

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул - 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Алтайский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Федоренко Иван Ярославович

Официальные оппоненты: **Сабиев Уахит Калижанович,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина», профессор кафедры «Агроинженерия»

Тепляшин Василий Николаевич,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», доцент кафедры «Технология, оборудование бродильных и пищевых производств»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный аграрный университет»

Защита состоится « 27 » декабря 2023 года в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 24.1.211.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук (СФНЦА РАН) по адресу: 630501, Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск–1, ул. Центральная, 2б, СФНЦА РАН.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью вашего учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 630501, Новосибирская обл. Новосибирский район, р.п. Краснообск–1, СФНЦА РАН, а/я 463. Телефон (факс): 8(383) 348-12-09; e-mail: aspsibime@ngs.ru.

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

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Вахрушев Владимир Владимирович

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Основным вектором успешного развития животноводческой отрасли для увеличения объемов ее производства и качества продукции является совершенствование современных машин и оборудования для механизации производства комбикормов, что играет большую роль в создании прочной кормовой базы для аграрного сектора в целом.

Основной операцией в процессе переработки фуражного зерна на комбикорма является измельчение, где в качестве основного оборудования используются молотковые дробилки с горизонтальной осью вращения барабана. Однако работу этих машин сопровождают негативные факторы шума и вибрации, а сам процесс измельчения зерна отличается высокой энергоёмкостью. 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.

Повышенные объемы расхода электроэнергии, наличие указанных выше негативных факторов требуют разработки научных и конструктивных решений, способных повысить эффективность технологического процесса измельчения на основе снижения виброактивности дробилки.

В связи с этим актуальны научные исследования, направленные на повышение эффективности измельчения фуражного зерна в дробилках горизонтального типа с измененной схемой ввода исходного зерна в полость измельчения, способствующей снижению их виброактивности, что является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы. Основой теории измельчения материалов растительного происхождения являются труды В. П. Горячкина.

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 зерна 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, обусловленных вибрацией.

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 затрат энергии в шарнирах молотков, воздушно-продуктовом слое и грунте, прилегающем к фундаменту дробилки.

3. Разработать математические модели технологической виброактивности молотковых зернодробилок, оценить ее энергетические 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 с оппозитной загрузкой на эффективность процесса измельчения.

Научную новизну работы составляют:

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

- 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;

- параметры процесса измельчения фуражного зерна в дробилке с оппозитной загрузкой исходного сырья.

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.

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 грунтовом массиве 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 результатов исследования. Достоверность подтверждается необходимым и достаточным количеством 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.

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.

Апробация результатов исследования. 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.

Публикации. По теме работы опубликовано 15 печатных работ, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в рецензируемых зарубежных научных изданиях из базы SCOPUS, получено 2 патента на изобретения и 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы: Диссертация 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.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, указана степень разработанности темы в научной и научно-практической литературе. Определен объект, предмет, поставлены цели и задачи исследования. Указаны положения, выносимые на защиту, степень достоверности теоретических и экспериментальных исследований, основные материалы, представляющие апробацию результатов исследования. Также приведено количество публикаций по теме диссертации, структура и объем работы.

В первой главе «Обзор исследований по измельчению фуражного зерна молотковыми дробилками» рассмотрены требования к процессу измельчения фуражного зерна, приведен анализ способов измельчения зерна и основные законы измельчения, рассмотрена классификация молотковых дробилок с горизонтальным расположением барабана и проведен анализ их работы.

Работа молотковых дробилок сопровождается значительным шумом и вибрацией, уровни которых превышают санитарные нормы. Так, по данным С. Ю. Терехина, Л. А. Глебова и А. Е. Яблокова, уровень виброактивности подшипниковых узлов дробилки А1-ДМР составляет 0,014-0,020 м/с. Уровень шума достигает 102 дБ (А) при допустимой норме 85 дБ (А).

При этом существующие исследования направлены, в основном, на виброизоляцию всей дробилки или ее барабана.

Несколько лучшие показатели технологической виброактивности наблюдаются у дробилок с вертикальным расположением барабана, но они нивелируются неравномерным износом молотков по высоте барабана и поэтому часто сопровождаются потерей его общей динамической балансировки.

Результаты анализа указывают на необходимость отыскания свойств самобалансировки барабана молотковой дробилки. На этой основе возможно снизить уровень ее виброактивности и непроизводительных затрат энергии. В связи с этим требуется тщательный научный анализ причин виброактивности молотковых дробилок, путей ее снижения, в частности за счет изменения существующих способов подачи исходного материала в полость измельчения.

На основе материалов этой главы определены объект, предмет, поставлены цели и задачи исследования.

Во второй главе «Технологическая виброактивность молотковых зернодробилок и ее энергетические последствия» рассмотрены причины дисбаланса барабана, которые обуславливают технологическую виброактивность дробилок, дополнительное рассеяние энергии в конструктивных элементах и сопряжениях самой дробильной машины, и прилегающем к фундаменту грунте. Потребляемая на это энергия «откачивается» от электродвигателя дробилки.

Исследованиями выявлено, что источником высокочастотных вибраций молотковых дробилок с горизонтальным расположением барабана являются ударные импульсы, возникающие при прохождении молотков около загрузочных устройств и их динамическим взаимодействием с входящим потоком исходного материала. Ударные импульсы образуют дополнительный момент M_2 , действующий на каждый молоток дополнительно к среднему моменту сопротивления воздушно-продуктового слоя M_1 (Рисунок 1).

Подтверждением этого служат экспериментальные наблюдения, обнаруживающие увеличение виброактивности дробильной машины при подаче материала на измельчение, а также зависимость уровня виброактивности от вида материала. Такую виброактивность дробилки можно назвать технологической.

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

Рассмотрим 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 Рисунке 2.

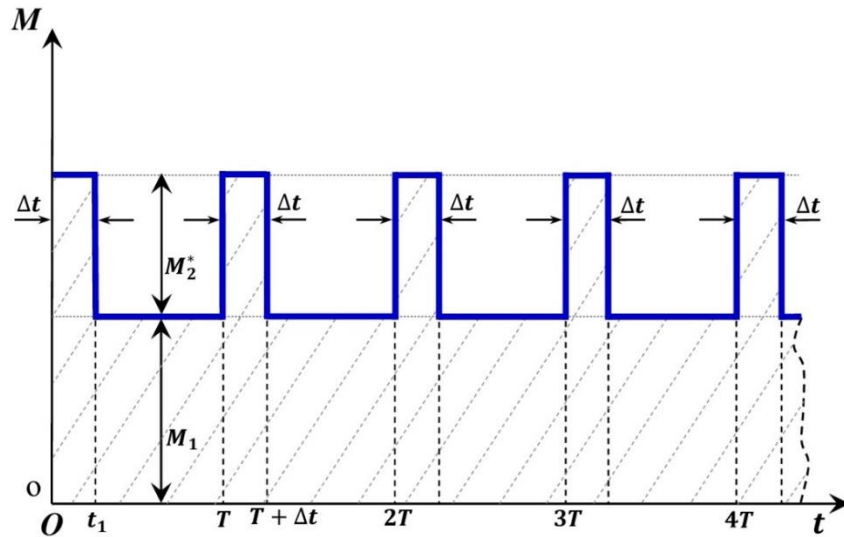
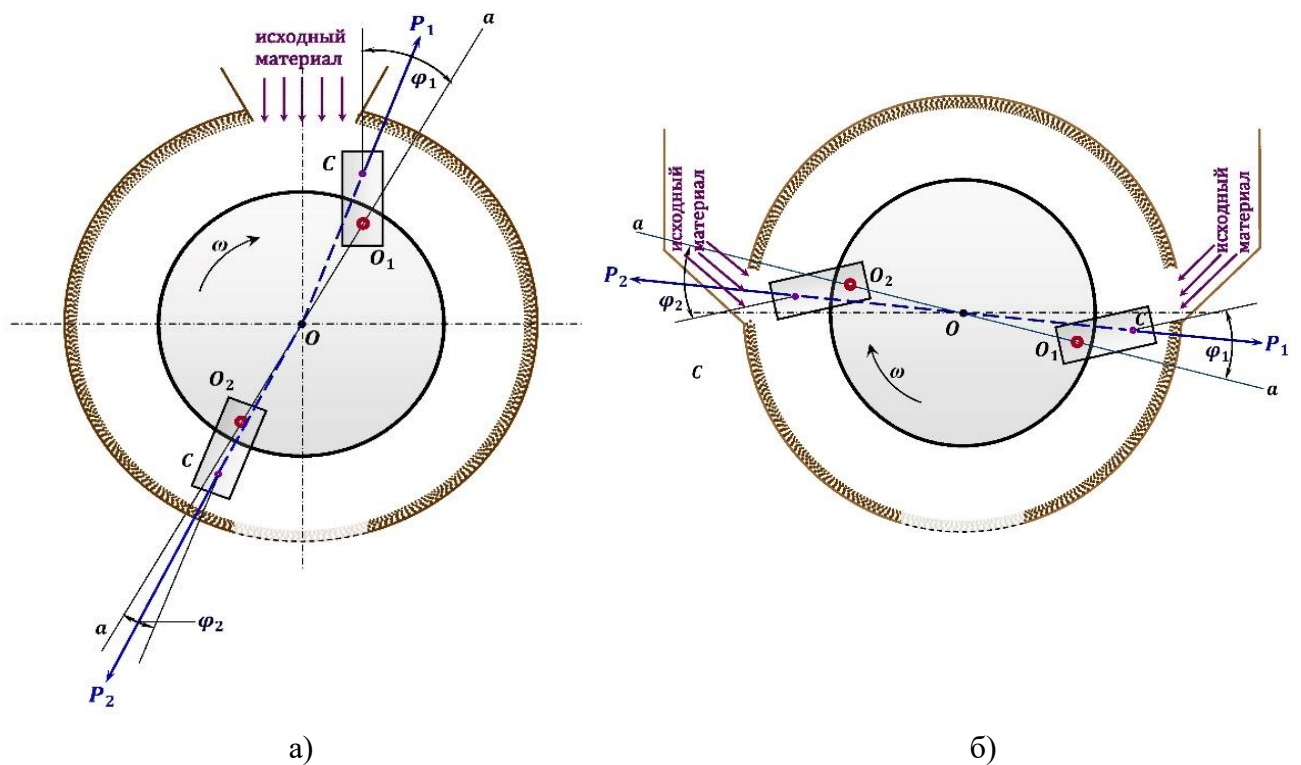


Рисунок 1 – Развернутый во времени график момента сопротивления, действующего на молоток со стороны дробимого материала (Δt – время прохождения молотка около загрузочной горловины, c , T – время одного оборота барабана дробилки, c)

Для анализа уравновешенности барабана требуется рассмотрение динамической системы с двумя молотками, расположенными на диаметральных линиях «а-а» барабана, проходящих через ось его вращения O и осей O_1 и O_2 вращения молотков в шарнирах подвеса. Такая схема отражает искомую информацию по данному вопросу.



а – с верхней подачей материала

б – с оппозитной подачей в боковые загрузочные устройства

Рисунок 2 – Динамические схемы системы барабана с двумя диаметрально расположенными молотками

Считаем, что барабан вращается равномерно с угловой скоростью ω .

В дробилке с верхней подачей (см. Рисунок 2а) молоток после удара по слою исходного материала отклоняется в шарнире на угол, больший по величине, чем угол сопряженного молотка на противоположной стороне, во многом восстановивший свое некоторое среднее положение после удара. Обозначив углы отклонения молотков как φ_1 и φ_2 , соответствующие центробежные силы от молотков определяются формулами

$$P_1 = m\omega^2 \sqrt{R^2 + r^2 + 2Rr \cos \varphi_1}, \quad (1)$$

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

где m – масса молотка, кг;

ω – угловая скорость барабана дробилки, рад/с;

R – расстояние от центра вращения барабана до оси подвеса молотков, м (см. Рисунок 2);

r – расстояние от оси подвеса молотка до его центра тяжести, м.

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

Оппозитная загрузка дробилки (см. Рисунок 2б), при одновременном ударе обоих молотков по входящим слоям исходного зерна способствует изменению динамических свойств молотков, которые отклоняются примерно на одинаковые углы, т. е. $\varphi_1 \approx \varphi_2$ под влиянием действующих на него факторов. 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 загрузкой 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 на практике возможны некоторые отклонения от теоретических оценок.

После удара по слою поступающего исходного материала молоток приходит в некоторое колебательное движение, затухающее со временем.

Эти колебания можно описать моделью колебаний физического маятника в поле центробежных сил

$$J\ddot{\varphi} + k\dot{\varphi} + m\omega^2 Rr \sin \varphi = M_1 + M_2, \quad (3)$$

где J – момент инерции молотка относительно оси своего подвеса, кг·м²;

φ – угол отклонения молотка от радиального направления, рад;

k – коэффициент сопротивления вращению молотка в шарнире подвеса;

m – масса молотка, кг.

Решение дифференциального уравнения (3), показало, что отклонение ξ молотка от его положения динамического равновесия с углом φ_0 имеет вид:

$$\xi = \frac{S(R+r)e^{-h(T-t)} [\sin \omega_{0*}(T-t) + e^{hT} \times \sin(\omega_{0*}t)]}{J\omega_{0*}(1 - 2e^{hT} \cos(\omega_{0*}T) + e^{2hT})}, \quad (4)$$

где $S = m_1 \cdot \Delta v$ – импульс, действующий на молоток, кг·м/с (m_1 – масса зерна, одновременно участвующая в ударе (зависит от подачи зерна), кг; Δv – изменение скорости молотка после удара, м/с);

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

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

Примерный график колебаний молотка показан на Рисунке 3. Видно, что 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 $\varphi_0 - \xi$, ($\varphi_0 - \xi_{min}$).

Непроизводительные затраты энергии на проскальзывание в зоне контакта молотка и пальца за один период колебаний молотка, определяются выражением:

$$A = F(2\xi_{max} + 2\xi_{min})r_u, \quad (5)$$

где F – сила трения в зоне контакта шарнирного молотка с пальцем, Н;

ξ_{max}, ξ_{min} – отклонения молотка в радианах, согласно Рисунку 3;

r_u – радиус пальца молотка, м.

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

$$N = A/T = F(\omega/2\pi) (2\xi_{max} + 2\xi_{min}) r_u = fm\omega^2 R \left(\frac{\omega}{\pi}\right) (\xi_{max} + \xi_{min}) r_u; \quad (6)$$

$$N = fmR (\omega^3/\pi) (\xi_{max} + \xi_{min}) r_u. \quad (7)$$

где $T = \frac{2\pi}{\omega}$ – время одного оборота барабана дробилки, с;

f – коэффициент трения стали по стали;

m – масса молотка, кг;

ω – угловая скорость барабана дробилки, рад/с;

R – расстояние от центра вращения барабана до оси подвеса молотков, м.

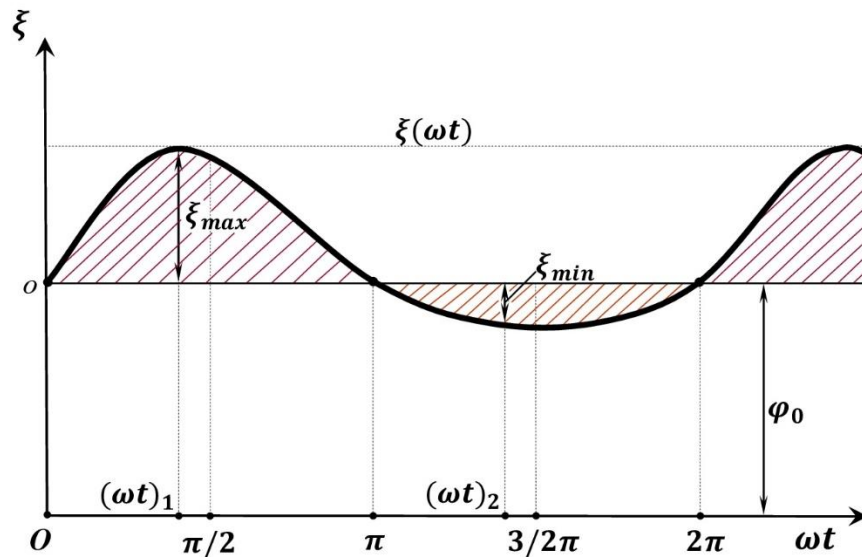


Рисунок 3 – График, иллюстрирующий затухание колебаний молотка

Установлено, что малые колебания молотков и сухое трение в их шарнирах существенно (до 8% в дробилках с традиционной загрузкой) повышают общие затраты энергии дробилкой.

Очевидно, что при оппозитной загрузке, когда импульсы S примерно в два раза меньше, чем при традиционной загрузке, непроизводительные затраты энергии сокращаются также в два раза.

Рассматривая непроизводительные затраты энергии при вибрациях, было установлено, 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 4), деформируемых воздействием колебательных процессов.

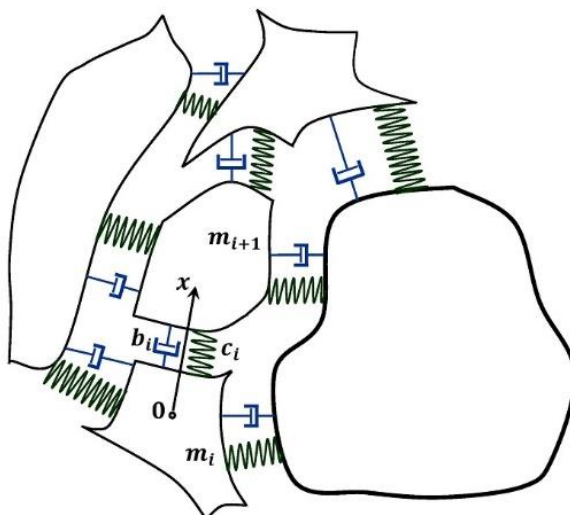


Рисунок 4 – Реологическое представление силовых взаимодействий в элементах воздушно-продуктового слоя

Рассмотрим единичную частицу слоя с массой m_i и ее конкретным контактом с соседней частицей m_{i+1} (см. Рисунок 4). Уравнение движения этой частицы можно представить в виде:

$$m_i \ddot{x} + b_i \dot{\eta} + c_i \eta = \Phi_{0i} \sin \omega t, \quad (8)$$

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

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 , Н;

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

Мощность N_i , необходимая для преодоления сопротивления в данном контакте, выводится из последнего уравнения и имеет вид:

$$N = \frac{\Phi_{0i}^2 \omega \sin 2\delta_i}{4 m_i (\omega_{0i}^2 - \omega^2)}, \quad (9)$$

где δ_i – угол сдвига фаз между перемещением частицы и действующей на нее вынуждающей силой, рад;

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

Угол сдвига фаз определяется по формуле

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

Из выражения (9) видно, что рассеяние 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 колебаний частиц, а также углы сдвига фаз δ .

Полагаем, что сумма потерь энергии во всех контактах воздушно-продуктового слоя, определяет общие потери в слое при его вибрациях.

При исследовании скрытых потерь энергии под фундаментом молотковой дробилки, его основание представлено, как это принято в теории фундаментов, линейно вязкоупругим, а тело дробилки и фундамента – абсолютно твердыми телами. Рассмотрено два случая крепления дробилки к фундаменту, жесткое и с помощью амортизаторов, при этом в обоих случаях рассеяние энергии в основании фундамента моделируется вязким элементом (демпфером) (Рисунок 5).

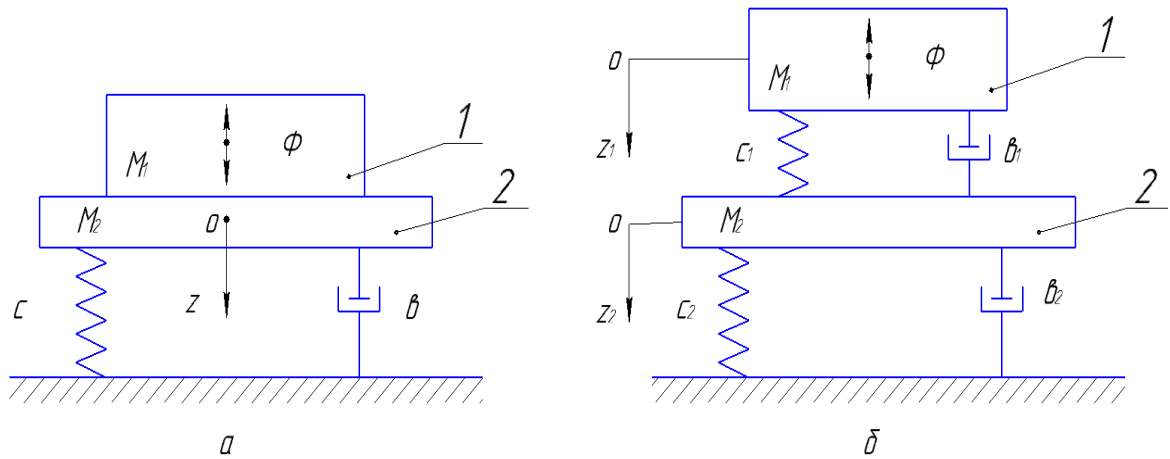


Рисунок 5 – Схемы к расчету вынужденных колебаний при жестком креплении дробилки к фундаменту (а) и креплении через амортизирующие элементы (б): 1 - дробилка, 2- фундамент

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

Рассмотрим сначала случай жесткого крепления дробилки к фундаменту (см. Рисунок 5а).

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 M .

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

$$N_{\text{ср}} = \int_0^{2\pi/\omega} \Phi(t) \dot{z}(t) dt. \quad (10)$$

Φ – вертикальная составляющая центробежной силы, действующей по линии oz (Рисунок 5)., изменяется по синусоидальному закону:

$$\Phi = \Phi_0 \sin \omega t,$$

где Φ_0 – амплитудное значение центробежной силы;

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

t – время, с.

После подстановки в (10) величин $\Phi(t)$, $z(t)$ и вычисления интеграла, получим формулу, по структуре совпадающей с выражением (9):

$$N_{\text{ср}} = \frac{\Phi_0^2 \omega \sin 2\delta}{4 M (\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (11)$$

где δ – угол сдвига фаз, характеризующий разность фаз между вынужденными колебаниями z и вынуждающей силой Φ

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

$M = M_1 + M_2$ масса дробилки и фундамента как общего тела, кг (M_1 – масса дробилки, M_2 – масса фундамента)

Максимальная величина средней мощности источника вибровозбуждения определяется из формулы (11)

$$\text{Max } N_{\text{ср}} = \frac{\Phi_0^2 \omega}{4 M (\omega_0^2 - \omega^2)}. \quad (12)$$

Рассеяние энергии в основании фундамента существенно зависит от близости работы системы “дробилка – фундамент – основание” к резонансу. Поэтому расчеты по формуле (12) были представлены в виде функции $\text{max } N_{\text{ср}} = \text{max } N_{\text{ср}}(\omega_0)$.

На построенном графике (Рисунок 6) были введены временные переобозначения параметров: $\omega_0 \sim \omega 0$, $\max N_{cp} \sim N$.

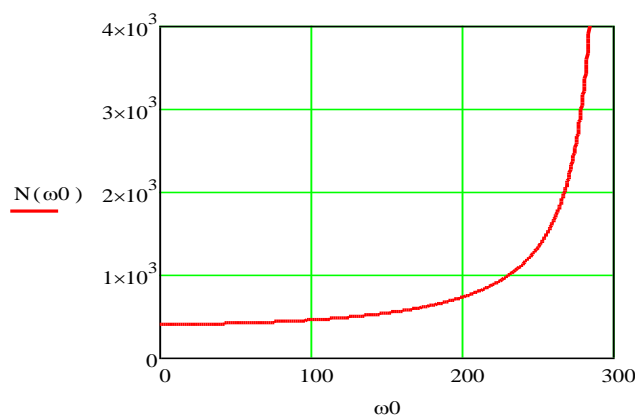


Рисунок 6 – Зависимость рассеяния энергии в основании фундамента дробилки от собственной частоты колебаний системы “дробилка - фундамент - основание”

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

$$N(a) := 0.5 \cdot \Phi_0 \cdot a \cdot \omega \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)$$

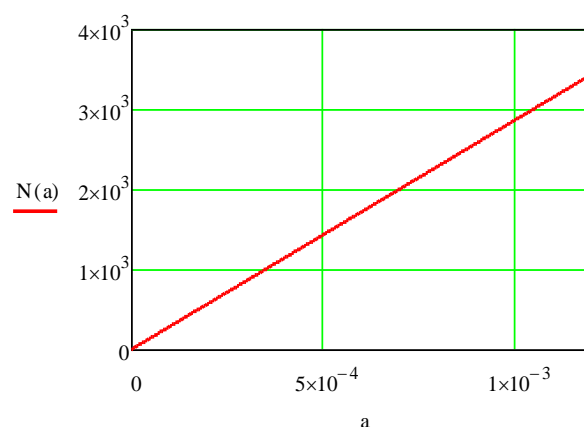


Рисунок 7 – Зависимость максимума средней мощности N , отдаваемой электродвигателем дробилки на вибрирование основания, от амплитуды a колебаний фундамента

Оценивая $\max N_{cp}$ для сельскохозяйственных дробилок фуражного зерна с традиционной загрузкой исходного зерна, мощностью приводного двигателя $N_э = 25-30$ кВт, было установлено, что общие потери мощности составляют около 3 кВт. Таким образом, непроизводительные затраты энергии на вибрирование грунта могут достигать 10% от общих затрат, что представляет существенные потери. С ними можно бороться двумя путями, увеличивая массу фундамента или снижая виброактивность самой дробилки. Снижение виброактивности является более перспективным, так как позволяет повысить надежность дробилки и уменьшить виброшумовое загрязнение окружающей среды. Оппозитная загрузка дробилки теоретически позволяет снизить рассматриваемые потери энергии от технологической виброактивности до минимальных значений.

Рассматривая далее случай, когда дробилка опирается на фундамент при помощи виброизолирующих элементов (см. Рисунок 5б), было установлено, что для осуществления антирезонанса (т. е. минимальных колебаний массы M_1), жесткость амортизаторов должна подбираться по условию

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

Потери мощности электродвигателем дробилки за счет рассеяния энергии в основании фундамента в данном случае оцениваются по формуле

$$\max N_{cp} = \frac{1}{2} \Phi_0 A \omega \sin\left(\frac{\pi}{4}\right). \quad (13)$$

Формулу (13) иллюстрирует Рисунок 7 (здесь также было введено переобозначение параметров).

При реально достигаемых амплитудах колебаний фундамента в 0,5-1,0 мм непроизводительные затраты мощности электродвигателя дробилки на вибрирование основания фундамента может доходить до 1,43-2,86 кВт. Это также существенная величина потерь мощности (4,8-9, 6%). Эти оценки касаются дробилок с традиционной загрузкой.

Подводя итог теоретическим выкладкам, следует указать, что впервые поставлены и получили некоторое разрешение научные задачи, касающиеся влияния способа загрузки дробилки исходным зерном на ее технологическую виброактивность, а также роли последней в

непроизводительных затратах энергии в шарнирах молотков, воздушно-продуктовом слое и грунте, прилегающем к фундаменту дробилки.

В главе 3 «Программа и методика экспериментальных исследований» показано, что для всестороннего исследования процесса измельчения фуражного зерна необходимо получение по результатам эксперимента информации о следующих показателях:

1) энергоемкости процесса дробления с учетом степени измельчения материала (λ), Э, кВт \times ч / (т \times ед. ст. изм);

2) производительности измельчителя Q , кг/ч;

3) степени измельчения зерна λ ;

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

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 решетке с диаметром отверстий 3-5 мм;

7) параметрах вибрации определенных зон дробилки, в качестве основной величины использовали амплитуду виброускорения, мм/с²;

8) уровне шумовой обстановки (уровне шума), возникающем в процессе дробления материала, распространяющегося в воздушной среде помещения на расстоянии 1 м, по показателю уровня звука L_A , (дБ(А))

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

$$\text{Э}(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min; \quad (14)$$

$$[M_1] \leq M(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq [M_2]; \quad (15)$$

$$0 \leq v(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq [v]; \quad (16)$$

$$0 \leq \Pi(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq [\Pi], \quad (17)$$

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

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

$[\Pi]$ – допустимое значение целых зерен, определяемые нормативными документами;

x_1, x_2, \dots, x_n – факторы процесса измельчения зерна.

Кроме того, отдельными критериями оптимальности являются критерии, определяющие виброактивность a_B и шумовую характеристику L_A дробилки:

$$a_B(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min; \quad (18)$$

$$L_A(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min, \quad (19)$$

Таким образом, сформулирована задача многокритериальной оптимизации (14-17,18,19). Критерий виброактивности дробилки a_B (18) влияет, как показано в теоретической главе, в первую очередь на непроизводительные затраты энергии в дробилке. Поэтому критерии $\text{Э}(x_i)$ 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. Уровень звука L_A может быть переведен в ранг ограничений, поскольку ГОСТ 12.1.003-83 регламентирует уровень шума, который не должен превышать 85 дБА.

Поэтому окончательно задачу оптимизации процесса измельчения зерна в оппозитной дробилке сформулировали в виде однокритериальной задачи с ограничениями:

$$\text{Э}(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min; \quad (20)$$

$$[M_1] \leq M(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq [M_2]; \quad (21)$$

$$0 \leq v(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq [v]; \quad (22)$$

$$\Pi(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq [\Pi]; \quad (23)$$

$$L_A(x_1, x_2, \dots, x_n) < [L_A]. \quad (24)$$

В качестве исходных переменных были отобраны величины, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Переменные, оказывающие влияние на процесс измельчения в молотковой дробилке с оппозитной загрузкой

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

На основе теории размерности данные переменные были преобразованы в критерии подобия. Для решения поставленных задач выделены три критерия:

$$\pi_1 = \frac{\rho \times (R \times \omega)^2}{\sigma}, \quad \pi_3 = \frac{[q_1]}{[q_2]}, \quad \pi_4 = \frac{q_1}{R^3 \times \omega \times \rho}. \quad (25)$$

В экспериментах первый критерий изменяли при помощи – ω , третий – q_1 , четвёртый – q_2 .

Учитывая, что критерии $\pi_2 = \frac{[\delta]}{[b]}$, и $\pi_5 = \frac{[b]}{[R]}$ ранее хорошо были изучены множеством авторов, поэтому они устанавливались на постоянном среднем уровне.

Обозначения и уровни варьирования этих факторов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – 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	
	Подача исходного материала в левое отверстие, кг/с	q_1	X_1	-1	0	+1	0,04
	Подача исходного материала в правое отверстие, кг/с	q_2	X_2	0,00	0,04	0,08	0,04
	Угловая скорость вращения ротора, рад/с	ω	X_3	351,8	452,3	552,8	100,5

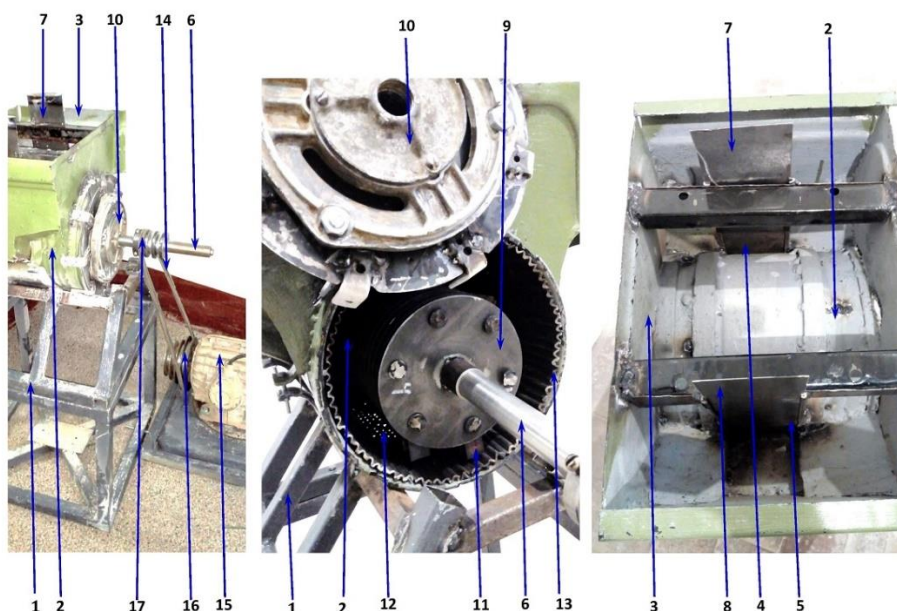
Уровни варьирования факторов были подобраны таким образом, чтобы в рамках одной матрицы планирования эксперимента можно было изучать работу дробилки при загрузке ее в одно загрузочное устройство (традиционная схема), а также предлагаемую оппозитную загрузку в два загрузочных устройства одновременно.

Для определения зависимостей между выходными характеристиками и факторами процесса измельчения был применен план 2-го порядка для 3 факторов Бокса-Бенкена, позволяющий уменьшить количество экспериментальных исследований, по сравнению с соответствующими ротатбельными и композиционными планами.

Для изучения технологического процесса, протекающего в изучаемой дробилке и построения математических моделей исследуемого процесса, статистическую обработку полученных данных проводили на компьютере при помощи программного обеспечения «PTC MathCAD 15», имеющего комплекс функций для статистической обработки информации, поиска значений локальных экстремумов функций $Y(X_1, X_2, X_3)$, а также решения других оптимизационных задач.

В работе даны описание поверенной приборной базы для исследования, оценка точности приборов, а также приведена подробная методика проведения и обработки эксперимента.

Все эксперименты проведены на установке, общее устройство которой можно уяснить из Рисунка 8. В диссертации дано подробное описание этой установки.



1 – рама; 2 – цилиндрическая камера измельчения; 3 – бункер; 4 и 5 – загрузочные горловины; 6 – приводный вал; 7 и 8 – регулировочные устройства для изменения подачи исходного зерна; 9 – горизонтально расположенный барабан; 10 – подшипниковые узлы; 11 – молотки барабана, закрепленные шарнирно; 12 – решето установленное в нижней части камеры измельчения; корпуса; 14 – клиноременная передача; 15 – электродвигатель; 16 – шкив электродвигателя; 17 – шкив барабана

Рисунок 8 – Экспериментальный образец молотковой дробилки с оппозитной загрузкой зерна

В качестве материала для исследований использовали пшеницу и ячмень, как наиболее распространенные фуражные культуры. К тому же зерна ячменя являются наиболее прочными и трудно поддаются разрушению.

В главе четвертой «Результаты и анализ экспериментальных исследований» приведены уравнения регрессии, полученные по результатам эксперимента. Всего было получено 12 уравнений регрессии в соответствии с программой исследования. Коэффициент детерминации R^2 , рассчитываемый в программе *MathCAD* при помощи программы *Polyfitstat*, не превышает значения 0,95. Это указывает на адекватность полученных математических моделей.

В диссертационной работе приведен подробный анализ всех этих зависимостей. Здесь же дадим оценку важнейших из них, касающихся энергоемкости процесса измельчения и виброактивности дробилки, а также приведем результаты оптимизации процесса измельчения зерна в соответствии с ее моделью (20)–(24).

По результатам статистической обработки результатов эксперимента, где в качестве функции отклика принята энергоемкость процесса измельчения \mathcal{E} , получены уравнение регрессии в кодированных переменных:

а) при измельчении пшеницы:

$$Y_1(X_1, X_2, X_3) = 5.357 - 0.59X_1 - 1.162X_2 - 0.103X_3 + 0.572X_1X_2 + 0.264X_1X_3 - 0.58X_2X_3 + 0.192X_1^2 + 0.902X_2^2 + 1.191X_3^2. \quad (26)$$

б) при измельчении ячменя:

$$Y_1(X_1, X_2, X_3) = 7.574 - 2.174X_1 - 3.564X_2 + 2.066X_3 + 2.217X_1X_2 - 2.317X_1X_3 - 2.22X_2X_3 + 0.154X_1^2 + 1.889X_2^2 + 3.315X_3^2. \quad (27)$$

Для получения визуального представления о составленных уравнениях регрессии (26)–(27) построены поверхности отклика в аксонометрии на разных графических полях (Рисунок 9), а также одномерные зависимости, характеризующие различие энергоемкости измельчения пшеницы и ячменя (Рисунок 10).

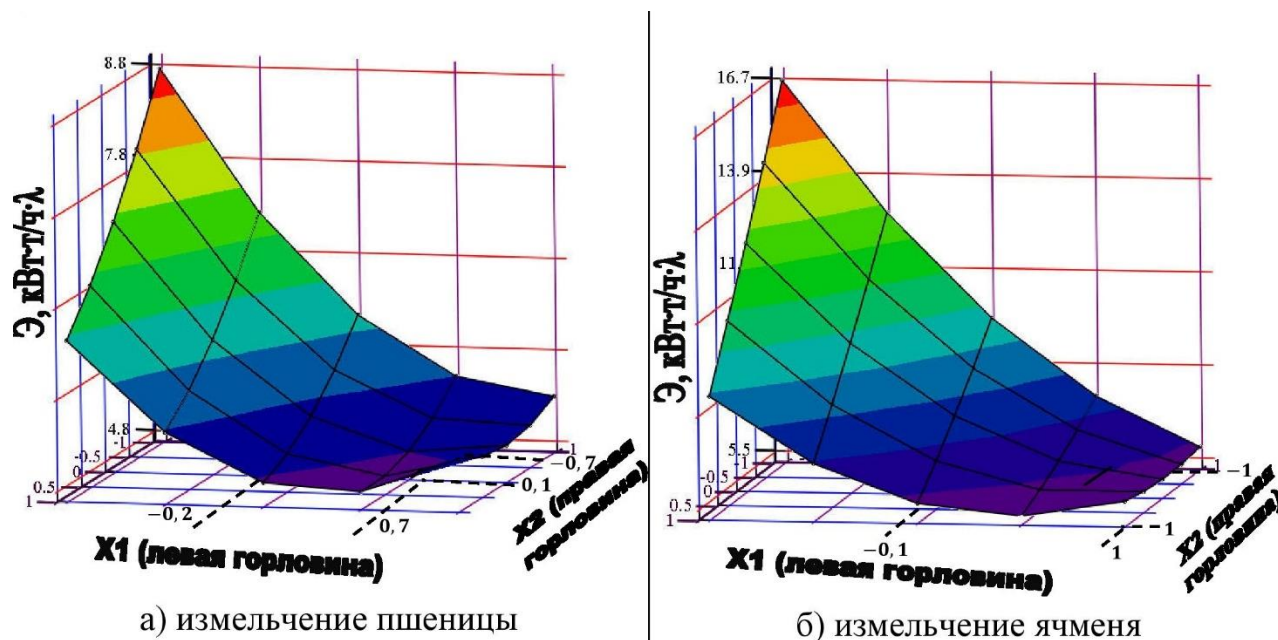


Рисунок 9 – Поверхности отклика, характеризующие влияние X_1 и X_2 , при основном уровне варьирования фактора: $X_3 = 0$, на энергоемкость процесса измельчения Y_1

Поскольку значения коэффициентов при линейных и квадратичных членах с X_1 и X_2 в обоих уравнениях регрессии относительно велики, наблюдается также взаимодействие этих факторов, то из этого следует, что способ подачи влияет на энергоемкость процесса измельчения фуражного зерна. При парном сочетании изменяемых величин подачи X_1 и X_2 и постепенном выравнивании значений этих подач материала в левую и правую горловины, наблюдается уменьшение энергоемкости процесса измельчения. При этом поверхности отклика демонстрируют области минимума по факторам X_1 и X_2 . Это согласуется с теоретическими оценками.

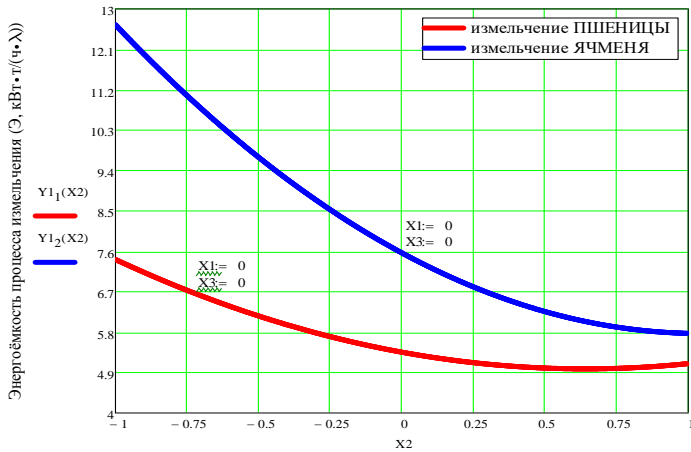


Рисунок 10 – Значение энергоёмкости процесса, в зависимости от подачи материала в правую загрузочную горловину при основном уровне варьирования факторов: подачи материала в левую горловину $X_1 = 0$ и угловой скорости $X_3 = 0$

где в качестве функции отклика принято виброускорение, получены уравнения регрессии в кодированных переменных:

а) при измельчении пшеницы:

$$Y_5(X_1, X_2, X_3) = 14.63 - 0.20X_1 + 1.60X_2 + 5.35X_3 - 0.325X_1X_2 - 0.525X_1X_3 - 0.325X_2X_3 + 0.196X_1^2 + 1.196X_2^2 + 1.846X_3^2 \quad (28)$$

б) при измельчении ячменя:

$$Y_5(X_1, X_2, X_3) = 12.367 - 0.15X_1 + 0.588X_2 + 3.813X_3 - 0.2X_1X_2 - 0.85X_1X_3 - 0.775X_2X_3 + 1.104X_1^2 + 1.179X_2^2 + 2.129X_3^2 \quad (29)$$

При помощи программного обеспечения «PTC Mathcad 15.0» нами визуализированы полученные уравнения регрессии (28)-(29) (Рисунки 11 и 12).

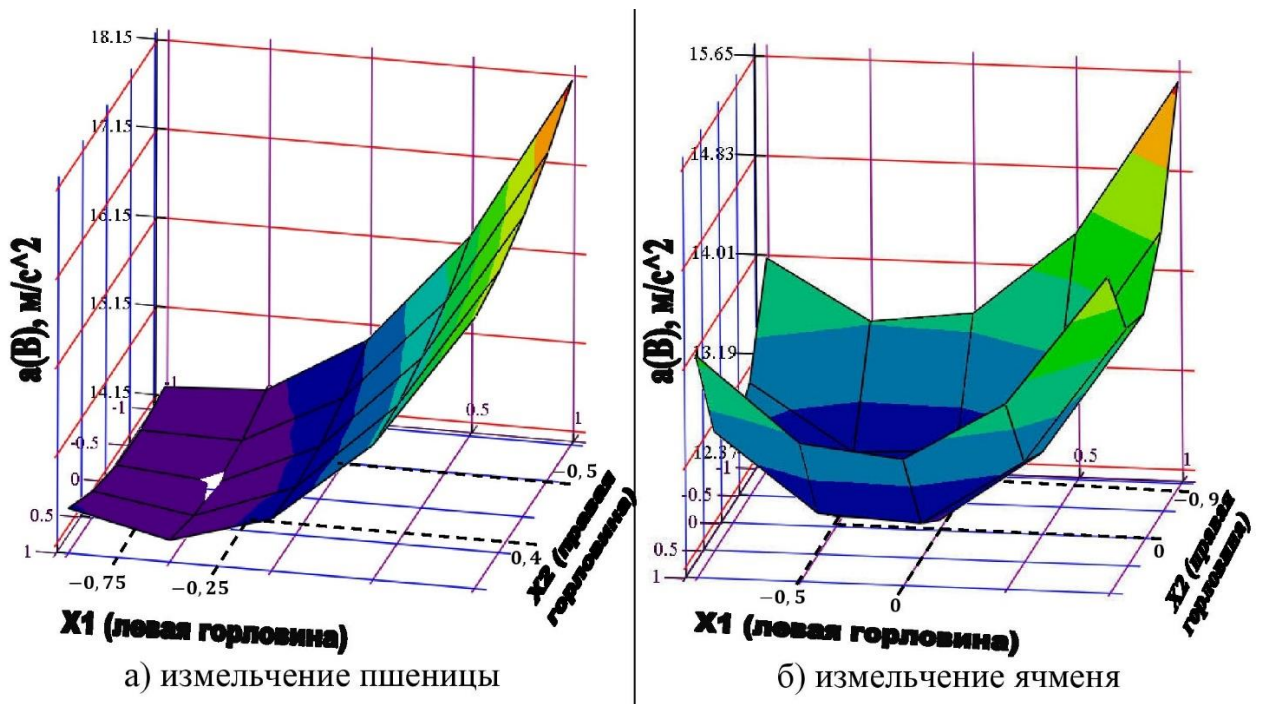


Рисунок 11 – Поверхности отклика, характеризующие влияние сочетаний факторов X_1 и X_2 , при основном уровне варьирования фактора: $X_3 = 0$, на величину виброускорения Y_5

При односторонней подаче материала в левую X_1 или правую горловину X_2 видны области, характеризующиеся повышенной удельной энергоёмкостью процесса измельчения, по сравнению с парной подачей (см. Рисунки 9 и 10).

Уравнения (26)-(27) показывают, что при измельчении пшеницы и ячменя с повышением угловой скорости барабана энергоёмкость имеет тенденцию к снижению, затем к увеличению. Увеличение связано с возрастанием аэродинамических нагрузок на барабан.

В результате статистической обработки результатов эксперимента,

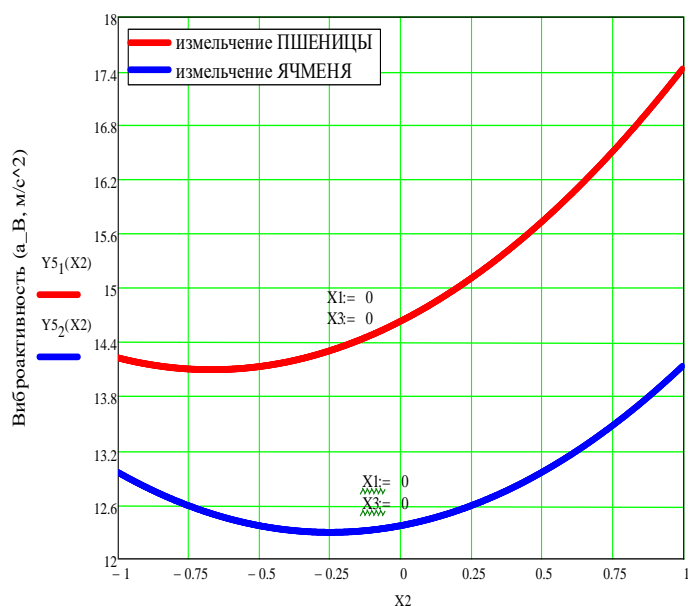


Рисунок 12 – Параметры виброактивности в зависимости от подачи материала в правую загрузочную горловину при основном уровне варьирования факторов: подачи материала в левую горловину $X_1 = 0$ и угловой скорости $X_3 = 0$

Отчетливый минимум как раз и наблюдается при почти равных подачах в левую и правую горловины.

Некоторое различие в проявлении виброактивности дробилкой при измельчении пшеницы и ячменя можно объяснить следующим. Зерно ячменя является самым прочным из фуражных культур, поэтому дробилка в большей степени реагирует своей виброактивностью на оппозитную загрузку ячменя, чем при измельчении пшеницы с той же оппозитной загрузкой.

Таким образом, 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.

Уравнения регрессии отражают зависимости энергоемкости процесса измельчения и иных исследуемых величин, переведенных в ранг ограничений, от факторов процесса измельчения (см. выражения (20)-(24)), что позволяет провести оптимизацию процесса измельчения в оппозитной дробилке.

Предельные значения величин, характеризующих ограничения, были составлены на основе анализа различных нормативных документов:

- 1) для модуля размола $0,2 \leq Y_2(X_1, X_2, X_3) \leq 1,2$; мм;
- 2) для коэффициента вариации модуля размола $0 \leq Y_3(X_1, X_2, X_3) \leq 50$; %;
- 3) для относительного (по массе) количества целых зерен $0 \leq Y_4(X_1, X_2, X_3) \leq 1$; %;
- 4) для уровня звука $0 \leq Y_6(X_1, X_2, X_3) \leq 85$, дБА.

В результате оптимизации процесса измельчения пшеницы в среде MathCAD с использованием функции «Minimize (Y,X)», посредством поиска значений факторов, при которых функция цели достигает минимума, получено: $\Theta = 4,86 \frac{\text{кВт} \times \text{ч}}{\text{т} \times \lambda}$, 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. Проверка решений уравнений-ограничений показала, что при заданном значении энергоемкости процесса измельчения, значения искомым величин составили: $M = 1,2$ мм, $v = 26,83$ %, $\text{Ц} = 0,65$ %, $L_A = 83,98$ дБА.

При оптимизации процесса измельчения ячменя в среде Mathcad расчеты показали, что при заданных ограничениях оптимальное значение энергоемкости – $\Theta = 7,54 \frac{\text{кВт} \times \text{ч}}{\text{т} \times \lambda}$, при которых

Из анализа следует, что виброускорение корпуса дробилки существенно зависит от способа загрузки дробилки, а также соотношения подач материала в левую и правую горловины. В этом случае также подтверждаются теоретические результаты гл.2.

Так, в процессе измельчения пшеницы минимальное значение виброактивности достигается при увеличении подачи измельчаемого материала в левую горловину по сравнению с правой, по соотношению 3/1 (см. Рисунок 11). При этом наблюдается слабо выраженный экстремум-минимум.

В полной же мере снижение виброактивности дробилки при оппозитной загрузке наблюдается при измельчении ячменя (см. Рисунок 11б). Здесь мы видим поверхность отклика по виброускорению в виде параболоида, обращенного своими ветвями вверх.

натуральные значения аргументов имеют следующие значения: $q_1 = 0,075 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $q_2 = 0,051 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $\omega = 527,6 \text{ рад/с}$. В результате чего получены значения искомых величин при заданном значении энергоёмкости процесса измельчения: $M = 1,2 \text{ мм}$, $\nu = 17,5 \%$, $\zeta = 0,28 \%$, $L_A = 85,0 \text{ дБА}$.

Снижение энергоёмкости процесса измельчения составляет от 8,2 % (пшеница) до 19,9 % (ячмень).

В пятой главе «Экономическая эффективность результатов исследования и состояние внедрения» проведен расчет технико – экономических показателей, который показывает, что применение предлагаемой дробилки с оппозитной загрузкой, в сравнении с дробилкой ДМ-200, позволяет получить снижение удельных совокупных затрат примерно на 9,7%.

В настоящее время ООО «АгроТехНовации» подготовило документацию для мелкосерийного выпуска дробилки с оппозитной загрузкой исходного зерна. К числу таких документов относятся: Технические условия «ТУ 28.30.83-00195965384-2023 Дробилка молотковая с оппозитной загрузкой для измельчения зерна «ДМОЗИЗ»; Сертификат соответствия №0033218 от 17.08.2023 г., выданный органом по сертификации RA.RU.11HE06 ООО «Эксперт-С»; Декларация ЕАС о соответствии (регистрационный номер ЕАЭС № RU -Д- RU.РА06.В.68685/23 от 23.08.2023 г.). Сертификат и декларация, в свою очередь, выданы на основе протоколов испытаний дробилки, проведенных испытательной лабораторией «Гранум» (протокол испытаний №001/В-17/08/23 от 17.08.2023 г) и испытательной лабораторией «ОНИКС» (протокол контрольных испытаний №91470.210823 от 21.08.2023 г.).

III. 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 уравнивая барабан и снижая виброактивность дробилки в целом.

3. Определена роль 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 рад/с, при которых значение энергоёмкости позволяет достичь минимума $\Theta = 4,86 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \lambda}$.

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 рад/с, при которых оптимальное значение энергоёмкости с учетом заданных ограничений составило $\Xi = 7.54 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \lambda}$.

Значения критериев подобия для процесса измельчения ячменя, с учетом найденных оптимальных параметров, составили следующие величины: $\pi_1 = 2,726$; $\pi_3 = 1,472$; $\pi_4 = 1,104 \times 10^{-4}$.

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 энергоёмкости 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.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Федоренко, И. Я. Причины виброактивности молотковых зернодробилок с горизонтальным расположением барабана [Текст] / И. Я. Федоренко, **Р. В. Бесподенов** // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 2(196). – С. 96-104.
2. Федоренко, И. Я. О непроизводительных потерях энергии молотковой зернодробилкой, обусловленных колебаниями грунта под её фундаментом [Текст] / И. Я. Федоренко, **Р. В. Бесподенов** // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2023. – № 3(221). – С. 80-86.
3. **Бесподенов, Р. В.** Исследование и моделирование взаимодействия молотков вертикальной дробилки с воздушно-зерновым слоем [Текст] / Р. В. Бесподенов, И. Я. Федоренко, Т. Н. Землянухина [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2023. – № 4(222). – С. 92-98.

4. **Бесполденев, Р. В.** Виброактивность молотковых зернодробилок с оппозитной загрузкой исходного материала [Текст] / Р.В. Бесполденев, А.М. Левин, И.Я. Федоренко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2023. – № 6(224). – С. 78-85.

Публикации в зарубежных научных изданиях, входящих в международные реферативные базы цитирования (SCI-Expanded, A&HCI, SSCI, ESCI Web of Science CCI / Scopus):

5. **Bespoldenov, R.V.** Mechanical and physical aspects of the theory of interaction between a crusher hammer and an air-grain layer / R.V. Bespoldenov & 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 (1) 012011. AAPM-1026. DOI 10.1088/1742-6596/2573/1/012011. – 2023. – Режим доступа <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2573/1/012011>.

Патенты Российской Федерации:

6. Пат. № 2742509 С1 Российская Федерация, МПК В02С 13/14 (2006.01). Молотковая дробилка для зерна с вертикально установленным ротором / **Бесполденев Р. В.**; заявитель и патентообладатель: Бесполденев Р.В., – № 2019139472; заявл. 03.12.2019; опубл.: 08.02.2021, Бюл. № 4.

7. Пат. № 2746586 С1 Российская Федерация, МПК В02С 13/04 (2006.01). Молотковая дробилка/ Федоренко И.Я., **Бесполденев Р. В.**; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Алтайский государственный аграрный университет" (АГАУ), – № 2020130348; заявл. 14.09.2020; опубл.: 16.04.2021, Бюл. № 11.

8. Пат. № 219913 U1 Российская Федерация, МПК В02С 13/04 (2006.01). Устройство для измельчения зерновых кормов / **Бесполденев Р. В.**, Федоренко И.Я.; заявитель и патентообладатель: Камень-на-Оби. Общество с ограниченной ответственностью "Агротехновации" (ООО "Агротехновации"), Барнаул. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Алтайский государственный аграрный университет" (АГАУ), – № 2023110433; заявл. 21.04.2023; опубл.: 14.08.2023, Бюл. № 23.

Публикации в журналах, сборниках научных трудов, материалах конференций:

9. **Бесполденев, Р. В.** Повышение эффективности измельчения зерновых кормов в дробилках горизонтального типа на основе снижения ее виброактивности [Текст] / Р. В. Бесполденев // Молодежь - Барнаулу: материалы XXII городской научно-практической конференции молодых ученых, (Барнаул, 02–09 ноября 2020 года) / гл. редактор Ю.В. Анохин. – Барнаул: Изд-во Алтайский государственный университет, 2021. – С. 40-41.

10. Федоренко, И. Я. Снижение технологической виброактивности молотковых дробилок [Текст] / И. Я. Федоренко, **Р. В. Бесполденев** // Аграрная наука - сельскому хозяйству: сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции: в 2-х кн., (Барнаул, 09–10 февраля 2021 года). – Барнаул: Изд-во Алтайский государственный аграрный университет, 2021. – Кн.2. – С. 43-44.

11. **Бесполденев, Р. В.** Диссипация энергии в конструктивных элементах молотковой зернодробилки [Текст] / Р. В. Бесполденев // Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 1. – С. 73-77.

12. **Бесполденев, Р. В.** Анализ работы молотковых дробилок на основании теории размерности [Текст] / Р. В. Бесполденев // Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 2. – С. 42-46.

13. **Бесполденев, Р. В.** Усовершенствование конструкции молотковой дробилки с вертикальным валом ротора, как способ снижения ударной нагрузки и ускоренного износа молотков верхних ярусов [Текст] / Р. В. Бесполденев // Студенчество России: век XXI: материалы VIII Всероссийской молодёжной научно-практической конференции, (Орёл, 15 декабря 2021 года.): в 2-х ч. – Орёл: Изд-во Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, 2022. – Ч 1.– С. 145-152.

14. **Бесполденев, Р.** Усовершенствование конструкции молотковой дробилки с вертикальным валом ротора [Текст] / Р. Бесполденев, И. Федоренко // Комбикорма. – 2022. – № 1. – С. 39-40.

15. Выставкин С. Б. Моделирование виброактивности измельчителя-разбрасывателя соломы комбайна [Текст] / С. Б. Выставкин, И. Я. Федоренко, А. В. Ишков, **Р. В. Бесполденев** // Аграрная наука - сельскому хозяйству : сборник материалов XVII Международной научно-практической конференции: в 2-х кн. (Барнаул, 09–10 февраля 2022 года). – Барнаул: Изд-во Алтайский государственный аграрный университет, 2022. – Кн. 2. – С. 23-26.

16. Федоренко, И. Я. Оценка потерь энергии в шарнирах трения молотковых зернодробилок [Текст] / И. Я. Федоренко, С. В. Золотарев, **Р. В. Бесполденев** // Аграрная наука - сельскому хозяйству: сборник материалов XVII Международной научно-практической конференции: в 2-х кн. (Барнаул, 09–10 февраля 2022 года). – Барнаул: Изд-во Алтайский государственный аграрный университет, 2022. – Кн. 2. – С. 74-76.

17. **Бесполденев, Р. В.** Конструктивные решения по снижению трения в шарнирах рабочих органов молотковых дробилок в период совершения технологической операции / Р. В. Бесполденев [Текст] // Современные направления повышения эффективности использования транспортных систем и инженерных сооружений в АПК: материалы Международной студенческой научно-практической конференции (Рязань, 16 февраля 2022 года) / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева». – Рязань: Изд-во Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2022. – С. 24-29.

18. **Бесполденев, Р. В.** Характеристика шума молотковой дробилки с оппозитной загрузкой исходного материала [Текст] / Р. В. Бесполденев, Б. А. Антоненко // Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета. – 2023. – № 1. – С. 47-52.