Форма, размеры, прочность и жесткость защитного ограждения, его расположение относительно ограждаемых частей производственного оборудования должны исключать воздействие на работающего ограждаемых частей и возможных выбросов (например, инструмента, обрабатываемых деталей).	С
		2.4.8. Конструкция защитного ограждения должна: 1) исключать возможность самопроизвольного перемещения из положения, обеспечивающего защиту работающего; 2) допускать возможность его перемещения из положения, обеспечивающего защиту работающего только с помощью инструмента, или блокировать функционирование производственного оборудования, если защитное ограждение находится в положении, не обеспечивающем выполнение своих защитных функций; 3) обеспечивать возможность выполнения работающим предусмотренных действий, включая наблюдение за работой ограждаемых частей производственного оборудования, если это необходимо; 4) не создавать дополнительные опасные ситуации; 5) не снижать производительность труда.	С
		2.4.9. Сигнальные устройства, предупреждающие об опасности, должны быть выполнены и расположены так, чтобы их сигналы были хорошо различимы и слышны в производственной обстановке всеми лицами, которым угрожает опасность.	С
		2.4.10. Части производственного оборудования, представляющие опасность, должны быть окрашены в сигнальные цвета и обозначены соответствующим знаком безопасности в соответствии с действующими стандартами.	С
2.5 Требования к конструкции, способствующие безопасности при монтаже, транспортировании, хранении и ремонте	ГОСТ 12.2.003-91	2.5.1. При необходимости использования грузоподъемных средств в процессе монтажа, транспортирования, хранения и ремонта на производственном оборудовании и его отдельных частях должны быть обозначены места для подсоединения грузоподъемных средств и поднимаемая масса.	С
		2.5.2. Места подсоединения подъемных средств должны быть выбраны с учетом центра тяжести оборудования (его частей) так, чтобы исключить возможность повреждения оборудования при подъеме и перемещении и обеспечить удобный и безопасный подход к ним.	С
		2.5.3. Конструкция производственного оборудования и его частей должна обеспечивать возможность надежного их закрепления на транспортном средстве или в упаковочной таре.	С
		2.5.4. Сборочные единицы производственного оборудования, которые при загрузке (разгрузке), транспортировании и хранении могут самопроизвольно перемещаться, должны иметь устройства для их фиксации в определенном положении.	НП
		2.5.5. Производственное оборудование и его части, перемещение которых предусмотрено вручную, должны быть снабжены устройствами (например, ручками) для перемещения или иметь форму, удобную для захвата рукой.	С

Заключение:

По результатам проведенных испытаний объект испытаний: Дробилка молотковая с оппозитной загрузкой для измельчения зерна «ДМОЗИЗ», модель ДМОЗИЗ-200У, изготовитель: Общество с ограниченной ответственностью «АгроТехНовации», соответствует требованиям ТР ТС 004/2011 "О безопасности низковольтного оборудования", ТР ТС 010/2011 "О безопасности машин и оборудования", ТР ТС 020/2011 "Электромагнитная совместимость технических средств" (в том числе ГОСТ 12.2.003-91, ГОСТ 12.2.007.0-75, ГОСТ 30804.6.2-2013, ГОСТ 30804.6.4-2013) по проверенным показателям.

Испытатель



Романов М.С.

Конец протокола испытаний

Приложение № Д к работе (Декларация о соответствии ЕАС)



ЕВРАЗИЙСКИЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ СОЮЗ ДЕКЛАРАЦИЯ О СООТВЕТСТВИИ

Заявитель: ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "АГРОТЕХНОВАЦИИ", Место нахождения: 658700, РОССИЯ, Алтайский край, КАМЕНСКИЙ м.р-н, Г. КАМЕНЬ-НА-ОБИ, г.п. Г КАМЕНЬ-НА-ОБИ, УЛ КОЛЕСНИКОВА, Д. 91, КВ. 2, Адрес места осуществления деятельности: 658700, РОССИЯ, Алтайский край, муниципальный район Каменский, городское поселение Камень-на-Оби, улица Нижегородская, дом 54, ОГРН: 1222200018260, Номер телефона: +7 9538630001, Адрес электронной почты: roman3792007@yandex.ru
В лице: ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР БЕСПОЛДЕНОВ РОМАН ВИКТОРОВИЧ

заявляет, что Дробилка молотковая с оппозитной загрузкой для измельчения зерна «ДМОЗИЗ», Дробилка молотковая с оппозитной загрузкой для измельчения зерна «ДМОЗИЗ», описание продукции: модели: ДМОЗИЗ-200, ДМОЗИЗ-200У
Изготовитель: ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "АГРОТЕХНОВАЦИИ", Место нахождения: 658700, РОССИЯ, Алтайский край, КАМЕНСКИЙ м.р-н, Г. КАМЕНЬ-НА-ОБИ, г.п. Г КАМЕНЬ-НА-ОБИ, УЛ КОЛЕСНИКОВА, Д. 91, КВ. 2, Адрес места осуществления деятельности по изготовлению продукции: 658700, РОССИЯ, Алтайский край, муниципальный район Каменский, городское поселение Камень-на-Оби, улица Нижегородская, дом 54
Документ, в соответствии с которым изготовлена продукция: ТУ 28.30.83-001-95965384-2023 Дробилка молотковая с оппозитной загрузкой для измельчения зерна «ДМОЗИЗ». Технические условия
Коды ТН ВЭД ЕАЭС: 8436100000
Серийный выпуск.

Соответствует требованиям ТР ТС 004/2011 О безопасности низковольтного оборудования; ТР ТС 020/2011 Электромагнитная совместимость технических средств

Декларация о соответствии принята на основании протокола 91470.210823 выдан 21.08.2023 испытательной лабораторией "Испытательная лаборатория «Оникс», аттестат аккредитации № ОНПС RU.04ОПС0.ИЛО2"; Схема декларирования: 1д;

Дополнительная информация Стандарты и иные нормативные документы: ГОСТ 12.2.003-91. Система стандартов безопасности труда Оборудование производственное. Общие требования безопасности; Стандарты и иные нормативные документы: ГОСТ 12.2.007.0-75, Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности; Стандарты и иные нормативные документы: ГОСТ 30804.6.2-2013 (IEC 61000-6-2:2005), Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в промышленных зонах. Требования и методы испытаний; Стандарты и иные нормативные документы: ГОСТ 30804.6.4-2013 (IEC 61000-6-4:2006), Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитные помехи от технических средств, применяемых в промышленных зонах. Нормы и методы испытаний; Условия и сроки хранения: Условия хранения продукции в соответствии с ГОСТ 15150-69 "Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды", срок хранения (службы, годности) указан в прилагаемой к продукции товаросопроводительной и/или эксплуатационной документации

Декларация о соответствии действительна с даты регистрации по 20.08.2028 включительно


(подпись)



БЕСПОЛДЕНОВ РОМАН ВИКТОРОВИЧ
(Ф. И. О. заявителя)

Регистрационный номер декларации о соответствии: ЕАЭС N RU Д-РУ.РА06.В.68685/23
Дата регистрации декларации о соответствии: 23.08.2023

Приложение № Е (Сертификат соответствия)

СИСТЕМА ДОБРОВОЛЬНОЙ СЕРТИФИКАЦИИ «ПРИБОР-ЭКСПЕРТ» Per. № РОСС RU.31578.04ОЛНО от 16.11.2016 г.	
	СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ
№ РОСС RU.НЕ06.Н11153	Срок действия с 17.08.2023 по 16.08.2028
	№ 0033218
ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ RA.RU.11HE06 Орган по сертификации продукции ООО "Эксперт-С". Адрес: 300045, РОССИЯ, Тульская обл, Тула г, Новомосковское ш, дом 54, помещение 3, 2 этаж, помещение 14. Телефон 8-487-274-0239, адрес электронной почты: s.eksp@yandex.ru	
ПРОДУКЦИЯ Дробилка молотковая с оппозитной загрузкой для измельчения зерна «ДМОЗИЗ», модели: ДМОЗИЗ-200, ДМОЗИЗ-200У. Серийный выпуск.	КОД ОК 28.30.83
СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ТУ 28.30.83-001-95965384-2023 Дробилка молотковая с оппозитной загрузкой для измельчения зерна «ДМОЗИЗ». Технические условия	КОД ТН ВЭД
ИЗГОТОВИТЕЛЬ Общество с ограниченной ответственностью «АгроТехНовации». ОГРН: 1222200018260, ИНН: 2207011281, КПП: 220701001. Адрес: 658700, РОССИЯ, Алтайский край, м.р-н Каменский, г. Камень-на-Оби, ул. Колесникова, 91-2.	
СЕРТИФИКАТ ВЫДАН Общество с ограниченной ответственностью «АгроТехНовации». ОГРН: 1222200018260, ИНН: 2207011281, КПП: 220701001. Адрес: 658700, РОССИЯ, Алтайский край, м.р-н Каменский, г. Камень-на-Оби, ул. Колесникова, 91-2.	
НА ОСНОВАНИИ Протокол испытаний № 001/В-17/08/23 от 17.08.2023 года, выданный Испытательной лабораторией «Гранум» (аттестат РОСС RU.31578.04ОЛНО.ИЛ31)	
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ Схема сертификации: 1с	
	Руководитель органа
Эксперт	А.В. Босик инициалы, фамилия
	А.А. Белянин инициалы, фамилия
Сертификат не применяется при обязательной сертификации	

Приложение № Ж к работе (Внедрение в учебный процесс)

«УТВЕРЖДАЮ»
 Проректор по учебной работе
 к. с. н. в. доцент
 Завалишин С. И.
 «28» апреля 2023



А К Т об использовании /внедрении/ результатов научно-исследовательской работы в учебном процессе Алтайского государственного аграрного университета

Мы, представители научно-исследовательского отдела Алтайского
 ГАУ начальник Отдел сопровождения научно-инновационной деятельности
 (должность, фамилия, имя, отчество)

к.э.н. Федулова Инна Владимировна

и методической комиссии инженерного факультета

председатель Садов Виктор Викторович

(должность, фамилия, имя, отчество)

с одной стороны, и представители кафедры механизации производства и
 переработки сельскохозяйственной продукции

(наименование предприятия, организации, учреждения)

заведующий кафедрой Садов Виктор Викторович

(должность, фамилия, имя, отчество)

с другой стороны, составили настоящий акт о том, что результаты научно-
 исследовательской работы на тему: «Конструктивно-режимные параметры
 (название работы, тема работы; ее руководитель и исполнители)

молотковой зернодробилки с оппозитной загрузкой исходного материала».
Научный руководитель: д.т.н., профессор Федоренко Иван Ярославович,
исполнитель аспирант Бесподенов Роман Викторович.

выполненной в период с 1 сентября 2020 г. по 28 апреля 2023 г.

месяц

месяц

по госбюджету, по хоздоговору в объеме _____ тыс.
 руб. внедрены /использованы/ в учебном процессе:

а) при чтении лекций по "Ресурсосберегающие технологии в
 животноводстве"

(название учебных дисциплин)

по теме /разделу/ "Прогрессивные и ресурсосберегающие технологии
 подготовки кормов к скармливанию"

(тема лекции)

б) при проведении лабораторных /практических/ занятий Лабораторная
 работа: "Влияние вибрации на эффективность работы молотковых
 измельчителей в процессе дробления зерна", "Влияние подачи исходного

Приложение № Ж к работе (Внедрение в учебный процесс)

материала на эффективность работы молотковой дробилки с горизонтальной осью вращения"

со студентами 3 курса инженерного факультета,

по направлениям подготовки (бакалавриата) 35.03.06 "Агроинженерия"

Специальность 23.05.01 "Наземные транспортно-технологические средства",

со студентами 1 курса инженерного факультета, по направлениям подготовки магистратуры 35.04.06 "Агроинженерия",

Использование представленных результатов научных исследований при выполнении обучающимися лабораторных и практических работ, способствуют повышению качества образования и совершенствованию профессиональной подготовки обучающихся.

Настоящий акт составлен на основании рабочих программ и тематических планов лекций и лабораторно-практических занятий по курсу "Ресурсосберегающие технологии в животноводстве"

Представитель научно-исследовательского
отдела Федулова И.В.
ФИО



подпись

Представитель методической комиссии
факультета Садов В.В.
ФИО



подпись

Заведующий кафедрой (лабораторией)
Садов В.В.
ФИО



подпись

Приложение № II к работе (Внедрение в производство)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и
инновационной работе

ФГБОУ ВО «Алтайский
государственный аграрный
университет»,

кандидат географических наук

Попов Е.С.

«28» апреля 2023 г.



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
Общества с ограниченной
ответственностью «Еврогруп»,
кандидат технических наук

Левин А.М.

«28» апреля 2023 г.



АКТ

внедрения результатов научно-исследовательских, опытно-
конструкторских и технологических работ

«28» апреля 2023 г.

№ 1

Мы, нижеподписавшиеся, представители Алтайского государственного аграрного университета /АлтГАУ/ д.т.н., доцент, профессор кафедры «Механизации производства и переработки сельскохозяйственной продукции» Федоренко И.Я., аспирант этой же кафедры Бесполденов Р.В. с одной стороны, и конструктор ООО «Еврогруп» Фильчаков Е.А., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что в период 2023 г. в результате научно-исследовательской работы по теме: «Конструктивно-режимные параметры молотковой зернодробилки с оппозитной загрузкой исходного материала» выполнена производственная оценка эффективности применения молотковой дробилки горизонтального типа с двумя зеркально расположенными относительно корпуса загрузочными горловинами, в рамках совершенствования перспективных технологий и машин для измельчения зерновых компонентов.

В процессе внедрения выполнены следующие работы:

- 1) Проведена модернизация имеющейся конструкции дробилки с внедрением двух зеркально расположенных загрузочных горловин.

Приложение № II к работе (Внедрение в производство)

2) Проведено фиксирование основных показателей и отбор проб во время работы молотковой дробилки с оппозитной загрузкой материала в процессе измельчения пшеницы.


3) Разработаны практические рекомендации по рациональному использованию молотковых зернодробилок с оппозитной загрузкой материала в хозяйстве.

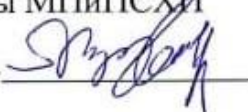
Технико-экономические показатели (при условии двухсторонней подачи):


- производительность – 200 кг/ч;
- модуль размола – 0,8 ... 3 мм;
- эффективность измельчения по показателю относительного (по массе) количества целых зерен – 0 ... 1%;
- уровень звука – 83 ... 85 дБА;
- виброускорение – 8 ... 20 м/с²;
- затраты энергии на измельчение (энергоёмкость), при оптимально подобранных параметрах – от 5 кВт·т/ч·λ (в зависимости от зерновой культуры).

Предложения по дальнейшему внедрению результатов исследований:

- необходимо в дальнейшем разработать молотковую дробилку для обеспечения равномерной загрузки материала в каждую горловину с принудительной подачей.

Научный руководитель д.т.н.,
профессор Федоренко И.Я. 

аспирант кафедры МПиПСХИ
Бесполденев Р.В. 

Конструктор
ООО «Еврогруп»
Фильчаков Е.А. 

Приложение № К 1 к работе (Апробация работы)



Приложение № К 2 к работе (Апробация работы)



МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА АЛТАЙСКОГО КРАЯ
АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



СЕРТИФИКАТ

выдан

БЕСПОЛДЕНОВ РОМАН ВИКТОРОВИЧ

по итогам участия в XVI МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«АГРАРНАЯ НАУКА – СЕЛЬСКОМУ ХОЗЯЙСТВУ»

9-10 февраля 2021

Барнаул



Н.А. Колпаков,
ректор Алтайского ГАУ

Приложение № К 3 к работе (Апробация работы)

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ
Совет молодых ученых и специалистов



Диплом

II СТЕПЕНИ

НАГРАЖДАЕТСЯ

Бесполодеков

Роман Викторович

ПОБЕДИТЕЛЬ

VII Региональной молодежной
научной конференции

**«Теория и практика инновационного развития
в представлениях нового поколения»**

секция: *«Проблемы и актуальные*

вопросы инженерного обеспечения АПК»

Ректор



Н.А. Колпаков

Барнаул – 2021

Приложение № К 4 к работе (Апробация работы)



Приложение № К 5 к работе (Апробация работы)



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

СЕРТИФИКАТ ПОБЕДИТЕЛЯ

подтверждает, что

**БЕСПОЛДЕНОВ
РОМАН ВИКТОРОВИЧ**

прошел отбор и стал победителем полуфинала
Всероссийского инженерного конкурса в 2021/2022 учебном году

Руководитель дирекции ВИК

Е.Б. Весна



РЖД Российские железные дороги

**ВЕРТОЛЕТЫ
РОССИИ**

РОСКОСМОС



РОСЭЛ

**ВЭБ
РФ**

ОАК Объединенная авиастроительная корпорация



РусГидро

Приложение № К 6 к работе (Апробация работы)



Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
 Департамент образования, научно-технологической политики
 и рыбохозяйственного комплекса
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
 высшего образования
 «Красноярский государственный аграрный университет»

Диплом I степени

II этапа Всероссийского конкурса
 на лучшую научную работу среди студентов,
 аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений
 Министерства сельского хозяйства РФ
 вручается

Бесполденову

Роману Викторовичу

Научный руководитель: д-р.техн. наук, профессор
 Федоренко Иван Ярославович

Номинация: «Хранение и переработка
 сельскохозяйственной продукции»



Н.И. Пыжикова

Ректор,
 доктор экономических наук,
 профессор
 Н.И. Пыжикова

14 апреля, 2022
 г. Красноярск

Приложение № К 7 к работе (Апробация работы)



Приложение № К 8 к работе (Апробация работы)

Диплом

победителя конкурса «Студенческий стартап»

Бесполденов Роман

Викторович

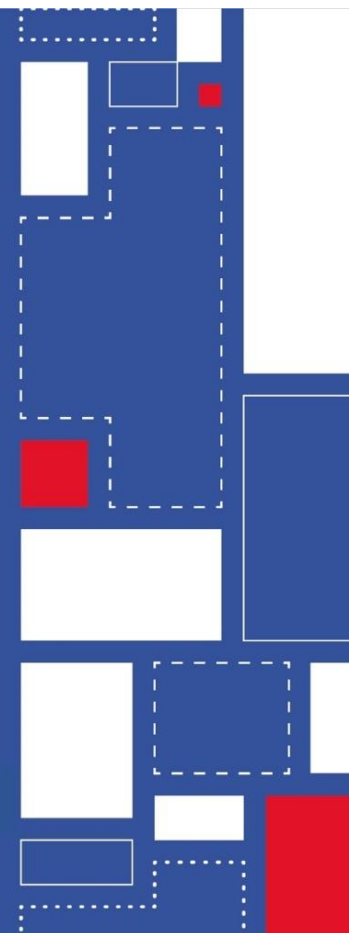
Договор № 462ГССС15-Л/78541



Генеральный директор С. Г. Поляков



2022



Приложение № К 9 к работе (Апробация работы)



Приложение № К 10 к работе (Апробация работы)



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ДИПЛОМ ЛАУРЕАТА

подтверждает, что

**Бесполденов
Роман Викторович**

прошел(ла) отбор и стал(а) лауреатом
Всероссийского инженерного конкурса 22/23

Заместитель председателя
организационного комитета
ВИК

В.И. Шевченко

РОСАТОМ

МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОСКОСМОС

РусГидро

РЖД
Российские
железные дороги

Ростех

ОКС

РОССИЯ -
СТРАНА
ИНОВАЦИОННОСТИ

ВЕРТОЛЕТЫ
РОССИИ

ОАК

МИНИСТЕРСТВО
ПРОМЫШЛЕННОСТИ
И ТОРГОВЛИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ДЕПАРТАМЕНТ
РАЗВИТИЯ
ИНОВАЦИОННОГО РАВИТИЯ
ПРЕДА МОСКВЫ

БАЗИС